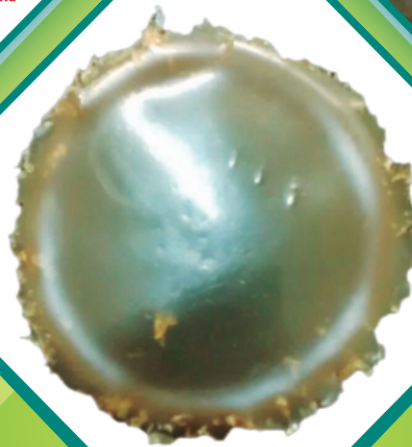
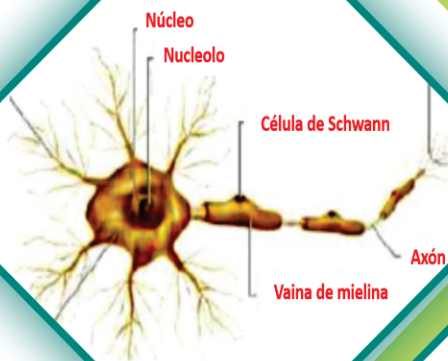




INFORMADOR TÉCNICO



Volumen 80 Número 1 Enero - Junio 2016 • ISSN 0122-056X • e-ISSN 2256 - 5035



ISSN 0122-056X

e-ISSN 2256 - 5035

Tarifa Postal Reducida No. 2015 - 179 4-72,
vence 31 de Dic. 2016

ASTIN
CENTRO NACIONAL DE ASISTENCIA
TÉCNICA A LA INDUSTRIA



Informador Técnico
Título Abreviado: Inf. Téc.
ISSN 0122 - 056X
e-ISSN 2256 - 5035
Periodicidad: Semestral
Enero - Junio 2016

Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA, Regional Valle
Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria - ASTIN

Calle 52 # 2Bis - 15
Teléfonos: 57 (2) 431 5800 ext. 22694
Email: revistaitastin@sena.edu.co
<http://informadortecnico.senaastin.com>
http://biblioteca.sena.edu.co/paginas/revistas_info.html
Cali, Valle del Cauca, Colombia

Indexada en:



Registrada en:



Alfonso Prada Gil
Director general del SENA

Cesar Alveiro Trujillo Solarte
Director SENA Regional Valle

Aura Elvira Narváez Agudelo
Subdirectora Centro Nacional de
Asistencia Técnica a la Industria –ASTIN
y Directora de la revista

Carolina Caicedo
Investigadora y Editora

Miguel Angel Solís Molina
Coordinador del Servicio de Información y
Divulgación Tecnológica –SIDT
Editor Asociado

Julia Emma Zúñiga Rivera
Coordinadora

Elizabeth Enriquez Quintero
Diagramación y diseño

ISSN: 0122-056X
e-ISSN: 2256-5035

Impresión y acabados
Ingeniería Gráfica

Tiraje
300 ejemplares
Enero - Junio de 2016

Comite Editorial

Eric Campos Cantón
Ph.D. of Applied Mathematics, Instituto Potosino de Investigación
Científica y Tecnológica A.C.
San Luis Potosí, S.L.P., México

Gilberto Bejarano Gaitán
Posdoctorado en Ingeniería con énfasis en Materiales.
Docente investigador Departamento de Ingeniería Metalúrgica
y de Materiales. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Henry A. Colorado Lopera
Ph.D. en materiales, MSc en Ingeniería de materiales,
MSc. en Ciencias de los Materiales
University of California, Los Angeles, EE.UU.

Héctor Fabio Zuluaga Corrales
Ph.D. en Química. Jefe Departamento de Química,
Universidad del Valle, Cali, Colombia

José Luis Munuera Alemán
Ph.D. en Ciencias Económicas y Empresariales
Universidad de Murcia, España

José Ignacio Huertas
Ph.D. en Ciencias, Ms.C en Ingeniería Mecánica.
Director del CIMA, Instituto Tecnológico y Estudios Superiores
de Monterrey, México

Juan Muñoz Saldaña
Ph.D. Profesor Investigador, Centro de Investigación
y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional
- Cinvestav - Unidad Querétaro - México

Pedro José Arango Arango
Ph.D. en Ingeniería y Tecnología de Materiales.
Director Laboratorio de Física de Plasma, Universidad Nacional
de Colombia, Sede Manizales, Colombia

Roberto Briones Gallardo
Ph.D. en Ciencias Fisicoquímicas del Medio Ambiente,
Universidad Autónoma de San Luis Potosí – México

Ruby Mejía de Gutiérrez
Ph.D. en Ciencias Químicas, profesora titular,
Coordinadora del programa de posgrado de la Escuela
de Ingeniería de Materiales. Directora Grupo de Materiales
Compuestos, Universidad del Valle, Cali, Colombia

Revista Informador Técnico

Misión: La Revista Informador Técnico es una publicación semestral del Servicio de Aprendizaje Nacional, SENA - Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN), y publica artículos de alta calidad en las áreas de plásticos, materiales, metalmecánica, recubrimientos duros, gestión (industrial, medioambiental, tecnológica, de calidad, del conocimiento y de la innovación), bajo la autoría de funcionarios del SENA e investigadores a nivel nacional e internacional.

Visión: Ser una revista que genere interés entre los investigadores de las áreas de conocimiento de la misma, para publicar artículos con calidad científica y visibilidad en las bases de datos y repositorios de alto reconocimiento en la comunidad científica.

Evaluación de artículos: La revista cuenta con un sistema de evaluación a ciegas por parte de académicos y/o expertos investigadores en el campo de estudio de la investigación, adscritos a instituciones diferentes a las de los autores. Todos los manuscritos recibidos serán leídos previamente por los editores y si cumplen con las directrices de la revista, se asignará su evaluación a los árbitros respectivos.

Redacción de manuscritos: La Revista Informador Técnico sigue los lineamientos de Colciencias para la indexación de las publicaciones seriadas, dando preferencia a los artículos de investigación, reflexión y de revisión. Se puede consultar la **Guía abreviada para la presentación de artículos** o el documento instrucciones a los autores disponible en el sitio web http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/about/submissions#authorGuidelines

Recepción de documentos y correspondencia: Los artículos pueden ser enviados al correo electrónico: revistaitastin@sena.edu.co

Distribución de la revista: Se realiza en formato impreso en las modalidades de canje, donación, depósito legal, suscripciones gratuitas a comunidades educativas, autores, árbitros y empresarios de los sectores de la cadena productiva; la versión electrónica se encuentra disponible en la página web: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/about/submissions#onlineSubmissions y podrá ser descargada, también podrá ser solicitada mediante correo electrónico.

Financiación de la revista: La financiación de la revista es responsabilidad del SENA-Centro ASTIN, y de SENNOVA.

Suscripción: Para suscribirse descargue el formato en la página web de la revista: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/user/register

Reproducción de artículos: Se autoriza la copia de artículos para fines académicos, citando la fuente respectiva.

Acceso en línea: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec

Indexada: Pubindex (Colciencias), DOAJ (Directory of Open Journal Access), EBSCO, ProQuest, Latindex, Actualidad Iberoamericana, REBIUN (Red de Bibliotecas Universitarias Españolas), Dialnet, Perodica.

Technical Informer Journal

Mission: The technical informer Journal, semiannually published by The National learning service (SENA) National center of technical assistance to the industry (ASTIN), publishes high quality articles, authored by SENA associates and national and international researchers, in areas such as: plastics, material, metal-mechanic, hard coating, industrial management (industrial, environmental, technology, quality, knowledge and innovation).

Vision: Be a journal that will generate interest among researchers in the journal's areas of interest to publish their articles with scientific quality and visibility in large data repositories.

Article Evaluation: The journal counts with a blind evaluation system by experienced academics and / or researchers in the field of study assigned registered in different research institutions of from the author's. All manuscripts submitted will be read by the editors and if they meet the journal's guidelines, an evaluation will be assigned by the respective judges.

Manuscript drafting: The technical informer journal follows Colciencia's guidelines for indexing publications with serial, giving preference to the research, reflections and revision articles. You can check the abbreviated guide for submitting articles or the instruction document for authors, you can access the website http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/about/submissions#authorGuidelines

Document reception and mail: revistaitastin@sena.edu.co

Distribution of the journal: It is done in printed formats in the modalities of exchange, donation, legal deposit, free subscription to educational communities, authors, judges and businessmen from the production chain the sectors; virtual, via email, it can be downloaded from the website http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/about/submissions#onlineSubmissions

Financing of the journal: The funding of the journal is responsibility of SENA - ASTIN center and SENNOVA.

Subscription: To subscribe download the format from the journal's website http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/user/register

Articles reproduction: Photocopy of articles for academic purposes are authorized, citing the source.

Online access: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec

Indexed: Pubindex (Colciencias), DOAJ (Directory of open Journal Access), EBSCO, ProQuest, Latindex, Actualidad Iberoamericana, REBIUN (Red de Bibliotecas Universitarias Españolas), Dialnet, Perodica.

Guía abreviada para la presentación de los artículos

Tipos y características de los documentos

La revista es de acceso abierto y publica semestralmente en español, portugués e inglés. La convocatoria es permanente y durante todo el año se están recibiendo artículos para las dos ediciones. Los artículos remitidos deben ser originales (en español o inglés) e inéditos, es decir que no han sido publicados con anterioridad o simultáneamente en otra revista o en línea.

Evaluación de los artículos

El artículo se recibe y revisa por el comité editor; si es avalado se envía a valoración por los árbitros, quienes podrán solicitar los ajustes necesarios para su publicación o descartar el documento. El resultado de la evaluación se informa a los autores, quienes deben atender las correcciones sugeridas por los evaluadores, en un término no mayor a las dos (2) semanas siguientes a su recibo.

Artículo de Investigación científica y tecnológica (tipo 1)

Relata la manera de delimitar la pregunta de la investigación, el camino para someterla a prueba (análisis estadístico del experimento, protocolos disciplinarios) y la confrontación de los datos generados con la literatura actual. El artículo debe contener título (original e inglés), resumen, abstract, palabras claves en español e inglés, introducción, metodología, resultados, conclusiones y referencias bibliográficas.

Artículo de Reflexión (tipo 2)

Documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales y revisión. El artículo debe contener título (original e inglés), resumen, abstract, palabras claves en español e inglés, introducción, reflexión, conclusiones y referencias bibliográficas.

Artículo de Revisión (tipo 3)

Es el resultado de una investigación terminada donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo

en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica superior a 50 referencias. El artículo debe contener título (original e inglés), resumen, abstract, palabras claves en español e inglés, introducción, metodología, resultados, conclusiones y referencias bibliográficas.

Preparación y formato del documento

- El autor recibe un ejemplar de la publicación. Los autores deben indicar si su artículo es producto o desarrollo de una investigación en curso o concluida.
- Las publicaciones para autores del SENA no superarán el 30% por número.
- En una nota a pie de página se debe incluir el nombre del proyecto, las fechas en que se inició y terminó, la entidad que lo financia y la entidad que lo ejecuta.
- Los artículos pueden contener veinte (20) páginas numeradas, sin incluir fotografías, gráficos o tablas, en papel tamaño carta. Deben presentarse a doble espacio, en fuente Arial y tamaño de letra 11 puntos.
- Los párrafos se justifican sin dejar espacio entre los consecutivos y sin partir las palabras, no dejar más de un espacio entre palabras después de coma, punto y coma, dos puntos, paréntesis y punto seguido. No incluir saltos de página o finales de sección.
- Las ecuaciones se levantan en el procesador incluido en Word, en la fuente Arial a 9 puntos. Los símbolos de las constantes, variables y funciones en letras latinas básicas o griegas, incluidos en las ecuaciones y deben ir en cursiva; los símbolos matemáticos y números no van en cursiva. Se deben identificar los símbolos inmediatamente después de la ecuación.
- Las figuras deben ir nombradas, numeradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden; el título de la figura se debe escribir tipo oración y se digita como un párrafo normal fuera de la figura.

- Los números decimales se deben señalar con coma (,), y los millares y millones con un punto (.).
- Los gráficos, figuras y fotografías deben ser a color con una resolución mayor a 250 pixeles.
- Evite las notas de pie de página; en caso de ser necesarias deben contener solamente aclaraciones o complementos del trabajo que, sin afectar la continuidad del texto, aporten información adicional que el autor considere necesario incluir.

Las referencias bibliográficas se circunscriben al final del artículo ordenadas alfabéticamente y señalándolas dentro del documento. Realice las referencias bibliográficas teniendo en cuenta las Normas APA 2016 (sexta edición).

Los artículos se pueden enviar en archivo digital:

- Por correo electrónico a: revistaitastin@sena.edu.co;
- A través de la plataforma OJS http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec
- A la siguiente dirección:
Revista Informador Técnico
Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA)
Complejo Salomia
Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN)
Calle 52 No. 2 Bis -15
Cali – Colombia
Tel.: +57 (2) 431 5855 / 431 5800 ext. 22694

Abbreviate guide for submitting articles

Types and characteristics of the documents

The journal is free access and it published semiannually in Spanish, Portuguese and English, throughout the year articles are being received for both editions. The submitted articles must be original, in Spanish or English, not published previously or simultaneously on other journal or online.

Article evaluation

The article is received and reviewed by the editorial board, if its approved its sent for evaluation by the judges, who may request the necessary adjustments for it's publishing or discard the document. The result of the evaluation, its informed to the authors to attend the evaluators corrections in a period not exceeding the following 2 weeks from its reception.

Article of scientific and technological research (type 1)

It describes how to define the research question, the way to submit proof (statistical analysis of the experiment, disciplinary protocols) and confrontation of data generated with the current literature; The article should contain title (original and English), original summary , abstract , keywords in Spanish and English , introduction, methodology, results , conclusions and references.

Reflection article (type 2)

Document that presents the research results from an analytical, interpretative and critical perspective of the author, about a specific topic using original and review sources. The article should contain title (original and English), Original Summary, abstract, keywords Spanish and English, introduction, reflection, conclusions and references.

Review article (type 3)

It's the result of a completed research, where results from published or unpublished researches are analyzed, systematized, and integrated on a science or technology field in order to update the progress and development trends. Its characterized by presenting a careful bibliographic review above references. The article should contain title (original and

and English), original summary, abstract, keywords in Spanish and English, introduction, methodology, results, conclusions and references.

Preparation and format of the document

- The author receives a copy of the publication. authors must indicate if the article is product or development of an ongoing or concluded research.
- The publications for SENA authors will not exceed 30% by number.
- In a page footnote should be included the name of the project, the beginning and ending date, the financing entity and the entity that executes it.
- Items may contain 20 numbered pages, not including photographs, graphics or tables, on letter size paper. They must be double-spaced and in Arial font 11 points size.
- The paragraphs are justified without leaving space between the consecutives and without separating words, do not leave more than one space between words after comma, semicolon, colon, parentheses and period followed. Do not include page breaks or section.
- The equations arise in the processor included in word, in Arial font 9 points size. The symbols of the constants, variables and functions, basic Greek or Latin letters, included in the equations must be italicized; mathematical symbols and numbers don't go italicized. The symbols must be identified immediately following the equation.
- Figures should be named consecutively numbered and referenced in the article, in strict order, the title of the figure should be written sentence case, it is typed as a normal paragraph outside the figure.
- Decimal numbers should be noted with a comma (,) and thousands and millions with a dot (.)

- The graphs, figures and photographs should be used in colors and higher than 250 pixels in resolution.
- Avoid footnotes; in case of necessary it should contain only clarifications or additions to the work without affecting the continuity of the text, providing additional information that the author deems necessary to include.
- References are limited to the end of the article ordered alphabetically and highlighting them within the document. Make the references, taking into account the APA Standards 2016 6th edition.

Articles should be submitted in digital format:

- By email to: revistaitastin@sena.edu.co
- Using the OJS platform http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec
- By mail to the following address:
Revista Informador Técnico
Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA)
Complejo Salomia
Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN)
Calle 52 No. 2 Bis -15
Cali – Colombia
Phone: +57 (2) 4315855 / 4315800 ext. 22694

INFORMADOR TÉCNICO

Volumen 80 • Número 1 • Enero-Junio 2016 • ISSN 0122-056X • e-ISSN 2256-5035

TABLA DE CONTENIDO

EDITORIAL	8
ARTICULOS DE INVESTIGACIÓN	
Propiedades de conservación: recubrimientos a base de quitosano y <i>Aloe vera</i> aplicado en papa criolla (<i>solanum Phureja</i>)	9
<i>Preservation Properties: Chitosan-based coatings and Aloe vera applied in creole potato (Solanum Phureja)</i> Marcelo Alexander Guancha Chalapud, Carolina Caicedo, Eliana Marcela Ruiz, Maria Fernanda Valencia	
Bionanocompuestos de Quitosano Óxido de Grafeno: una alternativa novedosa para la conservación de alimentos	20
<i>Bionanocomposites: a novel alternative for food preservation</i> Carlos David Grande	
Evaluación de la degradación ambiental de bolsas plásticas biodegradables	24
<i>Assesment of the environmental degradation of biodegradable plastic bags</i> Carlos Alfredo Castellón Castro, Luis Neil Tejeda López, Lesly Patricia Tejeda	
Adherencia y biocompatibilidad <i>in vitro</i> de recubrimientos de fosfato de calcio-titanio de calcio obtenidos por magnetron sputtering para aplicaciones ortopédicas	32
<i>Adherence and in vitro biomedical properties of calcium phosphate-calcium titanate composite coatings for orthopedic applications</i> Johanna Esguerra Arce, Adriana Esguerra Arce, Yesid Aguilar Castro	
Estimación del volumen de un Biodigestor tipo balón usando redes neuronales artificiales	41
<i>Estimate of the kind-ball biodigester's volume using artificial neural networks</i> Victor Hugo Tabarquino Muñoz, Luis Octavio González Salcedo	
Diseño e implementación de un prototipo electrónico para monitoreo de parámetros físico-químicos en cultivo de tilapia a través de una aplicación móvil	49
<i>Design and implementation of an electronic prototype for monitoring of physico-chemical parameters in tilapia crop through mobile application</i> Sergio A. Dussan, Oscar Vanegas, Adrian F. Chavarro, Johan J. Molina	
Modelo de Dinámica de Sistemas para la Gestión del Emprendimiento, Fondo Emprender - SENA, Valle del Cauca	61
<i>Dynamics Model Management Systems for Entrepreneurship, Entrepreneur Fund-SENA, Valle del Cauca</i> Raúl Burbano Criollo, Elidier Gómez Sánchez, Oscar Rubiano Ovalle	
ARTICULOS DE REVISIÓN	
Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos	77
<i>Use of vegetable fibers in polymer matrix composites: a review with a view to their application in designing new products</i> Sandra Milena Velásquez Restrepo, Gabriel Jaime Peláez Arroyave, Diego Hernán Giraldo Vásquez	
Revisión sistemática de la integración de modelos de desarrollo de software dirigido por modelos y metodologías ágiles	87
<i>Systematic review about the integration of model-driven software development and agile methodologies</i> Juan José Morales Arias, César Jesus Pardo Calvache	

Editorial

Dentro del marco de fortalecimiento de los procesos de ciencia, tecnología e innovación del país, el SENA se articula y potencia actividades de investigación para la consolidación de grupos y semilleros, los cuales presentan como necesidad el reportar, divulgar y publicar los avances de sus trabajos. La revista Informador Técnico motivada con este hecho, se adopta al nuevo modelo de clasificación de revistas científicas nacionales establecido por PUBLINDEX-Colciencias para mejorar el impacto de las publicaciones. En este número se contó con la participación de los grupos del SENA, GIDEMP del ASTIN, Grupo BIOMATIC del Centro Tecnológico del Mobiliario, TecnoParque de Neiva, del Centro de Gestión Tecnológica y de varias universidades, entre las que se encuentran, a nivel nacional, la Universidad de Cartagena, la Universidad del Valle, la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Universidad Surcolombiana de Neiva, la Universidad EAFIT, la Universidad del Cauca, y a nivel internacional la Universidad Nacional de Tucumán en Argentina.

Los artículos publicados corresponden a resultados de investigación relacionados con nuevas tecnologías de empaque a partir de materiales biopoliméricos y nanocompuestos que mejoran propiedades de barrera y alto potencial de aplicación en el sector alimentario; el desarrollo de este tipo de materiales está encaminado a prolongar el tiempo de vida útil de productos agroindustriales altamente perecederos. Asimismo, se muestran investigaciones sobre el efecto de la fotodegradación por exposición ambiental en bolsas plásticas comerciales biodegradables frente a las convencionales, la evaluación de adherencia, genotoxicidad y hemólisis *in vitro* de recubrimientos de fosfato de calcio modificado obtenido mediante magnetron *sputtering* para aplicaciones ortopédicas, y el uso de redes neuronales artificiales como herramienta computacional en el diseño de sistemas de aprovechamiento de energías alternativas, con la cual se logra la estimación del volumen de un biodigestor.

Adicionalmente, la aplicación de dispositivos móviles para el monitoreo de parámetros fisicoquímicos en actividades pecuarias. Los temas mencionados previamente, confirman que la investigación en el área de la ingeniería con el desarrollo de materiales y dispositivos se transfiere para dar solución al sector agroindustrial. Por otra parte, se presenta una aplicación de modelos de dinámica de sistemas para la gestión del emprendimiento. Con los artículos de revisión, se abordan temas asociados con el uso de fibras vegetales para la aplicación en nuevos productos con materiales compuestos de matriz polimérica, y por otro lado, modelos de desarrollo de *software* basados en metodologías ágiles.

Esperamos que los aportes de este número sean de utilidad para investigadores, empresarios y profesionales en el campo de los materiales y la gestión. La revista Informador Técnico es un medio de divulgación que el SENA ha venido apoyando desde el Sistema Nacional de Bibliotecas SENA - BBS y el Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación - SENNOVA, el cual se sigue fortaleciendo para elevar su calidad científica, editorial, estabilidad y visibilidad en bases de datos internacionales. Por último, agradecemos la participación de la comunidad científica que nos apoya permanentemente desde los autores por depositar su confianza en nosotros, los pares evaluadores seleccionados para tan importante tarea de revisión editorial, y los miembros del Comité Editorial, puesto que sin sus valiosos aportes no hubiera sido posible completar esta edición.

AURA ELVIRA NARVÁEZ AGUDELO
Subdirectora ASTIN
Directora de la revista
SENA Regional Valle

Propiedades de conservación: recubrimiento a base de quitosano y *Aloe vera* aplicado en papa criolla (*Solanum phureja*)

Preservation Properties: Chitosan-based coatings and *Aloe vera* applied in creole potato (*Solanum phureja*)

Recibido: 21-04-2016 Aceptado: 31-05-2016

Marcelo Alexander Guancha Chalapud¹
Carolina Caicedo²
Eliana Marcela Ruiz³
Maria Fernanda Valencia⁴

¹ Colombiano, Ms.C., Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA. Centro Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN). Centro de Asistencia Técnica a la Industria, Grupo de Investigación GIDEMP. Correo electrónico: marceloguancha@misena.edu.co

² Colombiana, Ph.D. Colciencias, Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA. Centro de Asistencia Técnica a la Industria, Grupo de investigación GIDEMP. Correo electrónico: ccaicedo60@misena.edu.co

³ Colombiana, Tecnóloga Química, Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA. Centro de Asistencia Técnica a la Industria. Correo electrónico: emruiz31@misena.edu.co

⁴ Colombiana, Tecnóloga Química del, Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA. Centro de Asistencia Técnica a la Industria. Correo electrónico: mariafernanda@misena.edu.co

Resumen

En este trabajo se desarrollaron películas a partir de diferentes mezclas de quitosano y *Aloe vera* (80:20, 70:30 y 60:40) con el fin de evaluar las propiedades relacionadas con la tensión superficial de la película y espesor. La proporción 80:20 presentó un aspecto homogéneo, por lo cual se utilizó en la papa criolla (*Solanum phureja*) como recubrimiento. Este fue aplicado por inmersión del tubérculo y posterior secado variando la temperatura entre 40 °C a 70 °C con humedad relativa constante (H.R. 80%) durante 48 h. Se determinaron los parámetros colorimétricos CIELab, pérdida de peso y de carotenoides totales para cada tratamiento. Se utilizó un diseño aleatorizado simple para un total de 24 h por tratamiento. Cabe mencionar, que la cinética para las variables de estudio encontradas fue de orden cero, es decir, que el cambio de las propiedades depende exclusivamente del tiempo. La aplicación de recubrimiento a base de quitosano y *Aloe vera* en papa criolla permitió conservar el contenido de carotenoides totales hasta en un 70% en comparación con las muestras sin recubrimiento.

Palabras clave: recubrimientos, gel *Aloe vera*, carotenoides, polisacáridos.

Abstract

In this work, some films were developed starting from different mixtures of chitosan and *Aloe vera* (80:20, 70:30 and 60:40) in order to evaluate the properties related to the superficial tension of the layer and thickness. The ratio 80:20 presented a homogeneous appearance for which it was used in the creole potato (*Solanum phureja*) as a coating. This was applied by the dipping and subsequent drying of the tuber, varying the temperature from 40 °C

to 70 °C with constant relative humidity (80% R.H.) for 48 h. CIELab colorimetric parameters, weight loss and total carotenoids for each treatment were determined. Treatments were arranged in a simple randomized design for 24 h.

It is worth mentioning that for the kinetic study variables were found in the zero order, that is, the change of properties depends exclusively on the time. Coating application based on chitosan and *Aloe vera* in a creole potato allowed it to conserve the total carotenoid content by 70% compared to uncoated samples.

Keywords: coatings, *Aloe vera* gel, carotenoids, Polysaccharides.

Introducción

La papa es un alimento ancestral de la región Andina y de alto consumo en el mundo después del arroz, trigo y maíz (Mosquera et al., 2015; <http://faostat.fao.org>). Se estiman más de 5000 especies entre las que se encuentra la papa criolla *Solanum phureja* (Hawkes, 1990), este producto desempeña un papel importante en la seguridad alimentaria en Colombia por el alto contenido de nutrientes y potencial de exportación como producto exótico (Mendoza & Herrera, 2012). Estudios previos muestran que el tiempo de vida útil de la papa criolla en poscosecha se encuentra entre los 5 y 8 días para lograr una óptima comercialización debido a su rápida germinación (Rodríguez & Ramírez, 2011). Actualmente, se aplican diferentes procedimientos de conservación para alimentos como por ejemplo, los tratamientos por temperatura, pérdida de agua (Nourian et al., 2003), radiaciones (Kiss & Farkas, 1972), y aplicación de agentes químicos (Luna-Guzmán & Barret, 2000). Estos tratamientos ocasionan alteración en la calidad sensorial y propiedades nutricionales. En la última década se han llevado a cabo diversos estudios sobre métodos alternativos tales como recubrimientos a partir de fuentes naturales renovables y/o subproductos agroindustriales entre los que se encuentran los carbohidratos, las proteínas y los lípidos (Cutter, 2006; Campos et al., 2011; Espitia et al., 2014; Alves et al., 2010).

El quitosano es un polisacárido natural, copolímero con unidades de β -(1-4)-2-acetamido-D-glucosa y β -(1-4)-2-amino-D-glucosa, es el producto de desacetilación de la quitina [poli - β -(1-4)-N-acetyl-2-D-glucosamina], un componente importante que se encuentra en la industria procesadora de mariscos. El quitosano es reconocido por

su naturaleza catiónica, biodegradable, biocompatible, no tóxico y con propiedades antibacterianas y hemostáticas (Karlsen 1991; Younesa et al., 2014). Ha sido foco de interés para múltiples aplicaciones entre las que se encuentra la conservación de alimentos mediante el revestido de frutas y hortalizas (Kurek et al., 2014; Shen-Li, 2010; García et al., 2004). Por otro lado, los recubrimientos a base de *Aloe vera* son muy utilizados debido a que son transparentes, inodoros e insípidos. Se caracterizan por la facilidad que presentan para formar películas y brindar protección microbiana (Marpudi, 2011; Sogvar, 2016). Estos componentes han mostrado mejorar la barrera de gases, retrasando la pérdida de humedad, el proceso de pardeamiento enzimático y rancidez oxidativa en vegetales y frutas debido a la disminución en la frecuencia respiratoria. Asimismo, han logrado favorecer la firmeza de la superficie y mejorar la percepción sensorial como apariencia, textura y color (García, 2008; Khoshgozaran-Abras et al., 2012; Sánchez-González et al., 2011; Kaviani et al., 2015; Moreira et al., 2011). En la búsqueda de prolongar el tiempo de vida útil de la papa criolla se presenta este trabajo que tuvo como objetivo evaluar la variación de color, el contenido de carotenoides y la pérdida de peso en papa criolla, utilizando un recubrimiento a base de *Aloe vera* y quitosano durante su almacenamiento a diferentes temperaturas.

Metodología

Materiales

Se utilizó quitosano comercial suministrado por la empresa Polímeros Naturales S.A.S., el gel mucilaginoso utilizado fue extraído de hojas de penca de sábila (*Aloe barbadensis* Miller) provenientes de cultivos de una finca del municipio de Dagua (Valle del Cauca, Colombia), la sábila (*Aloe vera*) fue utilizada con máximo 2 días de almacenamiento después de la poscosecha, la cual se seleccionó según atributos de sanidad. Posteriormente, se lavó y desinfectó con hipoclorito de sodio a 100 ppm, pelada, licuada y estabilizada, según protocolo realizado por Kaviani y colaboradores (2015). Se utilizó glicerol, ácido acético de Sigma-Aldrich. La papa criolla (*Solanum phureja*) empleada para la evaluación presentó un diámetro aproximado de 2.5 cm (con peso ~23 g) obtenida comercialmente en el municipio de Cali, Colombia, en estado adecuado para el procesamiento o consumo en fresco. Las muestras se lavaron con agua destilada, se secaron a temperatura ambiente y se almacenaron a 4 °C.

Preparación del recubrimiento

Se prepararon soluciones de quitosano (Q) en ácido acético (1%, v/v) a 2.5% (Q1), 3% (Q2) y 3.5% (Q3) (p/v), las cuales se mezclaron con *Aloe Vera* (AV) en diferentes proporciones (Qn/AV, v/v) como se presenta en la Tabla 1. Se utilizó como plastificante glicerol al 1.0% con respecto al total de cada mezcla. Las condiciones de secado para la obtención de películas en la cámara climática se realizaron a una temperatura de 25 °C y Humedad Relativa (H.R.) 10% y 30%.

Tabla 1. Contenido de las muestras preparadas

Muestra	Concentración de quitosano	Proporción de quitosano	Proporción de Aloe vera
Q1AV-60:40	2,5%	60%	40%
Q1AV-70:30		70%	30%
Q1AV-80:20		80%	20%
Q2AV-60:40	3,0%	60%	40%
Q2AV-70:30		70%	30%
Q2AV-80:20		80%	20%
Q3AV-60:40	3,5%	60%	40%
Q3AV-70:30		70%	30%
Q3AV-80:20		80%	20%

Fuente: los autores.

Caracterización fisicoquímica

Espesor

Se utilizó un medidor de espesor análogo (Mitutoyo, ABSOLUTE), con el cual se registraron los valores promedios correspondientes al espesor en 5 puntos aleatorios de las películas.

Ángulo de Contacto

Se utilizó un proyector de perfiles ST Industries, el análisis se realizó adicionando sobre el sustrato una gota (~20 µL) de agua destilada, se capturó la imagen y con el software *image J* (Burger, 2009), se midió el ángulo en dos tiempos t_0 y t_r .

Índice de Absorción de Agua

Se pesaron ~3 g por muestra, posteriormente se adicionaron 50 mL de agua destilada y se agitó manualmente durante 5 min. Se dejó en reposo por 24 h a temperatura ambiente. El peso húmedo de las películas (gel) se registró después de secar el exceso de agua con papel filtro. Los sólidos fueron pesados y la capacidad de

hinchamiento (C.H.) se calculó utilizando la ecuación 1, (Anderson et al., 1969):

$$\% C.H. = \frac{\text{Masa húmeda} - \text{Masa seca}}{\text{Masa seca}} \times 100 \quad (1)$$

Calorimetría Diferencial de Barrido

Las propiedades térmicas se determinaron en un analizador termogravimétrico TGA/DSC 2 STAR System, *Mettler Toledo*. Las muestras (10±0.5 mg) se colocaron en crisoles de alúmina en un rango de temperatura entre 30 °C a 300 °C bajo atmósfera de nitrógeno (50 cm³/min), los análisis se realizaron según la norma ASTM D3418-12.

Adecuación y aplicación de la película

Para cada ensayo se seleccionaron lotes de 10 unidades. Posteriormente, se procedió a sumergirlas en la solución de quitosano y *Aloe vera* seleccionada teniendo en cuenta homogeneidad y tiempo de secado. El método de aplicación del recubrimiento utilizado fue el de inmersión, donde cada una de las muestras se introduce en un vaso de precipitado de 1 L que contenía 600 mL de la solución durante 10 min. Posteriormente, las muestras son llevadas a una cámara climática a 30 °C y 25% de H.R. durante 30 min para secado.

Determinación de pérdida de peso, carotenoides totales y medición del color

Para evaluar la variación de color, pérdida de peso y contenido de carotenoides totales se utilizó un diseño experimental unifactorial variando la temperatura (40, 50, 60 y 70 °C) y manteniendo la H.R. constante a 80%. Se uso una muestra control (sin recubrimiento) para cada tratamiento. Los ensayos se realizan durante 48 h, lo cual se fijó teniendo en cuenta ensayos preliminares bajo el criterio de que a las 48 h la superficie de la papa presentaba tonalidades marrones. Se tomaron muestras en intervalos de 0, 24 y 48 h para determinar cada una de las variables de respuesta. El porcentaje de pérdida de peso se determinó durante el almacenamiento por diferencia de peso para cada temperatura en el intervalo de tiempo establecido utilizando una balanza analítica. Para determinar el contenido de carotenoides totales las muestras de papa se cortan y homogenizan en un procesador de alimentos, y se pesa 0,5 g de muestra en un tubo de ensayo de vidrio de 15 mL, además se adicionan 7 mL de una mezcla 4:3 (hexano:etanol). Las muestras obtenidas se cubren con papel aluminio y se agitan durante una hora en baño

de hielo utilizando un agitador orbital. Finalmente, se adiciona 1 ml de agua destilada y se agita durante 20 min adicionales. Para las medidas de absorbancias se toma 3 ml de la fase orgánica y se mide la absorbancia utilizando como blanco hexano en un espectrofotómetro. La concentración se determinan de acuerdo a la ecuación 2 (Cuesta et al., 2013; Ordóñez-Santos et al., 2011; 2014).

$$C[\mu g/g] = \frac{A_{450nm} \text{Volumen final}(ml) 10^4}{2560 \text{peso muestra}(g)} \quad (2)$$

Donde, C es la concentración de carotenoides, A_{450nm} absorbancia a una longitud de onda de 450 nm, 2560 coeficiente de extinción molar de β -caroteno en hexano.

A las muestras con y sin recubrimiento se les determinó el color superficial utilizando un colorímetro Minolta CR-400 (D65, 2°, Y=89,5; x=0,3176; y=0,3347). Los datos se recolectaron en el espacio de color CIELab y los valores de L (brillantez), a (oscilaron entre rojo y verde) y b (oscilaron entre amarillo y azul) se registraron durante cada ensayo por triplicado. Además, se estimó la intensidad de color $C=[(a^2+b^2)]^{0.5}$ y el ángulo de tonalidad $h^\circ = \tan^{-1}(b/a)$ (Ordóñez-Santos et al., 2014).

Modelamiento cinético

La variación del color, pérdida de peso y contenido de carotenoides en los alimentos con el tiempo responde a modelos cinéticos. Por lo tanto, las anteriores variables de respuesta se pueden modelar de acuerdo a la ecuación 3 (Román et al., 2013; Ghidouche et al., 2013):

$$-\frac{dC}{dt} = kC^n \quad (3)$$

Donde, C es la variable de respuesta (Color CIELab, carotenoides totales y pérdida de peso), t es el tiempo, k es la constante de velocidad y n el orden de la reacción. El modelo se determina de acuerdo al valor del coeficiente de correlación (R^2) más alto para un orden de reacción determinado.

El efecto de la temperatura se evalúa de acuerdo a la ecuación de Arrhenius, la cual relaciona la variación del color con la temperatura.

$$k = Ae^{-Ea/RT} \quad (4)$$

Donde, A es la constante de Arrhenius, E_a es la energía de activación, R la constante universal de los gases ideales (1,981 cal/mol.K), y T la temperatura absoluta.

$$-\frac{dC}{dt} = kC^n = Ae^{-Ea/RT} \quad (5)$$

Resultados y discusión

Medición del espesor de las películas, ángulo de contacto y capacidad de hinchamiento

El espesor de los recubrimientos es un parámetro que se encuentra estandarizado para mediciones de ensayos mecánicos, según ASTM D882 (≤ 0.25 mm). Las propiedades biológicas y la durabilidad de la vida útil del producto a recubrir se ven dramáticamente alteradas por este parámetro. Los valores encontrados en las mezclas previamente preparadas se observan en las Figura 1 y 2.

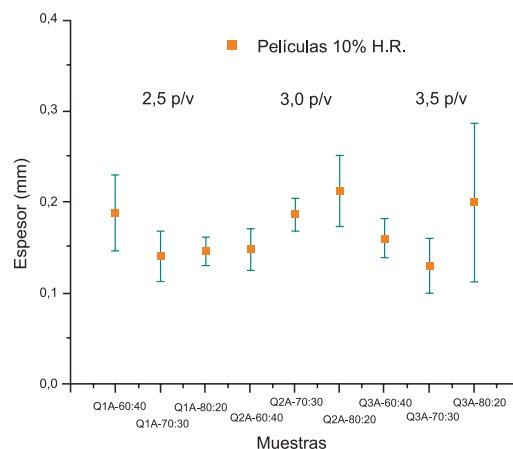


Figura 1. Espesor de películas con humedad relativa al 10%
Fuente: los autores.

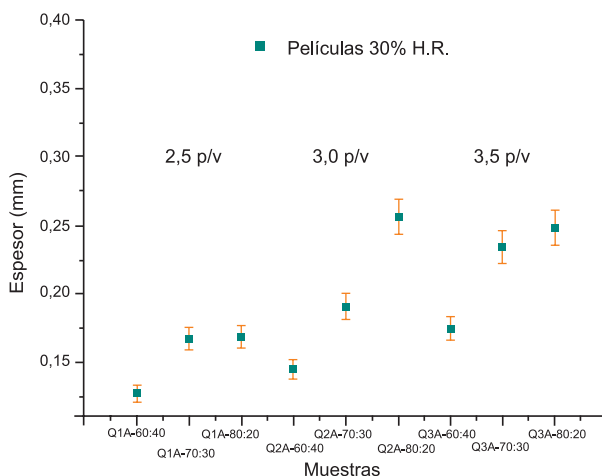


Figura 2. Espesor de películas con humedad relativa al 30%
Fuente: los autores.

Los resultados del espesor fueron obtenidos en condiciones extremas de humedad relativa (10% y 30%) con el fin de favorecer tiempos cortos de secado para el desarrollo de las películas. Los valores promedio del espesor de películas evaluadas al 10% de H.R. no presentaron una tendencia clara entre las diferentes proporciones, además de una desviación alta que generó dificultad en el análisis. Lo anterior, debido a una aceleración en el intercambio dinámico de humedad entre el ambiente y la muestra, mientras que las películas evaluadas a 30% de H.R. mostraron una relación entre el contenido de quitosano y espesor directamente proporcional.

Por otro lado, en la determinación de hidrofiliidad de las muestras se obtuvo el valor del ángulo de contacto (θ) asociado a la interacción de la gota sésil expuesta sobre la superficie de la película. En el registro de datos se consideró un tiempo inmediatamente tras la formación de la gota (inicial, t_0), y otro tiempo después de transcurrir 60 s (final, t_f) como se reporta en la Tabla 2.

Tabla 2. Comparación del ángulo de contacto medio entre las diferentes mezclas

Muestra	θ ($^\circ$, t_0)	σ	θ ($^\circ$, t_f)	σ
Q1AV-60:40	59,40	$\pm 1,18$	59,25	$\pm 1,76$
Q1AV-70:30	59,22	$\pm 1,21$	59,15	$\pm 1,21$
Q1AV-80:20	61,42	$\pm 1,12$	61,15	$\pm 1,39$
Q2AV-60:40	59,31	$\pm 1,52$	58,80	$\pm 1,32$
Q2AV-70:30	58,21	$\pm 1,23$	58,33	$\pm 1,30$
Q2AV-80:20	59,30	$\pm 1,18$	58,13	$\pm 1,32$
Q3AV-60:40	57,27	$\pm 1,42$	57,11	$\pm 1,11$
Q3AV-70:30	N.A	--	N.A	--
Q3AV-80:20	N.A	--	N.A	--

σ : Desviación estándar

Fuente: los autores.

Los resultados mostraron una variación poco significativa en los valores del ángulo de contacto para las diferentes mezclas con Q1, debido a la reorganización en la superficie de los grupos hidrofílicos e hidrofóbicos (Silva et al., 2013), esta interacción favoreció la mezcla entre los componentes: quitosano, *Aloe vera* y glicerol. Para el caso de las mezclas Q3, la muestra no permite calcular el ángulo de contacto debido a que el agua modifica los puntos de medición en la superficie de la película.

Asimismo, los valores obtenidos en la determinación de la capacidad de hinchamiento logran ampliar la información sobre la interacción entre *Aloe vera* y quitosano

de la mezcla que resulta en el aumento de hidrofiliidad dependiente de la concentración de quitosano (Ver Figura 3).

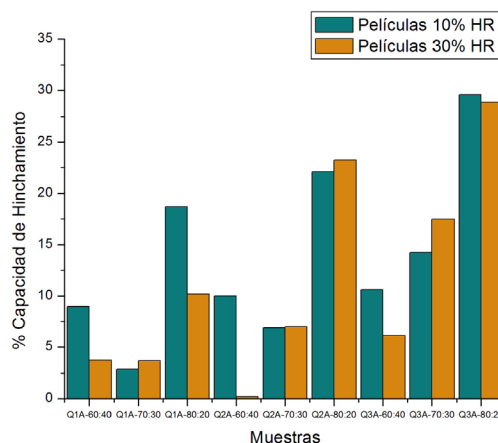


Figura 3. Capacidad de hinchamiento en porcentaje de las diferentes concentraciones de la película

Fuente: los autores.

Cabe mencionar, que los resultados asociados a espesor, ángulo de contacto y capacidad de hinchamiento como indicador para este proyecto de homogeneidad permitieron seleccionar la concentración ideal de quitosano en la solución. Las muestras con Q1 y Q3 presentan valores dispersos asociados a pérdidas prematuras de la humedad y formación de grumos, respectivamente.

Propiedades térmicas de las películas

El resultado térmico asociado al análisis de calorimetría diferencial de barrido para las películas Q2 con 2,5% p/v de quitosano presenta transiciones de fase relacionadas al punto de fusión, las cuales disminuyen en 4,5% con la incorporación del gel como se observa en la Figura 4.

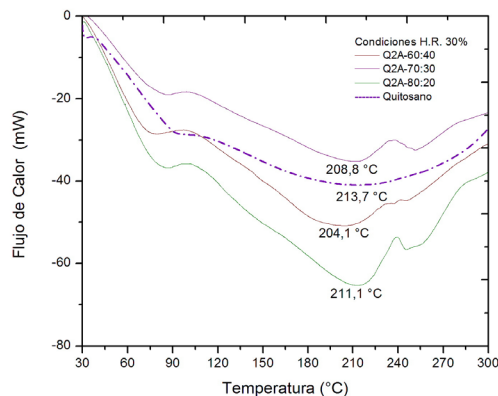


Figura 4. Termograma por calorimetría diferencial de barrido (DSC) de las películas Q2A

Fuente: los autores.

Modelamiento cinético

Para determinar el modelo cinético de cada una de las variables de respuesta, se evaluaron modelos de cero, primero y segundo orden. Los resultados muestran que el modelo de orden cero es el que mejor se ajusta a los datos

debido a que se presenta los coeficientes de regresión más altos, los resultados se muestran en la Tabla 3. Los parámetros de la ecuación de Arrhenius de los parámetros colorimétricos, carotenoides totales y pérdida de peso se muestran en la Tabla 4.

Tabla 3. Parámetros cinéticos para modelo de orden cero en papa criolla

Variable de respuesta	Parámetros lineación	40 °C		50 °C		60 °C		70 °C	
		SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR
Carotenoides	K	0,020	0,014	0,025	0,010	0,018	0,011	0,013	0,005
	[μg/g.min]								
	R ²	0,859	0,987	0,836	0,979	0,984	0,865	0,974	0,855
Pérdida	K[min^{-1}]	0,417	0,381	0,819	0,545	1,482	1,133	1,142	0,857
Peso	R ²	0,987	0,990	0,916	0,964	0,985	0,989	0,923	0,910
L	K	0,505	0,217	0,563	0,285	0,607	0,408	0,542	0,425
	R ²	0,941	1,000	0,907	0,683	0,914	0,818	0,819	0,695
a*	K	0,074	0,056	0,056	0,046	0,030	0,010	0,038	0,027
	R ²	0,968	0,959	0,983	1,000	0,719	0,349	0,707	0,939
b*	K	0,384	0,247	0,601	0,322	0,564	0,529	NR	0,041
	R ²	0,998	0,885	0,895	0,874	0,911	0,836	NR	0,805
c*	K	0,285	0,219	0,552	0,294	0,455	0,478	0,458	0,443
	R ²	0,998	0,821	0,911	0,893	0,885	0,831	0,746	0,651
h°	K	0,729	0,729	1,016	0,317	1,172	0,592	NR	0,141
	R ²	0,984	0,999	0,994	0,969	0,999	0,904	NR	0,497

SR: Muestras sin recubrimiento, CR: Muestras con recubrimiento

Fuente: los autores.

Tabla 4. Parámetros para la ecuación de Arrhenius

Trat.	Carotenoides [μg/g]			Pérdida peso [%]			L			a			b		
	Ea			Ea			Ea			Ea			Ea		
	K	[kcal/mol]	R ²	K	[kcal/mol]	R ²	K	[kcal/mol]	R ²	K	[kcal/mol]	R ²	K	[kcal/mol]	R ²
SR	1738,76	3,45	0,54	3943,52	7,84	0,75	317,77	0,63	0,25	2809,70	5,58	0,73	2037,07	4,05	0,65
CR	3328,29	6,61	0,69	0,96	5,38	0,96	-2706,10	5,38	0,96	4094,93	8,14	0,41	5055,55	10,05	0,30

Fuente: los autores.

De acuerdo a los resultados de los parámetros cinéticos en papa criolla, el coeficiente de correlación (R^2) para la mayoría de tratamientos se encuentra por encima de 0,90, por lo tanto, el modelo de orden cero describe el comportamiento cinético para cada una de las variables estudiadas en este trabajo. Aunque en la literatura no se reportan datos del comportamiento cinético en papa criolla fresca, los resultados pueden ser comparables con los reportados por Nourian y colaboradores (2003) quienes

reportan parámetros cinéticos para papa variedad *Solanum commersonii*. Los valores de k para el parámetro L oscilan entre 0,0295 y 0,197 y para b^* entre 0,0227 y 0,0910 para temperaturas entre 4 y 20 °C, la energía de activación oscila entre 12 y 15 kcal/mol. Los mencionados autores hacen énfasis en los parámetros colorimétricos L y b^* dado que L está relacionado con la luminosidad; una pérdida de brillo indica una disminución del parámetro b^* , debido a actividad enzimática de la peroxidasa presente en la, papa

la cual incrementa la velocidad de degradación del color (Mendoza & Herrera, 2012). El efecto sobre la disminución de L y b* es mayor por el incremento de la temperatura, además valores altos de k indican mayor velocidad de degradación del color. Como se puede observar en la Tabla 4, los valores de k para las muestras de papa con recubrimiento siempre fueron menores a los valores de k de las muestras con recubrimiento. Se puede afirmar entonces,

que la adición de recubrimiento en papa criolla disminuye la velocidad de degradación del color, la pérdida de peso y la pérdida de carotenoides totales.

En la Figura 5 se muestra los gráficos de la cinética de pérdida de peso en función del tiempo (a) y el proceso de linealización para la ecuación de Arrhenius para el parámetro L (b).

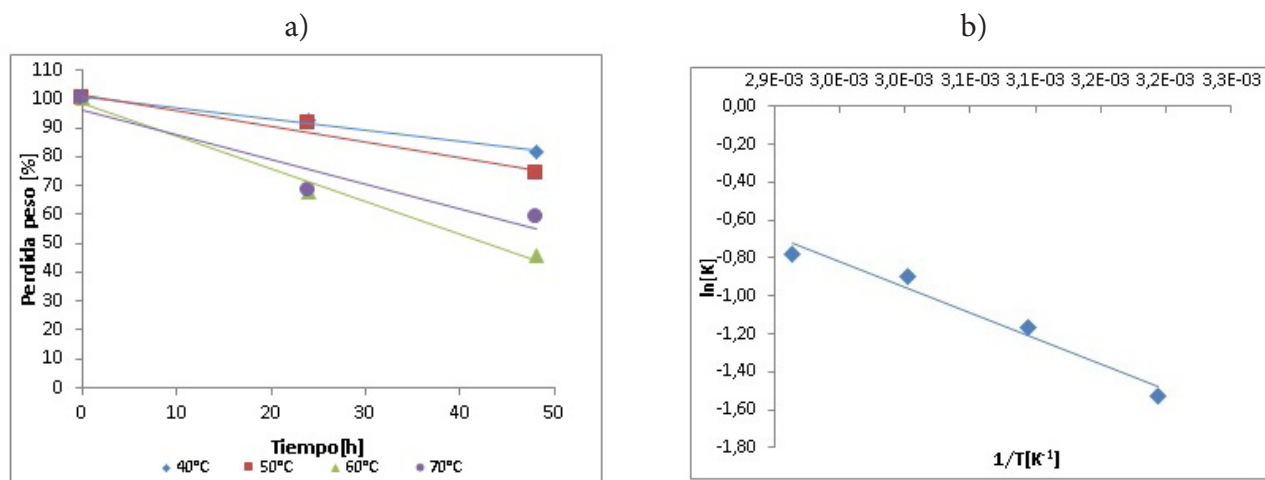


Figura 5. Resultados del modelamiento cinético para la variable pérdida de peso en papa criolla. (a) Cinética de pérdida de peso (b) Ecuación de Arrhenius para el parámetro L

Fuente: los autores.

En las Tablas 5 y 6 se muestran los resultados de medios de las variables de respuesta evaluadas (L, a, b, c, h°, pérdida de peso [%] y carotenoides totales) para ensayos realizados a la temperatura inferior (40 °C) y temperatura superior (70 °C), cada tratamiento se realizó por triplicado. Se efectuó análisis de ANOVA con un nivel de significancia del $p < 0,005$.

Los valores colorimétricos obtenidos para papa criolla antes de someterse a tratamiento en cámara climática (tiempo cero) son cercanos a los reportados por Urrutia y Wilmer (2010): L (60,99), a* (9,60) y b* (39,24). Asimismo, los valores de contenido de carotenoides son cercanos a los reportados por Bianeth-Peña y Restrepo (2013), cuyo rango se encuentra entre 0,97 y 2,92 $\mu\text{g/g}$ de peso fresco que corresponde a variedades de papa criolla con bajas concentraciones de zeaxantina, luteína y violaxantina, y concentraciones relativamente altas de β -caroteno (0,27 $\mu\text{g/g}$ peso fresco).

Aunque las diferencias no son estadísticamente significativas se observa que los parámetros colorimétricos (L, a*, b*, c, h°) disminuyeron con el incremento del tiempo y con la temperatura de tratamiento. El efecto es

más marcado para el parámetro b*, ya que presentó mayor grado de disminución a temperaturas con respecto a los otros, debido a los tonalidades de pardeamiento que se desarrollaron en la superficie de la muestra durante los tratamientos. Esta tendencia es mayor para muestras sin recubrimiento donde el parámetro b* toma valores negativos a temperaturas de 60 y 70 °C. Los resultados colorimétricos contrastan con los resultados del contenido de carotenoides totales cuyos valores son más altos para tiempos de 24 y 48 h para cada una de las temperaturas de estudio. Para muestras con recubrimiento la concentración de carotenoides totales se mantiene entre 45 y 70% con respecto al valor inicial, mientras que para la muestra sin recubrimiento el contenido final se encuentra entre el 10 y 15% con respecto al valor inicial. Además, los valores más altos de carotenoides totales para cada uno de los tratamientos (luego de las 24 h) son mayores a temperaturas de 40 y 50 °C y menores para tratamientos a 60 y 70 °C. Lo anterior, demuestra el efecto positivo de la aplicación del recubrimiento sobre la preservación del color en muestras de papa criolla.

Tabla 5. Resultados del color superficial en papa criolla

Temp. [°C]	Trat	Tiempo (h)	L	a*	b*	C	h°
40	SR	0,0	63,43±0,82 ^a	10,55±0,40 ^{abc}	27,48±1,14 ^{abcde}	28,37±1,02 ^{bc}	69,00±1,31 ^{abc}
	SR	24,0	46,05±10,51 ^{cde}	9,34±1,12 ^{abcde}	17,60±12,26 ^{defgh}	21,03±10,94 ^{cdefg}	62,05±17,08 ^{abcd}
	SR	48,0	39,17±9,58	7,01±1,72 ^{cdefg}	9,07±13,44 ^{fghi}	14,67±10,74 ^{efgh}	52,30±32,66 ^{abcd}
70	SR	0,0	61,43±2,69 ^a	7,42±0,68 ^{cdefg}	26,71±2,44 ^{abcde}	27,72±2,53 ^{bcd}	74,47±0,08 ^{ab}
	SR	24,0	37,84±1,68 ^e	5,48±0,16 ^g	0,62±1,50 ⁱ	5,65±0,11 ^h	6,49±15,37 ^{ef}
	SR	48,0	35,43±1,09 ^e	5,58±0,44 ^{fg}	0,07±1,66 ⁱ	5,75±0,35 ^h	0,75±17,15 ^f
40	CR	0,0	60,61±6,12 ^{ab}	12,33±3,02 ^a	41,60±5,18 ^a	42,68±4,08 ^a	73,49±7,92 ^{ab}
	CR	24,0	55,53±0,49 ^{abc}	9,51±0,43 ^{abcde}	31,96±0,75 ^{abcd}	33,19±0,82 ^{abc}	73,43±0,36 ^{ab}
	CR	48,0	50,19±1,60 ^{abcd}	8,17±0,49 ^{bcdefg}	29,73±2,36 ^{abcd}	32,18±2,34 ^{abc}	74,63±1,01 ^{ab}
70	CR	0,0	62,42±1,06 ^a	5,91±0,34 ^{efg}	3,43±0,81 ^{hi}	31,27±0,83 ^{abc}	30,13±0,55 ^{bcdef}
	CR	24,0	42,01±2,06 ^{de}	6,84±0,82 ^{defg}	3,58±2,48 ^{hi}	7,18±1,05	27,61±20,12 ^{cdef}
	CR	48,0	40,50±7,37 ^e	7,20±3,04 ^{cdefg}	5,41±8,72 ^{ghi}	10,02±6,98 ^{fgh}	36,92±14,19 ^{abcdef}

Fuente: los autores.

Tabla 6. Resultados de la pérdida de peso y carotenoides totales para papa criolla

Temp. [°C]	Trat.	Pérdida de peso [%]	Carotenoides [µg/g]
40	SR	100,00±0,00 ^a	1,30±0,02 ^{abc}
	SR	88,02±4,24 ^{abc}	0,49±0,02 ^{fghij}
	SR	79,98±3,80 ^{bcd}	0,35±0,02 ^{hij}
70	SR	100,00±0,00 ^a	0,75±0,14 ^{defg}
	SR	58,85±6,69 ^{gh}	0,36±0,08 ^{hij}
	SR	45,17±10,73 ^{hi}	0,14±0,02 ⁱ
40	CR	100,00±0,00 ^a	1,30±0,02 ^{ab}
	CR	92,44±1,87 ^{ab}	0,80±0,01 ^{defg}
	CR	81,69±6,02 ^{bcd}	0,64±0,01 ^{defgh}
70	CR	100,00±0,00 ^a	0,75±0,14 ^{defgh}
	CR	68,22±8,56 ^{def}	0,56±0,29 ^{efghi}
	CR	58,87±8,33 ^{gh}	0,53±0,27 ^{efghij}

Dentro de una columna los valores con diferente letra representa diferencias significativas (Tukey, p <0,05). Medias ±desviación estándar. SR: sin recubrimiento, CR: con recubrimiento

Fuente: los autores.

A pesar de que la disminución en el contenido de carotenoides y el porcentaje de pérdida de peso es menor en comparación con las muestras sin recubrimiento, hay una notable pérdida en la firmeza por el efecto de la aplicación del recubrimiento. La firmeza, aunque no fue una medida de este trabajo, se pudo observar cualitativamente, y era notorio a diferencia de las muestras sin recubrimiento. Según Rojas-Grau y colaboradores (2009), uno de los inconvenientes en la utilización de los recubrimientos sobre matrices alimentarias es el espesor, ya que restringe el intercambio gaseoso durante la respiración

del tejido, causando acumulación de gases de desecho que traen como efecto la muerte de los tejidos internos del alimento. Por otro lado, según lo reportado por Nourian y colaboradores (2003), el incremento en la temperatura conlleva a cambios de textura, debido a la aceleración en los cambios fisicoquímicos que se desarrollan en el interior de la matriz alimentaria, como gelatinización del almidón, degradación de la pectina, la ruptura de la pared celular. Según los mencionados autores, la temperatura de almacenamiento tiene un efecto considerable sobre la conversión de almidón y pectina a azúcares reductores, lo

cual afecta la textura y un aceleramiento en la degradación del color. Además, reportan que para temperaturas de almacenamiento entre 16 a 20 °C la variedad de papa se degradó o resultó inaceptable a los 35 días, mientras que a temperaturas de almacenamiento entre 4 y 8 °C el producto se mantiene aceptable hasta por 130 días. Por lo tanto, para confirmar el efecto de la temperatura sobre la firmeza

y la degradación del color, se realizó un ensayo control (con y sin recubrimiento) a condiciones de laboratorio (27 °C y 70% de humedad relativa aproximadamente), y se evaluó los parámetros colorimétricos, pérdida de peso y carotenoides totales cada 120 h durante 360 h que duró el ensayo. Los resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados color superficial, pérdida masa y carotenoides totales para papa criolla a condiciones ambientales

	Tiempo (h)	L	a*	b*	C	h°	Pérdida de peso [%]	Carotenoides [µg/g]
SR	0	66,73±0,83	8,32±1,98	33,94±5,96	35,24±5,21	75,06±5,99	100,00±0,00	1,445±0,740
	120	61,02±4,10	8,84±1,48	35,03±4,30	36,19±3,75	75,84±4,22	98,07±1,43	0,836±0,118
	240	54,61±7,48	9,06±1,86	21,43±9,32	23,28±8,36	68,78±10,67	84,24±4,10	0,797±0,070
	360	52,23±10,69	10,51±0,85	19,31±11,12	22,79±8,39	61,45±22,39	61,32±5,11	0,461±0,129
CR	0	65,10±0,80	10,70±0,86	37,45±2,25	25,80±2,36	77,39±0,45	100,00±0,00	1,445±0,543
	120	62,33±5,60	10,13±0,65	37,08±2,80	26,47±2,39	76,17±0,95	97,88±0,91	1,250±0,036
	240	57,87±6,02	9,13±0,60	23,34±7,41	38,02±2,80	65,37±7,72	91,91±6,64	1,070±0,329
	360	55,89±2,18	8,38±0,35	24,43±2,65	38,54±6,75	67,48±2,74	81,57±1,49	0,953±0,218

Medias ±desviación estándar.

Fuente: los autores.

De acuerdo a los resultados de la Tabla 7, los parámetros colorimétricos son similares para las muestras con y sin recubrimiento. Sin embargo, el contenido de carotenoides totales final del ensayo se mantiene hasta en un 66% para muestras con recubrimiento, mientras que las muestras sin recubrimiento el contenido final se mantiene en 32% con referencia al contenido inicial. Además, cualitativamente la textura del control con recubrimiento se afecta en mayor grado en comparación de la muestras sin recubrimiento por lo que se puede afirmar que hay un efecto significativo en la modificación de la tasa de respiración, debido al espesor del recubrimiento sobre la superficie de la papa criolla. Sin embargo, en las muestras con recubrimiento no se desarrolla pardeamiento superficial y se inhibe el crecimiento de brotes.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en la caracterización de las películas sugieren la incorporación de un 20% del gel *Aloe vera* en mezclas de quitosano al 2.5% p/v, debido a que presenta una aceptable homogeneidad. La cinética de pérdida de color en papa criolla puede ser modelada a través de una cinética de orden cero y la ecuación de Arrhenius en un rango de temperatura entre 40 y 70 °C. Por otra parte, la aplicación de recubrimiento a base de quitosano y *Aloe*

vera en papa criolla permite conservar el contenido de carotenoides totales hasta en un 70% en comparación con las muestras sin recubrimiento. Sin embargo, es importante evaluar mezclas de *Aloe vera* y quitosano que permitan mejorar el intercambio de gases entre la matriz alimenticia y su entorno. Además, es importante evaluar el efecto del recubrimiento a temperaturas de almacenamiento de anaquel (temperaturas menores de 10 °C), ya que a temperaturas altas los procesos bioquímicos del alimento pueden influir en los resultados de las variables que se están evaluando.

Agradecimientos

Este trabajo se desarrolló gracias al apoyo del Centro Astin-SENA, al Grupo de Investigación en Desarrollo de Materiales y Productos (GIDEMP), y a los aprendices de la Tecnología en química aplicada a la industria y análisis de muestras químicas. Asimismo, al Departamento de Biotecnología del Tecnoparque Nodo Cali. C. C. agradece el soporte económico del contrato de financiamiento de recuperación contingente No. FP44842- 259-2015, COLCIENCIAS-SENA.

Bibliografía

- Alves, V. D., Costa, N., & Coelho, I. M. (2010). Barrier properties of biodegradable composite films based on kappa-carrageenan/pectin blends and mica flakes. *Carbohydrate Polymers*, 79(2), 269-276.
- Anderson, R., Conway, H.F., Pheiser, V.F. y Griffin, E.L. 1969. Gelatinisation of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Science Today*, 14: 4-12.
- Baldizón, C. G., Córdoba, M. E. M., & Valle, G. C. (2012). Evaluación de la vida útil de una pasta de tomate mediante pruebas aceleradas por temperatura. *Ingeniería*, 21(2), 31-38.
- Bianeth Peña, C., & Restrepo, L. P. (2013). Compuestos fenólicos y carotenoides en la papa: revisión. *Actual. nutr*, 14(1), 25-32.
- Burger, W., Burge, M. J., Burge, M. J., & Burge, M. J. (2009). *Principles of Digital Image Processing* (p. 221). London: Springer.
- Campos, C. A., Gerschenson, L. N., & Flores, S. K. (2011). Development of edible films and coatings with antimicrobial activity. *Food and Bioprocess Technology*, 4(6), 849-875.
- Cuesta, L., Cuví, M. J. A., Guerrero, C. M., & Concellón, A. (2013). Contenido de compuestos antioxidantes en tres estados de maduración de tomate de árbol (*Solanum betaceum* Cav.) cultivado a diferentes alturas (msnm). *Enfoque UTE*, 4(1), pp-32.
- Cutter, C. N. (2006). Opportunities for bio-based packaging technologies to improve the quality and safety of fresh and further processed muscle foods. *Meat science*, 74(1), 131-142.
- Espitia, P. J. P., Du, W. X., de Jesús Avena-Bustillos, R., Soares, N. D. F. F., & McHugh, T. H. (2014). Edible films from pectin: Physical-mechanical and antimicrobial properties-A review. *Food Hydrocolloids*, 35, 287-296.
- García, M. A., Díaz, R., Puerta, F., Beldarraín, T., Castillo, A., González, J., & Duarte, C. (2008). Envasado activo de embutidos. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 18(2), 1-7.
- García, M. A., Pinotti, A., Martino, M. N., & Zaritzky, N. E. (2004). Characterization of composite hydrocolloid films. *Carbohydrate Polymers*, 56(3), 339-345.
- Ghidouche, S., Rey, B., Michel, M., & Galaffu, N. (2013). A rapid tool for the stability assessment of natural food colours. *Food chemistry*, 139(1), 978-985.
- Hawkes, J. G. (1990). *The potato: evolution, biodiversity and genetic resources*. Belhaven Press.
- Karlsen, J., & Skaugrud, O. (1991). Excipient properties of chitosan. *Manufacturing chemist*, 62(6), 18-19.
- Kaviani, M., Shariati M.A., Josevska, E., Tomovska, J., Vanaei, M. (2015). Effects of Chitosan and Aloe Vera Gel Coating on Quality Characters of Pistachio. *J Nutr Health Food Eng* 2(1): 00042.
- Khoshgozaran-Abras, S., Azizi, M. H., Hamidy, Z., & Bagheripoor-Fallah, N. (2012). Mechanical, physicochemical and color properties of chitosan based-films as a function of Aloe vera gel incorporation. *Carbohydrate Polymers*, 87(3), 2058-2062.
- Kiss, I., & Farkas, J. (1972). Radiation preservation of fruit juices in combination with freeze-concentration. *The International journal of applied radiation and isotopes*, 23(4), 161-171.
- Kurek, M., Galus, S., & Debeaufort, F. (2014). Surface, mechanical and barrier properties of bio-based composite films based on chitosan and whey protein. *Food Packaging and Shelf Life*, 1(1), 56-67.
- Luna-Guzmán, I., & Barrett, D. M. (2000). Comparison of calcium chloride and calcium lactate effectiveness in maintaining shelf stability and quality of fresh-cut cantaloupes. *Postharvest Biology and Technology*, 19(1), 61-72.
- Marpudi, S. L., Abirami, L. S. S., Pushkala, R., & Srividya, N. (2011). Enhancement of storage life and quality maintenance of papaya

- fruits using Aloe vera based antimicrobial coating. *Indian Journal of Biotechnology*, 10(1), 83-89.
- Mendoza, R., & Herrera, A. O. (2012). Cinética de inactivación de la enzima peroxidasa, color y textura en papa criolla (*Solanum tuberosum* Grupo phureja) sometida a tres condiciones de escaldado. *Información tecnológica*, 23(4), 73-82.
- Moreira, M. D. R., Pereda, M., Marcovich, N. E., & Roura, S. I. (2011). Antimicrobial effectiveness of bioactive packaging materials from edible chitosan and casein polymers: assessment on carrot, cheese, and salami. *Journal of Food Science*, 76(1), M54-M63.
- Mosquera, T., Cuéllar, D., Álvarez, M., Angarita, M., Delgado, M., & Juyó, D. (2013). *Genética de la papa frente a la gota*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Nourian, F., Ramaswamy, H. S., & Kushalappa, A. C. (2003). Kinetics of quality change associated with potatoes stored at different temperatures. *LWT-Food Science and Technology*, 36(1), 49-65.
- Ordoñez-Santos, L. E., Aguilar, P. H., Solarte, O. D. R., & Jaramillo, M. E. A. (2014). Concentración de carotenoides totales en residuos de frutas tropicales. *Producción+ Limpia*, 9(1), 91-98.
- Ordóñez-Santos, L. E., Martínez-Álvarez, G. M., & Vázquez-Riascos, A. M. (2014). Effect of processing on the physicochemical and sensory properties of mammee apple (*Mammea americana* L.) fruit. *Agrociencia (Montecillo)*, 48(4), 377-385.
- Ordóñez-Santos, L. E., Vázquez-Odériz, M. L., & Romero-Rodríguez, M. (2011). Micronutrient contents in organic and conventional tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.). *International Journal of Food Science & Technology*, 46(8), 1561-1568.
- Rodríguez, D. R., & Ramírez, L. N. (2011). La agroindustria de la papa criolla en Colombia. Situación actual y retos para su desarrollo. *Gestión & Sociedad*, 4(2), 17-30.
- Román, M. O., Valencia, F. E., & Rodríguez, M. C. (2013). Cinética del color durante el almacenamiento de caramelos blandos de uchuva adicionados de calcio y sin sacarosa. *Revista Lasallista de Investigación*, 9(2).
- Rojas-Graü, M. A., Soliva-Fortuny, R., & Martín-Belloso, O. (2009). Edible coatings to incorporate active ingredients to fresh-cut fruits: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 20(10), 438-447.
- Sánchez-González, L., Cháfer, M., Hernández, M., Chiralt, A., & González-Martínez, C. (2011). Antimicrobial activity of polysaccharide films containing essential oils. *Food Control*, 22(8), 1302-1310.
- Shen, X. L., Wu, J. M., Chen, Y., & Zhao, G. (2010). Antimicrobial and physical properties of sweet potato starch films incorporated with potassium sorbate or chitosan. *Food Hydrocolloids*, 24(4), 285-290.
- Sogvar, O. B., Saba, M. K., & Emamifar, A. (2016). Aloe vera and ascorbic acid coatings maintain postharvest quality and reduce microbial load of strawberry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 114, 29-35.
- Silva, S. S., Popa, E. G., Gomes, M. E., Cerqueira, M., Marques, A. P., Caridade, S. G., & Reis, R. L. (2013). An investigation of the potential application of chitosan/Aloe-based membranes for regenerative medicine. *Acta biomaterialia*, 9(6), 6790-6797.
- Urrutia, O., & Wilmer, J. (2010). Operaciones de acondicionamiento y tratamientos de mejora de la calidad en papa amarilla (*Solanum phureja*) mínimamente procesada. *Ciencia Y Tecnología Alimentaria*, (2), 44-48.
- Younesa, I.; Hajji, S.; Frachet, V.; Rinaudo, M.; Jellouli, K.; Nasri, M. (2014). Chitin extraction from shrimp shell using enzymatic treatment. Antitumor, antioxidant and antimicrobial activities of chitosan. *International Journal of Biological Macromolecules*, 69, 489-498.

Bionanocompuestos de quitosano-óxido de grafeno: una alternativa novedosa para la conservación de alimentos

Bionanocomposites: a novel alternative for food preservation

Recibido: 28- 12 - 2015 Aceptado: 30-05-2016

Carlos David Grande T.¹

¹ Colombiano, Programa de Ingeniería Agroindustrial, Universidad de San Buenaventura, Cali, Colombia. Correo electrónico: cdgrantovar@usbcali.edu.co

Resumen

Los bionanocompuestos son una alternativa emergente de una nueva era de materiales con excelentes propiedades mecánicas, térmicas, de permeabilidad a gases y a la humedad, pero sobre todo, biodegradables y biocompatibles. En la presente investigación se estudió la síntesis de empaques a partir de nanocompuestos de óxido de grafeno-quitosano (CF-GO) y su potencial aplicación en la industria de empaques de alimentos. Los nanocompuestos se prepararon por una reacción térmica de entrecruzamiento entre el quitosano y el óxido de grafeno a 120°C. Las propiedades mecánicas de las láminas obtenidas se estudiaron, de donde se pudo observar que la resistencia mecánica se incrementó desde $22,7 \pm 1,2$ hasta $6471,6 \pm 1775,5$ MPa cuando se adicionó 0.1% de GO a las láminas. De igual forma, el incremento en la estabilidad de los empaques se evidenció con el aumento en la estabilidad térmica, evidenciada en el aumento gradual de la temperatura de transición vítrea (Tg) con el aumento de GO. Por último, las propiedades antimicrobianas de las láminas fueron evaluadas contra *E. coli* K-12 MG 1655 (Gram-negativa) y *B. subtilis* 102 (Gram-positiva). La lámina CF-GO con 0,6% presentó la mayor inhibición contra *E. coli* y *B. subtilis*, con 22,86% y 54,93% de inhibición, respectivamente. De esta manera, la incorporación de GO dentro de las láminas aumentó significativamente la estabilidad térmica y mecánica y adicionó propiedades antimicrobianas, lo cual hace que la aplicación de estas láminas en la conservación de alimentos tenga gran proyección en la industria alimentaria.

Palabras clave: nanocompuestos, permeabilidad de gases, propiedades antimicrobianas.

Abstract

The bionanocomposites are an emerging alternative to a new era of materials with excellent mechanical properties, thermal, gas permeability and moisture, but above all, biodegradable and bio compatible. In this research, packaging synthesis was studied from graphene chitosan (CF-GO) oxide nanocomposites and its potential application in the food packaging industry. Nanocomposites were prepared by a thermal cross linking reaction between chitosan and graphene oxide at 120 ° C. The mechanical properties of the films obtained were studied, where it was observed that the mechanical strength increased from 1.2 to $22.7 \pm 6471.6 \pm 1775.5$ MPa when 0.1% of GO was added to the films. Similarly, the increased stability of the packaging was evidenced by the increase in thermal stability, as evidenced in the gradual increase in glass transition temperature (Tg) with increasing the GO. Finally, the antimicrobial properties of the films were evaluated against *E. coli* K-12 MG 1655 (Gram-negative) and *B. subtilis* 102 (Gram-positive). The CF-GO sheet with 0.6% had the highest inhibition against *E. coli* and *B. subtilis*, with 22.86% and 54.93% inhibition, respectively. Thus, the addition of GO within the films significantly increased the thermal and mechanical stability and added antimicrobial properties, which makes the use of these films in food preservation industry have a great prospect.

Keywords: nanocomposites, gas permeability, antimicrobial properties.

Introducción

Actualmente, muchos materiales empleados para la industria de empaques de alimentos no son biodegradables, lo cual genera una gran cantidad de contaminación por su acumulación en el planeta, afectando así la vida de muchos organismos. Por esa razón, se han empleado biopolímeros que buscan mitigar el problema de la contaminación ambiental y la preservación de los alimentos al mismo tiempo. Sin embargo, los biopolímeros son bien conocidos por sus pobres propiedades mecánicas, de barrera a la humedad y estabilidad térmica, encareciendo los costos de producción y procesamiento (Bharadwaj, 2001; Koh et al., 2008; Pandey et al., 2005; Scott, 2000; Sorrentino, Tortora, & Vittoria, 2006), lo cual se ha intentado resolver utilizando rellenos para generar materiales compuestos. Actualmente, el uso de nanorellenos es un tema de alto interés, pues al reducir las dimensiones del relleno, se maximiza la posibilidad de interacción con la matriz polimérica, mejorando notablemente las propiedades

del material producto de una mayor interacción entre las dos fases (Weiss, Takhistov, & McClements, 2006). Adicionalmente, los nanorellenos pueden proveer propiedades adicionales que no estaban presentes en el material previamente, como propiedades antioxidantes, antimicrobianas, protección a la degradación por parte de la luz ultravioleta, inmovilizadores de enzimas, sensores de degradación, etc., haciéndolos muy atractivos para la industria de los alimentos (Azeredo, 2009; Rhim, Park, & Ha, 2013; Sorrentino et al., 2006; Sorrentino, Gorrasi, & Vittoria, 2007). Dentro de los bionanocompuestos más estudiados para empaques de alimentos se encuentran los derivados de almidón y celulosa, el ácido poliláctico, el polisuccinato de butileno y el polihidroxibutirato. Por otra parte, los nanorellenos más empleados han sido nanoarcillas de sílica tales como la montmorillonita y la kaolinita (Suprakas Sinha Ray & Bousmina, 2005). Un gran reto que permanece aún presente es lograr una excelente dispersión y compatibilidad de los nanorellenos dentro de la fase continua polimérica (Rhim et al., 2013). Los nanocompuestos son mezclas de polímeros con aditivos orgánicos e inorgánicos que tiene al menos una dimensión en la escala nanométrica, con diferentes geometrías (esferas, fibras, partículas), que generan un incremento en el rendimiento de las propiedades mecánicas, de barrera frente a diversos gases y solventes, además de disminuir la densidad, mejorar la transparencia, flujo y la posibilidad de ser reutilizados, brindando grandes ventajas frente a los materiales compuestos o a los polímeros puros (Alexandre & Dubois, 2000; Santos et al., 2012; Giannelis, 1996; S. Sinha Ray & Okamoto, 2003). Por otra parte, las excelentes propiedades físicas, mecánicas, y ópticas de los nanomateriales derivados del grafeno, como el óxido de grafeno, los hace muy atractivos para ser empleados como nanorellenos en nanocompuestos con biopolímeros como el quitosano, para incrementar las propiedades mecánicas, térmicas y de barrera. Adicionalmente, los nanomateriales derivados del grafeno, han demostrado que tienen excelentes propiedades antimicrobianas que serán adicionadas en el nanocompuesto en el que sea introducido, Tabla 1, (Stankovich et al., 2006).

Metodología

Todos los reactivos fueron adquiridos de Aldrich, a menos que se diga lo contrario. El óxido de grafeno fue preparado por un método modificado de Hummers como se reportó previamente (Santos et al., 2012). Las películas de quitosano se prepararon de acuerdo con el método reportado por Shao et al. (2013), modificando la temperatura de entrecruzamiento de 100 a 120°C

Tabla 1. Propiedades superficiales y mecánicas de las películas de los nanocompuestos

Muestra (% OG)	Ángulo de contacto (°)	Espesor (μm)	Resistencia a la rotura (Mpa)	Elongación (%)	Módulo de Young (Mpa)
0	88,53 ± 2,38 a	48 ± 4,2 b	32,4 ± 6,2 c	8,4 ± 1,2 a	22,7 ± 1,2 b
0,1	91,28 ± 3,39 a	52 ± 6,9 b	52,0 ± 22,4 b	0,9 ± 0,8 b	6471,6 ± 1775,5 a
0,25	89,58 ± 2,24 a	54 ± 4,8 a,b	69,6 ± 15,9 a	1,5 ± 1,9 b	6879,0 ± 2011,7 a
0,4	91,84 ± 3,97 a	59 ± 4,9 a	62,7 ± 21,2 a	3,0 ± 2,2 b	5936,3 ± 1112,8 a
0,6	93,43 ± 1,94 a	65 ± 9,4 a	43,2 ± 14,8 a	0,9 ± 0,3 b	5843,7 ± 1485,0 a

Fuente. los autores.

únicamente, y adicionando la cantidad necesaria de óxido de grafeno para completar concentraciones de 0,1, 0,25, 0,4 y 0,6% (p/p) respecto al quitosano. La caracterización se llevó a cabo por espectroscopía de infrarrojo (datos sin publicar) (espectrómetro Agilent Cary 680 FTIR) y se determinaron las propiedades mecánicas con un analizador mecánico (Shimadzu EZ-LX, Japan), bajo la norma ASTM D882-12. Finalmente, las propiedades antimicrobianas fueron determinadas con ayuda de un microscopio de fluorescencia, mediante el método de conteo de células vivas y muertas (Santos et al., 2012). El espesor de las películas fue determinado usando un micrómetro digital Mitutoyo Digimatic. Las propiedades superficiales fueron determinadas por medio de la técnica de ángulo de contacto acuoso estático (KSV CAM 200 instrument, KSV Ltd.).

Tabla 2. Porcentaje de inactivación de *E.coli* y *B. subtilis* con películas del nanocompuesto de CF-GO

Muestra(% GO)	Porcentaje de inactivación (%)	
	<i>Escherichia coli</i>	<i>Bacillus subtilis</i>
0	1,04 ± 1,61 d	1,25 ± 1,42 d
0,1	3,09 ± 2,98 d	N.D.
0,25	7,09 ± 2,73 c	7,51 ± 2,54 c
0,4	12,21 ± 4,6 b	22,69 ± 7,93 b
0,6	22,83 ± 4,48 a	54,93 ± 13,35 a

Fuente. los autores.

ve en el aumento de la resistencia a la rotura de $32,4 \pm 6,2$ a $52,0 \pm 22,4$ MPa entre el quitosano sin GO y el quitosano con 0.1% de GO, aunque también se observa una disminución considerable en la elongación del material.

Los datos presentados son el promedio de seis análisis con su respectiva desviación estándar. Los promedios de los análisis fueron comparados por medio de un Test de Duncan. Los valores con distintas letras en una misma columna son significativamente diferentes (α : 0,05).

La actividad antimicrobiana de las películas de quitosano/óxido de grafeno se determina con el análisis de imágenes de células vivas y muertas con microscopio de fluorescencia frente a cepas de bacterias de *E. coli* y *B. subtilis*. Como se observa en la Tabla 2, se obtuvieron porcentajes de inactivación más altos a medida que se incrementó la cantidad de óxido de grafeno en las películas del nanocompuesto CF-GO (0,4 y 0,6%). Las inactivaciones más altas se obtuvieron con CF-GO (0,6%) *E. coli* (22,83%) y *B. subtilis* (54,93%).

Los datos presentados son el promedio de dieciocho análisis con su respectiva desviación estándar. Los promedios de los análisis fueron comparados por medio de un Test de Duncan. Los valores con distintas letras en una misma columna son significativamente diferentes (α : 0,05).

Resultados

La efectiva dispersión del nanorelleno en la matriz polimérica y la homogeneidad del material se pueden evidenciar en los resultados de las pruebas mecánicas realizadas, el espesor y el ángulo de contacto, pues se observa que la matriz sigue conservando su carácter hidrofóbico a pesar de la presencia del GO, lo cual se explica por los enlaces covalentes hidrofóbicos que se forman entre los grupos epóxido del GO y los grupos amino libre del quitosano, los cuales, además, refuerzan el material como se

Conclusiones

En este trabajo se prepararon efectivamente películas del nanocompuesto de quitosano/óxido de grafeno, cuyas propiedades mecánicas y estabilidad térmica fueron mucho más elevadas que el quitosano sin nanorelleno. Los resultados del análisis de la resistencia a la rotura muestran un incremento elevado con la introducción de GO, aunque con un sacrificio en la elasticidad del material, lo cual es un reflejo de una excelente dispersión e interacción del

nanorelleno con la matriz polimérica en el nanocompuesto. Por otra parte, los análisis antimicrobianos del material demuestran que posee excelente capacidad de inhibición frente a cepas de *E. coli* y *B. subtilis*, siendo esta inhibición dependiente de la cantidad de óxido de grafeno presente en la película. En trabajos futuros se explorará el mecanismo de inhibición microbiana del material y sus propiedades de barrera, con el fin de confirmar su aplicabilidad en la industria de empaques de alimentos.

Referencias bibliográficas

- Alexandre, Michael, & Dubois, Philippe. (2000). Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 28(1-2), 1-63.
- Azeredo, Henriette M. C. de. (2009). Nanocomposites for food packaging applications. *Food Research International*, 42(9), 1240-1253.
- Bharadwaj, R. K. (2001). Modeling the barrier properties of polymer-layered silicate nanocomposites. *Macromolecules*, 34(26), 9189-9192.
- Giannelis, E. P. (1996). Polymer layered silicate nanocomposites. *Advanced Materials*, 8(1), 29-35.
- Koh, H. C., Park, J. S., Jeong, M. A., Hwang, H. Y., Hong, Y. T., Ha, S. Y., & Nam, S. Y. (2008). Preparation and gas permeation properties of biodegradable polymer/layered silicate nanocomposite membranes. *Desalination*, 233(1-3), 201-209.
- Pandey, J., Kumar, P., Misra, M., Mohanty, A., Drzal, L., & Pal Singh, R. (2005). Recent Advances in Biodegradable Nanocomposites. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 5(4), 497-526.
- Rhim, Jong-Wan, Park, Hwan-Man, & Ha, Chang-Sik. (2013). Bio-nanocomposites for food packaging applications. *Progress in Polymer Science*, 38(10-11), 1629-1652.
- Santos, C., Mangadlao, J., Ahmed, F., Leon, A., Advincula, R., & Rodrigues, D. (2012). Graphene nanocomposite for biomedical applications: fabrication, antimicrobial and cytotoxic investigations. *Nanotechnology*, 23(39), 395101.
- Scott, G. (2000). 'Green' polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 68(1), 1-7.
- Shao, Lu, Chang, Xiaojing, Zhang, Yongling, Huang, Yifeng, Yao, Yuhuan, & Guo, Zhanhu. (2013). Graphene oxide cross-linked chitosan nanocomposite membrane. *Applied Surface Science*, 280, 989-992.
- Sinha Ray, S., & Okamoto, M. (2003). Polymer/layered silicate nanocomposites: A review from preparation to processing. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 28(11), 1539-1641.
- Sinha Ray, S., & Bousmina, M. (2005). Biodegradable polymers and their layered silicate nanocomposites: In greening the 21st century materials world. *Progress in Materials Science*, 50(8), 962-1079.
- Sorrentino, A., Tortora, M., & Vittoria, V. (2006). Diffusion behavior in polymer-clay nanocomposites. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 44(2), 265-274.
- Sorrentino, A., Gorrasi, G., & Vittoria, V., (2007). Potential perspectives of bio-nanocomposites for food packaging applications. *Trends in Food Science & Technology*, 18(2), 84-95.
- Stankovich, S., Dikin, D. A., Dommett, G. H. B., Kohlhaas, K. M., Zimney, Eric J., Stach, Eric A., . . . Ruoff, R. S. (2006). Graphene-based composite materials. *Nature*, 442(7100), 282-286.
- Weiss, J., Takhistov, P., & McClements, D. Julian. (2006). Functional Materials in Food Nanotechnology. *Journal of Food Science*, 71(9), R107-R116.
- Zuo, Ping-Ping, Feng, Hua-Feng, Xu, Zhi-Zhen, Zhang, Ling-Fan, Zhang, Yu-Long, Xia, Wei, & Zhang, Wen-Qing. (2013). Fabrication of biocompatible and mechanically reinforced graphene oxide-chitosan nanocomposite films. *Chem Cent J*, 7(1), 39-39.

Evaluación de la degradación ambiental de bolsas plásticas biodegradables

Assesment of the environmental degradation of biodegradable plastic bags

Recibido: 18-04-2016 Aceptado: 31-05-2016

Resumen

Las bolsas plásticas son de uso desechable y se liberan al medio ambiente en cantidades crecientes. Por esta razón muchos fabricantes las están produciendo a base de materiales poliméricos degradables, como por ejemplo, los polihidroxicanoatos y los polilactatos. En este trabajo se evaluó la degradabilidad por exposición al ambiente de bolsas plásticas declaradas como degradables por sus fabricantes, y se compararon con las convencionales. Se estudiaron tres parámetros como son pérdida de masa, absorción de agua y resistencia mecánica. Los resultados mostraron que las bolsas llamadas degradables presentaron mayor pérdida de masa, mayor absorción de agua, y menor resistencia mecánica antes y después de la exposición al ambiente que las bolsas convencionales, demostrando que las modificaciones químicas realizadas por los fabricantes realmente favorecen su degradación.

Palabras clave: plásticos, materiales desechables, resistencia a la tensión, fotodegradación, pérdida de masa.

Summary

Plastic bags are used as disposable materials, and they are released into the environment at an increasing rate. For this reason many manufacturers are producing degradable polymeric material-based bags, like for example the polyhydroxyalkanoates and the polylactates. In this work, the degradability of bags declared as degradable by their manufacturers, was evaluated by exposure to the environment, and compared to those of the conventional bags. Three parameters were studied: weight loss, water absorption and mechanical strength. The results showed that the degradable bags suffered greater weight loss, increased water absorption and lower mechanical strength before and after exposure to the environment than the conventional bags. This show that the chemical modifications made by manufacturers, actually promote their degradation.

Carlos Alfredo Castellón Castro¹
Luis Neil Tejeda López²
Lesly Patricia Tejeda Benítez³

¹ Colombiano, Ingeniero Químico, Especialista en Gerencia de Proyectos, Universidad de Cartagena, Cartagena, Bolívar, Colombia. Correo electrónico: carcasca99@yahoo.com

² Colombiano, Ingeniero Químico, Universidad de Cartagena, Cartagena, Bolívar, Colombia. Correo electrónico: lntejedal@gmail.com

³ Colombiana, Ph.D (c) en Toxicología Ambiental, Magister en Ingeniería Ambiental, Ingeniera Química, Universidad de Cartagena, Cartagena, Bolívar, Colombia. Correo electrónico: ltejedab@unicartagena.edu.co

Keywords: plastics, disposable materials, tensile stress, photodegradation, weight loss.

Introducción

Desde la creación de los plásticos a escala industrial en la década de 1940, y debido a su gran versatilidad tanto la producción como su consumo ha aumentado de manera exponencial, contribuyendo a incrementar el volumen de residuos sólidos no biodegradables (Al-Salem et al. 2009; Siddique et al. 2008). Entre 1960 y 2000 la producción de resinas plásticas aumentó 25 veces (Moore, 2008). En 2013 se estimó que 299 millones de toneladas de plástico fueron producidas en el mundo y liberadas al ambiente (Suhrhoft y Scholz-Böttcher, 2016). Esto ha causado grandes efectos dañinos sobre la biodiversidad marina. Se han encontrado más de 200 especies que se han afectado por los plásticos a través de laceraciones, obstrucciones intestinales, dilución de nutrientes e incluso la muerte en aves marinas, cetáceos, pinnípedos y especies de tortugas de mar (Cole et al. 2011; Moore, 2008; González et al. 2015). Por otra parte, con el aumento del costo y disminución de la capacidad de los rellenos sanitarios, hay una preocupación mundial creciente por la eliminación de los residuos plásticos (Bajracharya et al. 2016).

Alrededor de un tercio de los plásticos se utilizaron en la fabricación de artículos desechables, como envolturas, bolsas y otros materiales de embalaje, vasos y bandejas para comidas rápidas, aumentando los volúmenes de plásticos en los rellenos sanitarios y vertederos

(Yabannavar & Bartha, 1994). La Agencia Ambiental de Estados Unidos ha calculado que en el mundo se producen entre 500.000 millones y un billón de bolsas de plástico por año. Por esta razón, en respuesta a las actitudes de los consumidores, las iniciativas legislativas, y la presión de grupos ambientales, algunos fabricantes han formulado varias películas de plástico “amigables con el medio ambiente” y biodegradables para la fabricación de bolsas de compra y elementos desechables que sean alternativas ecológicas a los productos tradicionales de plástico a base de petróleo (Lee et al., 2016). Los PAD se pueden clasificar de acuerdo a su origen natural o sintético, como se ilustra en la Figura 1. Las materias primas de PAD pueden ser de origen petroquímico, animal, vegetal o de microorganismos. La síntesis, a su vez, puede ocurrir por tres vías principales: 1. biosíntesis, como la fermentación, quimiosíntesis, o la aplicación directa de materiales naturales con o sin modificación, por ejemplo, las fibras naturales (Krzan et al., 2006). El ácido láctico usado para producir ácido poliláctico (PLA) puede obtenerse a partir de la fermentación del almidón o sintéticamente derivado del petróleo, y las dos vías producen PLA biodegradable. Los llamados bioplásticos provienen de biomasa renovable y contribuyen a disminuir los gases de efecto invernadero, debido a que el dióxido de carbono atmosférico es usado por las plantas para producir los carbohidratos. Sin embargo, el polietileno derivado del bioetanol es un bioplástico, pero no es biodegradable, por lo cual generará problemas en su disposición final (Weiss et al., 2012; Gómez y Michel, 2013).

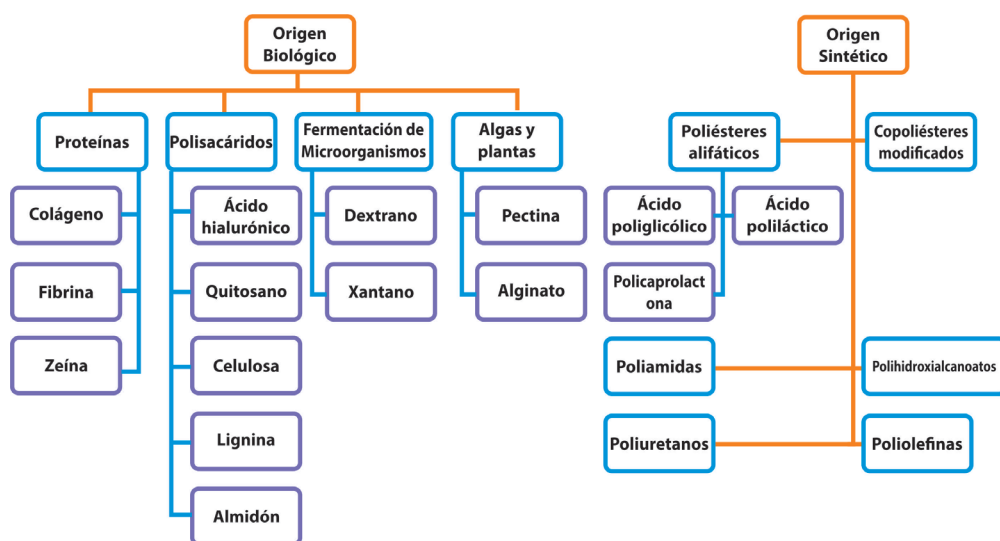


Figura 1. Tipos de plásticos biodegradables
Fuente: (Krzan et al., 2006)

Los bioplásticos biodegradables provenientes de la biomasa, se diseñaron para ser compostables y/o biodegradables. Estos tipos incluyen resinas a base de PLA y polihidroxialcanoatos (PHA).

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) y la Organización Internacional de Normalización (ISO) definen la degradación como “un proceso irreversible que conduce a un cambio significativo de la estructura de un material, normalmente se caracteriza por una pérdida de propiedades (integridad, masa molecular, estructura o resistencia mecánica) y fragmentación”. La degradación se ve afectada por las condiciones ambientales y el producto durante un período de tiempo que comprende una o más etapas (Babae et al., 2015; Krzan et al., 2006).

Cuando los plásticos se exponen a un ambiente energético caracterizado por una carga de energía comparable a la energía de los enlaces químicos, que los mantienen en el lugar de los átomos que constituyen la cadena principal del polímero, resulta en el colapso de la arquitectura macromolecular con la notable fragmentación. Esto corresponde con el inicio de la degradación. En el ambiente, este proceso se basa en una combinación de varios mecanismos y factores: temperatura, luz solar, oxidación, humedad, estrés mecánico y acción de microorganismos (Krzan et al., 2006).

El proceso de degradación de los plásticos comprende dos fases: la desintegración y la mineralización. La primera fase se asocia significativamente con el deterioro de las propiedades físicas, tales como la decoloración, la fragilidad, y la fragmentación. La segunda fase es la conversión final de fragmentos del plástico a pequeñas moléculas como CO_2 , agua y biomasa celular en condiciones aerobias; y CH_4 , CO_2 y biomasa celular bajo condiciones anaerobias, como se visualiza en la Figura 2 (Krzan et al., 2006).

La degradación ambiental del polietileno, por ejemplo, se debe a la acción sinérgica de la foto, termo, oxo y biodegradación. Debido a que la biodegradación de polietileno de alto peso molecular comercial avanza lentamente, la oxidación abiótica es el paso inicial y determinante de la velocidad. El polietileno ambientalmente degradable se prepara mezclando con aditivos biodegradables o fotoiniciadores o por copolimerización. Más de 200 productos de degradación diferentes, incluyendo alcanos, alquenos, cetonas, aldehídos, alcoholes, ácidos carboxílicos, ceto-ácidos, ácidos dicarboxílicos, lactonas y ésteres se han identificado en la termo y foto-oxidación del polietileno, los cuales pueden ser asimilados por los microorganismos (Hakkarainen y Albertsson, 2004).

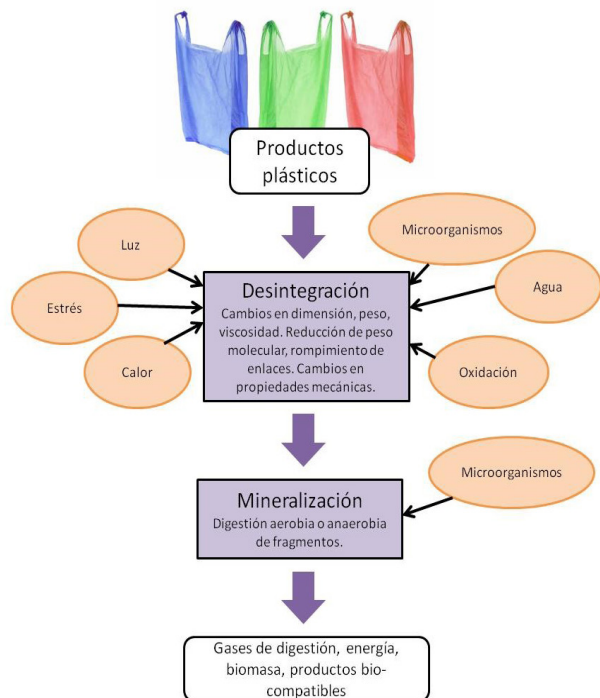


Figura 2. Proceso de degradación ambiental de plásticos
Fuente: (Krzan et al., 2006)

La evaluación de la degradabilidad de los PAD ha sido un difícil reto científico y técnico debido a la variedad de materiales degradables empelados. Con el fin de estandarizar las técnicas y criterios de evaluación, una serie de normas fueron establecidas por los diferentes organismos de normalización que también se utilizan como base para los sistemas de certificación (Krzan et al., 2006). Para evaluar la degradabilidad de los PAD se han propuesto varias técnicas. La pérdida de masa es un método cuantitativo que se correlaciona bien con la cantidad de desprendimiento de gas, que a su vez es una medida de la biodegradación basado en la respiración microbiana. Algunos autores han evaluado la degradación de plásticos ambientalmente degradables usando el parámetro de pérdida de masa. Por ejemplo, Qian et al., (2016) determinaron la pérdida de masa de muestras de polihidroxibutirato - cohidroxivalerato (PHBV) normal y modificado con nanofosfato de calcio y magnesio y con la proteína del maíz zeína, exponiendo las muestras a solución de Tris-HCl. En otro estudio, Torres-Huerta et al., (2014), determinaron la pérdida de masa de mezclas de polietileno terftalato (PET) con ácido poliláctico (APL) y quitosano en un ambiente acelerado, usando lámparas UV. Por otro lado, Wu et al., (2015) usaron este método en co-poliésteres de 2,5-ácido furandicarboxílico con grupos lactil después de

la degradación en suelo. Otro método usado para evaluar la degradabilidad de materiales plásticos es la absorción de agua. Algunos autores han usado este método en sus estudios. Por ejemplo, Babaee et al., (2015) determinaron la absorción de humedad en nanocompuestos termoplásticos reforzados con almidón modificado con nanofibras de celulosa. Estos compuestos son capaces de absorber la humedad del medio ambiente, lo cual conduce a la escisión hidrolítica de la cadena de polímeros, liderando su degradación química o enzimática (Krzan et al., 2006). Finalmente, los cambios medibles en las propiedades mecánicas pueden ser atribuibles a la biodegradación microbiana y a la degradación por oxidación (DEFRA, 2015). Este ensayo lo realizaron Kijeńska et al., (2010) en copolímeros de polietileno y polipropileno de baja densidad rellenos con paja después de la exposición por 12 meses a compost y a suelo.

En nuestro país, desde hace varios años se han implementado campañas de reducción del uso de bolsas plásticas, de manera que almacenes de cadena han impreso en sus bolsas lemas como “Si el planeta quieres cuidar, menos bolsas debes usar”. Adicionalmente, los supermercados y grandes superficies están usando desde hace varios años bolsas plásticas fabricadas con plásticos degradables, bien sea oxo, foto o biodegradables. Recientemente, el Ministerio de Ambiente lanzó la campaña “ReemBÓLSA al Planeta” con el fin de motivar a las personas a no usar bolsas plásticas, sino llevar bolsas reutilizables para las compras. Y con la aprobación de la Resolución que regula el uso racional de bolsas plásticas de único uso, inútiles o no reutilizables en un 80% para el año 2020 y para el 2025 su completa eliminación en todo el país. La ley indica que no se pueden usar bolsas de menos de 30x30 centímetros, todas las bolsas deberán ser más resistentes con el fin de evitar el uso de doble bolsa para objetos pesados, y deberán tener un mensaje educativo impreso que invite a un consumo responsable.

En este estudio se evaluaron las declaraciones realizadas por los fabricantes sobre degradabilidad de sus bolsas, usando técnicas como pérdida de masa, absorción de humedad y pérdida de resistencia a la tensión.

Materiales y métodos

Materiales. Fueron seleccionadas diez tipos de bolsas plásticas identificadas como degradables (BPD), adquiridas en los principales almacenes de cadena de la ciudad de

Cartagena, que se han autodeclarado como degradables ante la opinión pública, e impresas en tinta de color con los logos de los respectivos almacenes. Adicionalmente, se tomaron diez tipos de bolsas convencionales de polietileno (BCP), compradas en un almacén de insumos plásticos.

Exposición de bolsas. Las muestras de cada bolsa, en las dimensiones correspondientes a la prueba a realizar, se sujetaron con grapas a una lámina de plástico que a su vez fue colocada sobre una mesa colocada en un espacio semiexterior del laboratorio, es decir, con techo de plástico transparente, para permitir el paso de luz, y sin aire acondicionado. Durante la exposición, las temperaturas registradas en la ciudad de Cartagena de Indias estuvieron entre 28 y 33 °C con una humedad relativa entre 75 y 88% y no se presentaron precipitaciones.

Prueba de pérdida de masa. Una muestra del material de 2 x 2 cm² fue colocada en un desecador con CaSO₄ (0% de humedad) durante tres días y después se registró la masa inicial de las muestras (W₁) usando una balanza analítica. Las piezas fueron expuestas a la intemperie durante seis semanas, y nuevamente colocadas en el desecador y pesadas (W₂). La pérdida de masa se calculó para cada pieza de acuerdo a la ecuación propuesta por Qian et al., (2016):

$$PP = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (1)$$

Se reportó el promedio de tres réplicas para cada muestra.

Prueba de absorción de humedad. Este ensayo se realizó de acuerdo con la norma ASTM E104. Todos los especímenes para la absorción de agua se cortaron con dimensiones de 2x2 cm y se secaron a 60 °C durante 24 h. Las muestras secas se colocaron en un desecador con CaSO₄ (0% de humedad) durante tres días y después se registró su masa inicial (W₁). Las muestras se transfirieron a continuación en un desecador con CaSO₄ (98% de humedad) y se registró la masa cada 20 minutos, hasta alcanzar una masa constante (W₂). La absorción de agua (AA) se calculó como sigue:

$$AA = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100\% \quad (2)$$

El promedio de tres réplicas para cada muestra fue reportado.

Prueba de resistencia mecánica. Los ensayos mecánicos se realizaron según la norma ASTM D638. Las muestras se cortaron en 7×1 cm. Antes del ensayo, todas las muestras de prueba se acondicionaron durante tres días en un desecador con 55% de humedad relativa a temperatura ambiente. Los ensayos de tracción se llevaron a cabo usando una máquina de ensayo Instron (M350-10-CT) con una carga de 500 N y una velocidad de ensayo de 4 mm/min. Esta prueba se realizó antes de la exposición al ambiente y seis semanas después de la misma. Al menos cinco réplicas se ensayaron para cada muestra.

Análisis estadístico. Todos los experimentos se realizaron por triplicado para cada grupo, con excepción de la prueba de resistencia mecánica que se realizó por quintuplicado. Los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar. El análisis estadístico se llevó a cabo por prueba t pareada. Un valor de $P < 0,05$ se consideró estadísticamente significativo. Los valores de cada prueba para los dos grupos de bolsas se analizaron para establecer si existían correlaciones entre las diferentes variables. Dado que los datos fueron normales por la prueba de Kolmonorov-Smirnov, se usó la correlación para datos paramétricos de Pearson.

Resultados y discusión

Observaciones generales. Tanto las BPD (Bolsas Plásticas Degradables), como las BCP (Bolsas Convencionales de Polietileno), sufrieron cambios, como pérdida de color y deformación. Las denominadas BPD, además perdieron la tinta de impresión y mostraron grietas en su superficie.

Pérdida de masa. Los resultados de pérdida de masa para los dos tipos de bolsas evaluadas se muestran en la Figura 3. Durante las seis semanas del ensayo, las BPD sufrieron una pérdida de masa del 74% con una desviación estándar de 6%, mientras que en el mismo tiempo, las BCP perdieron sólo el 22% de su masa inicial con una desviación estándar del 9%. Usando la prueba estadística t, se encontraron diferencias significativas entre los dos grupos con un valor $P < 0.01$, lo cual indica que el porcentaje de pérdida de masa es significativamente diferente entre las BPD y las BCP. Por lo tanto, se puede afirmar, que los aditivos agregados a las resinas con las cuales se fabrican

las BPD permiten la disminución de la masa de estas bolsas en un 74% promedio, en un período de seis semanas. Otros autores han evaluado la degradación usando el parámetro de pérdida de masa de mezclas de polímeros con otros aditivos en ambientes acelerados. Por ejemplo, Torres-Huerta et al., (2014), expusieron mezclas de polietileno terftalato (PET) con ácido poliláctico (APL) y quitosano en un ambiente acelerado usando lámparas UV. La adición de estos aditivos posibilitó el aumento en la pérdida de masa de los materiales tras la exposición, mostrando que la modificación de las resinas de polímeros con aditivos químicos facilitan la degradación ambiental, en este caso, evidenciada en la pérdida de masa del material.

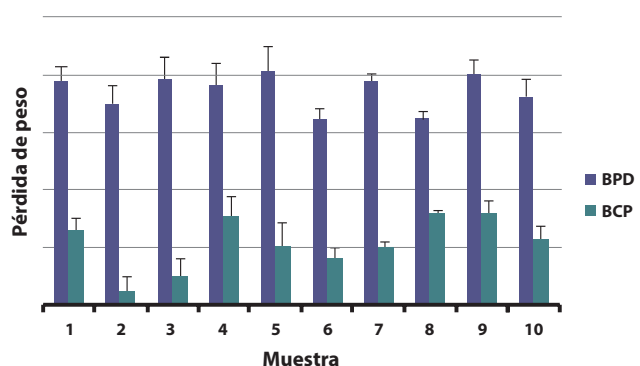


Figura 3. Pérdida de masa. BPD: Bolsas plásticas biodegradables. BCP: Bolsas plásticas convencionales. Fuente: los autores.

Absorción de humedad. El porcentaje promedio en la absorción de agua se presenta en la Figura 4. Después de 60 min, las BPD absorbieron en promedio 73.9% de humedad con una desviación estándar de 1.6%, mientras que las BCP solo absorbieron el 56.1% de agua con una desviación de 1.79%. La significancia estadística de la diferencia entre estas muestras es alta, teniendo en cuenta que empleando la prueba t pareada el valor P es < 0.0001 . Se puede intuir que las BPD contienen aditivos que favorecen la absorción de humedad, con el fin de mejorar las condiciones de degradación. Kakroodi et al., (2014) encontraron que la absorción de agua de polietileno reforzado con fibras de cáñamo aumentaba con el incremento del porcentaje de cáñamo en la mezcla, comprobando que la modificación química de las resinas afecta su comportamiento en el ambiente.

Resistencia mecánica. Los resultados obtenidos para la resistencia a la tensión antes y después de seis semanas se presentan en la Tabla 1. El valor inicial mucho menor de las BPD (23.4 MPa) comparado con el valor de las BCP (31.7 MPa), es una de las principales desventajas

de los materiales biodegradables, debido a que pierden versatilidad en sus aplicaciones. La resistencia a la tensión al cabo de seis semanas de exposición al ambiente fue 8,1 MPa para las BPD, disminuyendo en un 65 %, y de 13,7 MPa para las BCP, disminuyendo un 57 % respecto al valor inicial. Abdullah et al., (2013) evaluaron la disminución en las propiedades mecánicas de co-polímeros de polietileno tereftalato reforzado con polioximetileno después de la exposición por 672 horas en cámaras de desgaste acelerado. Ellos encontraron que los cambios de las propiedades mecánicas de los co-polímeros disminuyeron en un 50% cuando estaban reforzados, y solo un 2% cuando no. Esto demuestra que las modificaciones químicas realizadas a los polímeros para mejorar su biodegradabilidad también disminuyen su resistencia mecánica.

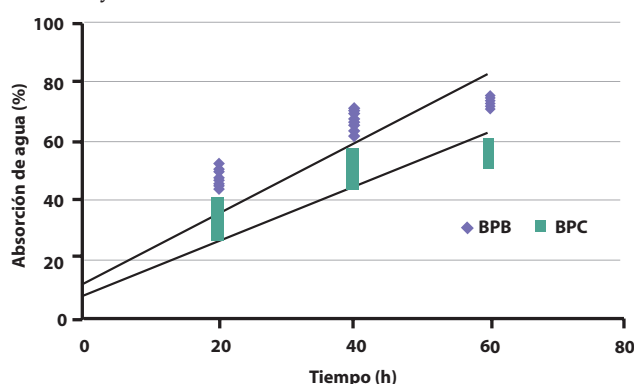


Figura 4. Absorción de agua. BPD: Bolsas plásticas biodegradables. BCP: Bolsas plásticas convencionales. **Fuente:** los autores.

Tabla 1. Resistencia a la tensión

Tipo de bolsas	Resistencia a la tensión (MPa)		Disminución (%)
	Inicial	6 semanas	
BPD	23,4* (2")	8,1 (1)	65 %
BCP	31,7 (3)	13,7 (2)	57 %

BPD: Bolsas plásticas biodegradables BCP: Bolsas plásticas convencionales. * Promedio de cinco muestras. ** Desviación estándar. **Fuente:** los autores.

Análisis de correlaciones. Los coeficientes de correlación entre variables, al igual que sus valores P se muestran en la Tabla 2. Los resultados muestran que las tres variables se correlacionan muy fuertemente. La resistencia a la tensión negativamente con la pérdida de masa ($R = -0,96$) y la absorción de agua ($R = -0,97$); y estas dos últimas se asocian positivamente ($R = 0,94$). Lo anterior muestra que las diferencias entre estos parámetros se encuentran asociados con la naturaleza de las bolsas, presentándose mayor pérdida de masa, mayor absorción de agua, y menor resistencia a la tensión en las BPD que en las BCP.

Tabla 2. Análisis de Correlación de Pearson

	Pérdida de masa	Absorción de agua	Resistencia a la tensión
Pérdida de masa		0,94 ($< 0,001$)	-0,96 ($< 0,001$)
Absorción de agua	0,94* ($< 0,001$)**		-0,97 ($< 0,001$)
Resistencia a la tensión	-0,96 ($< 0,001$)	-0,97 ($< 0,001$)	

* Coeficiente de correlación R. ** Valor P.

Fuente: los autores.

Conclusiones

El estudio experimental realizado y el análisis estadístico efectuado permiten concluir que las BPD muestran un mayor deterioro bajo condiciones ambientales que las BCP, por lo que pueden tener una menor permanencia en el ambiente después de su uso. Sin embargo, es necesario continuar desarrollando campañas que permitan el uso racional de estos productos, con miras a la preservación del medio ambiente.

Referencias

- Abdullah, M., Dan-mallam, Y., Megat Yusoff, P. (2013). Effect of Environmental Degradation on Mechanical Properties of Kenaf/ Polyethylene Terephthalate Fiber Reinforced Polyoxymethylene Hybrid Composite. *Advances in Materials Science and Engineering*. 8.
- Al-Salem, S., Lettieri, P., Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW), a review. *Waste Management*, 29, 2625–2643.
- ASTM D638 - 14. (2002). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*.
- ASTM E104-02. (2012). *Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions*.
- ASTM D 883. (1991). *Standard terminology relating to plastics*.

- Babaei, M., Jonoobi, M., Hamzeh, Y., Ashori, A. (2015). Biodegradability and mechanical properties of reinforced starch nanocomposites using cellulose nanofibers, *Carbohydrate Polymers*, 132, 1-8.
- Bajracharya, R., Manalao, A., Karunasena, W., Laua, K. (2016). Characterisation of recycled mixed plastic solid wastes, Coupon and full-scale investigation, *Waste Management*, 48, 72-80.
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., Galloway, T. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment, a review. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 2588-2597.
- Department for Environment, Food and Rural Affairs. DEFRA. (2015). *Review of standards for biodegradable plastic carrier bags*, Reino Unido.
- Gómez, E., Michel, F. (2013). Biodegradability of conventional and bio-based plastics and natural fiber composites during composting, anaerobic digestion and long-term soil incubation. *Polymer Degradation and Stability*, 98(12), 2583-2591.
- González, C., Machain, N., Campagna, C. (2015). Legal and institutional tools to mitigate plastic pollution affecting marine species, Argentina as a case study, *Marine Pollution Bulletin*, 92(1-2), 125-33.
- Hakkarainen, M., Albertsson, A. (2004). Environmental Degradation of Polyethylene Long Term Properties of Polyolefins. *Advances in Polymer Science*, 169:177-200.
- ISO 472 Plastics – vocabulary, amendment 3 (1993). *General terms and terms relating to degradable plastics*.
- Kakroodi, A., Kazemi, Y., Rodrigue, D. (2013). Mechanical, rheological, morphological and water absorption properties of maleated polyethylene/hemp composites: Effect of ground tire rubber addition. *Composites Part B: Engineering*, 51: 337-344.
- Kijeńska, M., Kowalska, E., Pałys, B., Ryzkowski, J. (2010). Degradability of composites of low density polyethylene/polypropylene blends filled with rape straw, *Polymer Degradation and Stability*, 95(4), 536-542.
- Krzan, J., Hemjinda, S., Miertus, S., Corti, A., Chiellini, E. (2006). Standardization and certification in the area of environmentally degradable plastics, *Polymer Degradation, and Stability*, 91(12), 2819-2833.
- Lee, S., Choe, H., Kim, S., Park, D., Nasir, A., Kim, B., Kim, K. (2016). Complete genome of biodegradable plastics-decomposing *Roseateles depolymerans* KCTC 42856(T) (=61A(T)), *Journal of Biotechnology*, 220, 47-8.
- Moore, C. (2008). Synthetic polymers in the marine environment, a rapidly increasing, long-term threat, *Environmental Research*, 108, 131-139.
- Qian, J., Ma, J., Su, J., Yan, Y., Li, H., Shin, J., Wei, J., Zhao, L. (2016). PHBV-based ternary composite by intermixing of magnesium calcium phosphate nanoparticles and zein, In vitro bioactivity, degradability and cytocompatibility. *European Polymer Journal*. 75, 291-302.
- Siddique, R., Khatib, J., Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete, a review, *Waste Management*, 28, 1835-1852.
- Suhrhoff, T., Scholz-Böttcher, B. (2016). Qualitative impact of salinity, UV radiation and turbulence on leaching of organic plastic additives from four common plastics - A lab experiment, *Marine Pollution Bulletin*. 102(1), 84-94.
- Torres-Huerta, A., Palma-Ramírez, D., Domínguez-Crespo, M., Del Ángel-López, D., De La Fuente, D. (2014). Comparative assessment of miscibility and degradability on PET/PLA and PET/chitosan blends, *European Polymer Journal*, 61, 285-299.
- Weiss, M., Haufe, J., Carus, M., Brandão, M., Bringezu, S., Hermann, B. (2012). A review of the environmental impacts of biobased materials, *Journal of Industrial Ecology*, 16, S169-S181.

Wu, H., Wen, B., Zhou, H, Zhou, J., Yu, Z., Cui, L., Huang, T., Cao, F. (2015). Synthesis and degradability of copolyesters of 2, 5-furandicarboxylic acid, lactic acid, and ethylene glycol, *Polymer Degradation and Stability*, 121, 100-104.

Yabannavar, A., Bartha, R. (1994). Methods for Assessment of Biodegradability of Plastic Films in Soil, *Applied Environmental Microbiology*, 60(10),3608–3614.

Línea de atención al cliente:
(57 - 1) 472 2000 en Bogotá
01 8000 111 210 a nivel Nacional
.....
www.4-72.com.co

El servicio de **envíos**
de Colombia



Adherencia y biocompatibilidad *in vitro* de recubrimientos de fosfato de calcio-titanio de calcio obtenidos por magnetron *sputtering* para aplicaciones ortopédicas

Adherence and in vitro biomedical properties of calcium phosphate-calcium titanate composite coatings for orthopedic application

Recibido: 01- 03 - 2016 Aceptado: 31-05-2016

Johanna Esguerra Arce¹
Adriana Esguerra Arce²
Yesid Aguilar Castro³

¹ Colombiana, PhD© Universidad del Valle,
Escuela de Ingeniería de Materiales, TPMR
e-mail johanna. Correo electrónico:
esguerra@correounivalle.edu.co

² Colombiana, PhD© Universidad del Valle,
Escuela de Ingeniería de Materiales, TPMR.

³ Colombiano, PhD Universidad del Valle,
Escuela de Ingeniería de Materiales, TPMR.

Resumen

La hidroxiapatita se ha usado como recubrimientos en vástagos de prótesis de cadera por muchos años. Sin embargo, se ha observado que estos recubrimientos se desprenden llevando a la pérdida de la prótesis, debido a que sus propiedades mecánicas no cumplen los requerimientos de la aplicación. Ya que el titanato de calcio se ha propuesto como recubrimiento para aplicaciones biomédicas, por la biocompatibilidad y osteoconductividad mostrada en ensayos *in vitro*, en este trabajo se midió el efecto de agregar titanato de calcio a recubrimientos de fosfatos de calcio, obtenidos mediante magnetron *sputtering*, en su adherencia y módulo elástico, los cuales se evaluaron mediante ensayo de rayado según norma ASTM C1624-05 y nanoindentación, de acuerdo a la norma ASTM E2546-07, respectivamente. La biocompatibilidad *in vitro* de los recubrimientos se evaluó mediante ensayos de genotoxicidad y hemólisis, según norma ASTM F748-06. El recubrimiento de 100% fosfato de calcio (CP) estuvo compuesto de una mezcla de fosfato tricálcico y tetracálcico, al cual se le adicionó titanato de calcio (TC), mediante modificación de un blanco de $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_{2-2x}\text{O}_x$ en porcentajes de 25, 50 y 75 en volumen. Para efectos comparativos, también se obtuvieron recubrimientos de 100% TC. Se encontró que la adherencia se incrementó al adicionar 25% de un material en el otro, y que fue máxima en el recubrimientos 50%-50%. Además, se encontró que los recubrimientos son no genotóxicos y , a lo sumo, levemente hemolíticos.

Palabras clave: biomateriales; recubrimientos; titanato de calcio; fosfato de calcio; magnetron *sputtering*, ensayo de adherencia.

Abstract

Hydroxyapatite coatings have been used for many years in hip prosthesis stems. However, it has been observed that the coatings detach leading to the loosening of the prosthesis due to their mechanical properties did not meet the requirements. Since calcium titanate has been proposed as a coating for biomedical applications due to its good *in vitro* biocompatibility and osteoconductivity, adherence and elastic modulus of calcium phosphate-calcium titanate composite coatings were assessed by means of scratch test (ASTM C1624-05) and nanoindentation test (ASTM E2546-07). *In vitro* biomedical properties such as genotoxicity and hemolysis were evaluated also (ASTM F748-06). 100% calcium phosphate (CP) coating was composed of a mixture of tricalcium and tetracalcium phosphate. Calcium titanate (CT) was added to the coatings, by modifying a $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_{2-2x}\text{O}_{x-x}$ target, in 25, 50 and 75 volume percentages. For comparison purposes, 100% TC coatings were also obtained. It was found that adherence increases as added 25% of one material of another rising a maximum value in 50-50 composite coating. Besides, the coatings were not genotoxic and not hemolytic.

Keywords: biomaterials; coatings; calcium titanate; calcium phosphate; magnetron sputtering, scratch test.

Introducción

Cuando la cadera sufre un daño que resulta de malformaciones, artritis o fractura, las actividades comunes como caminar, pueden resultar dolorosas y difíciles. Una de las soluciones para resolver esto es la cirugía de remplazo de cadera, que consiste en sustituir las partes enfermas o lesionadas de la articulación por una prótesis que la sustituye o la complementa.

Las aleaciones de las que están elaborados los vástagos de las prótesis de cadera son materiales en general bioinertes, por lo que no alcanzan una plena adherencia con el tejido óseo circundante, llegando a desprenderse en algún momento. Una forma de mejorar su adherencia es la aplicación de recubrimientos osteoconductivos (Huracek et al., 1994; Andersen et al., 2015), compuestos, principalmente, de hidroxiapatita (Chandran et al., 2010; Goyenvalle et al., 2006). La superioridad de estos recubrimientos se ha observado a edades tempranas del implante, donde la formación de tejido óseo es mucho mayor que en vástagos sin recubrimiento. Sin embargo,

estos recubrimientos presentan algunos inconvenientes, ya que se desprenden o desgastan (Porter et al., 2004), disminuyendo la cantidad de hueso adherido al implante, llevando a pérdida de adherencia a largo plazo. Por tanto, el tiempo de vida de prótesis recubiertas iguala, pero no supera al de las prótesis cementadas, cuya duración está entre 12 y 16 años (Chandran et al., 2010).

Ya que las prótesis recubiertas de hidroxiapatita han mostrado buenos resultados clínicos y con el fin de extender la vida útil de estos recubrimientos en el dispositivo, se han llevado a cabo muchos estudios. En estos se han variado los métodos de obtención (Hong et al., 2007; Bao et al., 2005), se han evaluado diferentes sustratos (Dinda et al., 2009; Liu et al., 2002) y diferentes capas semilla (Nelea, et al., 2000; Zhen-jun, et al., 2006). La hidroxiapatita se ha combinado con diferentes materiales (Silva et al., 2001; Harle et al., 2006) y se han producido recubrimientos en forma de multicapas (Ozeki et al., 2007). Todos con resultados prometedores, pero aún sin aplicación en prótesis comerciales.

En las primeras etapas de la nucleación de apatita en aleaciones de titanio se ha observado la formación de una capa amorfa de titanato de calcio (TC) (Webster et al., 2003). Por lo que este material ha ganado atención para ser usado como recubrimiento en aleaciones biomédicas para la activación de la osteogénesis (Ohtsu et al., 2008). Algunos estudios realizados han demostrado que los recubrimientos de TC son biocompatibles (Park et al., 2011), protegen contra la corrosión (Tang et al., 2013), son adherentes (Stanishevsky et al., 2007) y osteoconductivos (Wiff et al., 2007).

Por otro lado, entre los fosfatos de calcio, el fosfato tricálcico ($\text{TCP}-\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) y el fosfato tetracálcico ($\text{TTCP}-\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2\text{O}$) presentan buena osteoconductividad y una solubilidad media si se comparan con la hidroxiapatita (HA) (Ozeki et al., 2007). El TCP ha sido empleado como componente de cementos óseos (Grandia et al., 2011). El TTCP mezclado con un material más estable puede formar un material de estructura porosa que, a largo plazo, incremente la osteoconductividad del material compuesto.

Por tanto, el objetivo de este trabajo es llevar a cabo la evaluación de adherencia y biocompatibilidad de recubrimientos compuestos de TCP, TTCP y TC crecidos sobre sustratos de acero AISI 304 previa deposición de una capa semilla de titanio, utilizando la técnica de magnetron *sputtering*, para ser aplicados sobre vástagos de prótesis de cadera.

Detalles Experimentales

Obtención de los Recubrimientos

Los recubrimientos de fosfato de calcio (CP) – titanato de calcio (TC) se obtuvieron a partir de blancos de hidroxiapatita (HA) y de titanato de calcio (TC) mediante R. F. magnetron *sputtering*, como se explicó en otro artículo (Esguerra et al., 2016). La proporción de materiales en los blancos fue 100%HA-0%TC, 75%HA-25%TC, 50%HA-50%TC, 25%HA-75%TC y 0%HA- 100%TC en volumen, obteniéndose los respectivos recubrimientos 100%CP-0%TC, 75%CP25%TC, 50%CP-50%TC, 25%CP-75%TC y 0%CP- 100%TC. La Tabla 1 muestra la codificación de los recubrimientos y su composición. Como puede verse, el recubrimiento 100CP-0TC consta de una mezcla de β -TCP y TTCP deficiente de oxígeno ($\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2\text{O}_x$); el recubrimiento 0CP-100TC consta de 100% titanato de calcio; y los recubrimientos de mezcla constan de β -TCP, $\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2\text{O}_x$ y TC, en sus respectivas proporciones.

Tabla 1. Codificación y composición de los recubrimientos (% en volumen)

Codificación de los Recubrimientos	Componentes de los Recubrimientos
100CP-0TC	100% ($2\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 4\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2\text{O}_x$)
75CP-25TC	75% ($2\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 4\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2\text{O}_x$) - 25% TC
50CP-50 TC	50% ($2\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 4\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2\text{O}_x$) - 50% TC
25CP-75 TC	25% ($2\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 4\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2\text{O}_x$) - 75% TC
0CP-100 TC	100% TC

Fuente: los autores.

Adherencia

La adhesión se evaluó con un ensayo de rayado siguiendo la norma ASTM C1624-05, en un equipo *Scratch Test Microtest MTR2*, aplicando una carga creciente de 0 a 40 N en una longitud de huella de 2.6 mm. Por otro lado, para correlacionar con la adherencia, se llevó a cabo la evaluación del módulo elástico de los recubrimientos mediante nanoindentación en un nanoindentador *Hysitron Ubil* siguiendo la norma ASTM E2546-07, a una profundidad menor al 10% del espesor total del recubrimiento. Además, con el fin de conocer la interfaz recubrimiento-sustrato, se llevó a cabo un estudio de perfil de profundidad mediante XPS del recubrimiento 100CP-0TC, en un equipo SAGE HR100 (SPECS) con fuente monocromática (Al K α 1486.6 eV), midiendo perfiles composicionales en profundidad y espectros de alta resolución.

Genotoxicidad

Para las pruebas de genotoxicidad se utilizaron osteoblastos humanos crio-preservados NHOst-Osteoblast OGM (Lonza Group), cuya densidad de sembrado recomendada es de 5000 células/cm² (de acuerdo al protocolo de Lonza). Para su cultivo se utilizó medio basal para células osteoblásticas con suplementos de crecimiento celular, tales como suero fetal bovino, ácido ascórbico y sulfato de gentamicina, BulleKit®. El cultivo celular se llevó a cabo en recipientes para cultivo de 25 y 75cm² (Corning®), en una incubadora humidificada a 37 °C y 5% CO₂, por 8 semanas, renovando el medio de cultivo cada 3-4 días.

Para la prueba, además de las muestras de estudio, se empleó titanio como control negativo (por triplicado), por su ampliamente referenciada biocompatibilidad (Mc Entire, et al., 2015) y 4NQO, como control positivo, la cual es una solución estándar que provee el kit.

Para poner en contacto las células con las muestras de estudio, estas fueron esterilizadas, así como las tres muestras de titanio. Estas se ubicaron en pozos de cultivo y luego se añadieron 55000 células a cada pozo con medio de cultivo (1.0 mL en volumen total por pozo). Se siguió el mismo procedimiento del cultivo celular por 16 días, haciendo cambio de medio cada 4 días.

La evaluación de la genotoxicidad se realizó haciendo uso del kit SOS-Chromo Test®. La prueba empleó una cepa PQ37 mutante de *E-coli* que se colocó en contacto con el medio de cultivo que estuvo a su vez en contacto con los materiales de prueba y los osteoblastos. Si el material se disuelve o forma productos de corrosión que sean genotóxicos, esto se ve reflejado en las bacterias, así, como una cantidad masiva de daños en el ADN se disparan como respuesta, pues son mecanismos de emergencia, que se caracterizan por tener niveles superiores de proteínas implicadas en reparación y recombinación del ADN. Si la cantidad de lesiones que hay en la *E-coli* es muy superior a lo normal, se induce la respuesta SOS (es decir, la inducción de los genes SOS que están implicados en la reparación del ADN). A nivel molecular la respuesta SOS consiste en la inducción de la expresión de una serie de genes, la mayor parte de ellos implicados en reparación de daños en el ADN. Esta respuesta se relaciona con el gen β -gal responsable de la producción de la enzima β -galactosidasa. Por tanto, el grado en que la célula está tratando de reparar el daño del ADN usando el complejo de genes ya mencionado,

está directamente ligado a la cantidad producida de β -galactosidasa, que se mide por medio de una reacción de esta enzima con un cromógeno azul.

La actividad genotóxica se midió graficando la absorbancia (medida en un lector de Elisa a 615 nm) en función del orden de la dilución. La pendiente de la porción lineal de esta gráfica es el potencial del material para inducir daño en el ADN (o SOSIP del inglés SOS induction potential). SOSIP con valores cercanos a cero indican materiales no genotóxicos.

Hemólisis

La prueba de hemólisis busca medir la destrucción de eritrocitos que resulta en la liberación de hemoglobina hacia el plasma, y se llevó a cabo siguiendo la norma ASTM F756-08. Para ello se obtuvo sangre humana de tres personas sanas no fumadoras. Como control negativo se utilizó polietileno (PE) y como control positivo acero D3. Una mezcla preparada apropiadamente con esta sangre se puso en contacto con las muestras de estudio y se determinó un % de hemólisis. Para un valor menor a 2 se dice que el material es no hemolítico, entre 2 y 5 es parcialmente hemolítico, y mayor a 5 es hemolítico.

Resultados y Discusión

Adherencia

Durante el paso del indentador con carga creciente a lo largo del recubrimiento se obtuvieron los datos de desplazamiento, carga tangencial, carga normal y de coeficiente de fricción (o de dragado). La Figura 1 muestra las curvas correspondientes al coeficiente de dragado en función de la carga normal. Después del ensayo las huellas de rayado se inspeccionaron mediante microscopía óptica, y los modos de falla encontrados se correlacionaron con las curvas *coeficiente de dragado – carga normal*. La identificación de las cargas cohesiva y adhesiva se hizo a partir de esta correlación.

Los modos de falla de los recubrimientos se muestran esquemáticamente en la Figura 2. Todos los recubrimientos exhibieron grietas semicirculares transversales, astillamiento y desprendimiento (Holmberg et al., 2003). Las grietas semicirculares transversales están relacionadas con el fallo cohesivo, por lo que la carga a la que empiezan a aparecer se denomina carga cohesiva y se designa L_{CI} . El astillamiento sin desprendimiento del material se ilustra con los rombos grises y es también un fallo cohesivo, ya que el recubrimiento se astilla, pero no

se desprende por completo del sustrato. El astillamiento con desprendimiento de recubrimiento, ilustrado con los rombos negros, se relaciona con el fallo adhesivo entre el recubrimiento y el sustrato. La carga a la que este sucede se denomina L_{C2} .

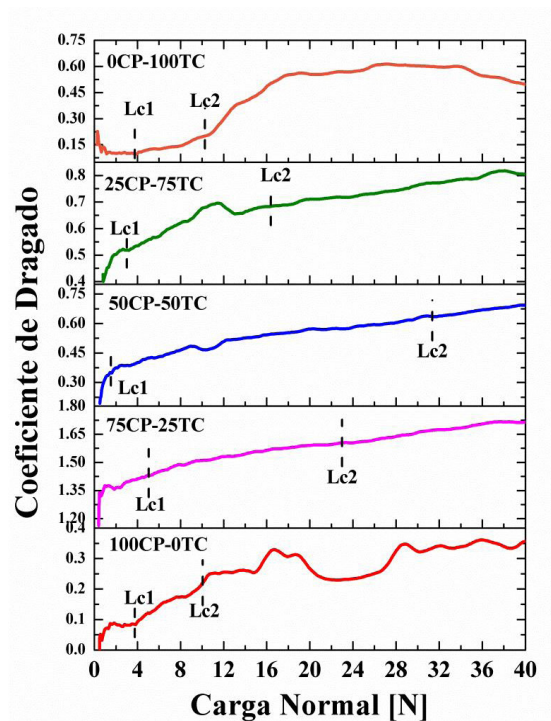


Figura 1. Coeficiente de dragado en función de la carga normal en el ensayo de rayado
Fuente: los autores.

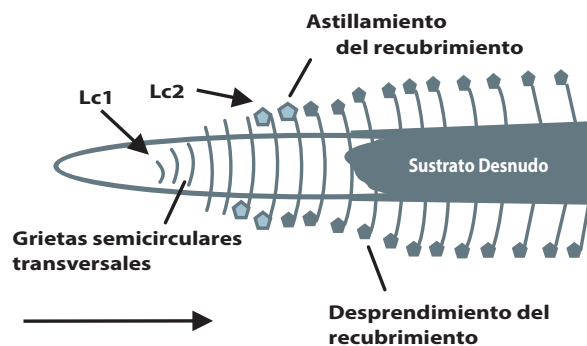


Figura 2. Esquema de los modos de falla de los recubrimientos sometidos al ensayo de rayado
Fuente: los autores.

La Figura 3 muestra el perfil de composición del recubrimiento 100CP-0TC obtenido mediante XPS, donde se observa un gradiente composicional entre la capa semilla y el recubrimiento. Esta interfaz está compuesta de una mezcla de Ti, O, P y Ca, que se hace más rica en Ti a medida que se acerca a la capa semilla. La presencia de esta interfaz

favorece el anclaje entre ambos materiales, mejorando la adherencia. La formación de esta interfaz se ve favorecida por la temperatura de deposición, que permite la difusión de átomos de P y Ca en el Ti-O de la capa semilla.

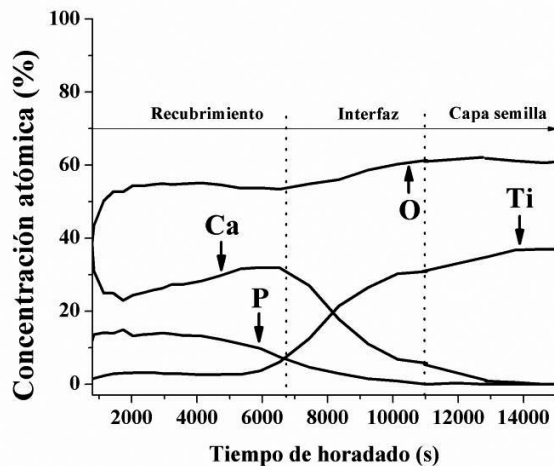


Figura 3. Perfil de composición del recubrimiento 100CP-0TC

Fuente: los autores.

La Figura 4 muestra el comportamiento de la carga adhesiva de los recubrimientos con la adición de TC. Al igual que en el caso de la carga cohesiva, los recubrimientos 100CP-0TC y 0CP-100TC presentan valores similares de adherencia, alrededor de 10N. Pese a que los valores de adherencia obtenidos mediante ensayo de rayado son muy variables y dependen de factores extrínsecos tales como la velocidad de carga aplicada, la velocidad de rayado, el radio del indentador, el desgaste del indentador; y de factores intrínsecos, como las propiedades del sustrato (dureza, módulo elástico), las propiedades del recubrimiento (espesor, dureza, módulo elástico, esfuerzos residuales, rugosidad superficial) y el coeficiente de fricción (Bull et al., 2006), se hizo una comparación de los valores obtenidos para los recubrimientos 100-0 con la literatura: se encontró que la adherencia del recubrimiento 100CP-0TC es superior al reportado por Candidato Jr., et al (2015) de 3,3 N para recubrimientos de fosfatos de calcio de alrededor de 60 μm de espesor, obtenidos mediante plasma spray; y superior también al valor reportado por Surmeneva et al (2015) de 5.85 N para un recubrimiento de HA de 690 nm de espesor depositado por R. F. magnetron *sputtering*. Hasta este momento, y hasta donde los autores pudieron encontrar, no hay referencias de ensayo de rayado sobre recubrimientos de titanato de calcio, excepto uno reportado por Stanishvsky et al (2007) pero usando cargas por debajo de 1N, por lo que no es comparable.

Con respecto a los recubrimientos de mezcla, se observa que hay un incremento de la adherencia a medida que se adiciona un material en el otro. Al adicionar 25% de CP al recubrimiento de TC, la carga adhesiva se incrementa a un valor de 16.4 N. Al adicionar 25 y 50% de TC al recubrimiento de CP, la carga adhesiva se incrementa a valores de 23.1 y 31.2 N, respectivamente. Un resultado similar fue encontrado por K. De-Jung et al., (2012) que al adicionar ZrO_2 a hidroxiapatita en proporciones 75HA-25 ZrO_2 y 50HA-50 ZrO_2 , obtuvieron cargas de adherencia de 17.5 y 30 N, lo cual atribuyen a esfuerzos residuales bajos a medida que se incrementa el contenido de ZrO_2 entre el recubrimiento y el sustrato.

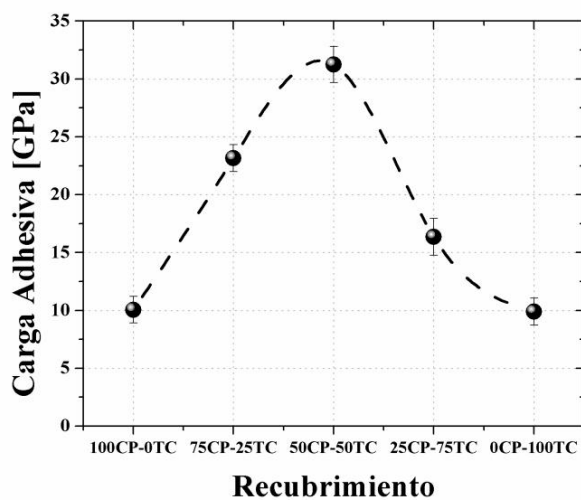


Figura 4. Carga adhesiva de los recubrimientos CP-TC

Fuente: los autores.

En la Figura 5 se hace una correlación de L_{CI} con el módulo elástico de los recubrimientos; se da una mayor carga cohesiva a medida que se incrementa el módulo elástico de los recubrimientos. Esto es coherente con la literatura (Núñez et al., 2012), ya que el módulo elástico es una medida de las fuerzas cohesivas dentro de un material: entre más altas son estas fuerzas cohesivas, más carga se debe aplicar para que aparezca la primera grieta del material.

Genotoxicidad

La Figura 6 muestra la genotoxicidad de los recubrimientos CP-TC, del acero AISI 304 y de los controles positivo (4NQO, como menciona el protocolo) y negativo (Ti grado 2). La literatura reporta que el titanio es no genotóxico (Velasco-Ortega, et al., 2010) y que el AISI

304 y 316L tienen cierta tendencia a ser genotóxicos *in vivo* a largo plazo (Martín-Cameána, et al., 2015). El valor máximo de genotoxicidad mostrado en la gráfica es menor que los mostrados por Kubásek et al (2016), lo que indica, siguiendo su razonamiento, que ninguno de los materiales en estudio induce daño significativo al ADN, es decir, no son genotóxicos en condiciones *in vitro*. El resultado del recubrimiento 100CP-0TC está también en concordancia con la comunidad científica, que reporta que estos fosfatos de calcio son no genotóxicos *in vitro* (Quan, et al., 2013). Del recubrimiento 0CP-100TC no hay reportes, hasta donde bien saben los autores de esta caracterización.

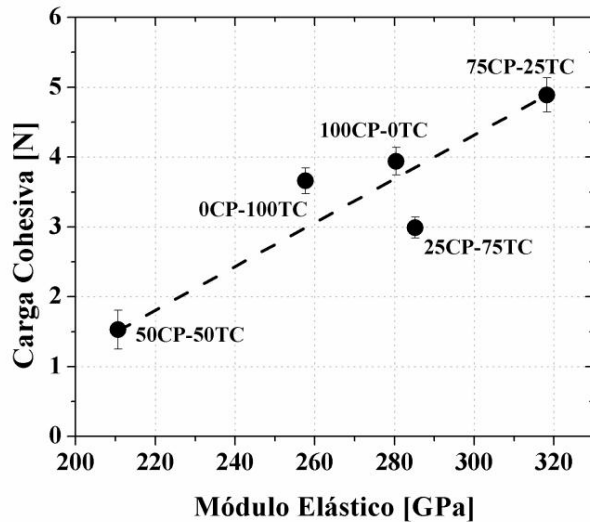


Figura 5. Relación entre carga cohesiva de los recubrimientos y su módulo elástico
Fuente: los autores.

Cuando se adiciona un material a otro para formar un compuesto, como en este caso, pero uno de los dos presenta genotoxicidad, se observa que la genotoxicidad del compuesto tiende a aumentar al incrementar la proporción de material genotóxico (Quan et al., 2013), sin embargo, aquí el valor de genotoxicidad se mantiene casi constante y de valor semejante al de 100CP y 100TC, ya que ambos son no genotóxicos (*in vitro*) y con valores de genotoxicidad similares.

Hemólisis

La Figura 7 muestra el índice hemolítico de los recubrimientos, el sustrato, el control negativo (polietileno, PE) y del control positivo (acero D3) después del ensayo de hemólisis. El control negativo presentó un índice hemolítico de 1.75 y el control positivo un valor de 5.79, lo que significa que el PE es no-hemolítico y el acero D3 es hemolítico, como se esperaba. El acero inoxidable AISI 304

es no-hemolítico, de hecho presenta un índice hemolítico menor que los recubrimientos. En los recubrimientos se ve que a medida que se agrega titanato de calcio, estos se hacen menos hemolíticos, siendo el recubrimiento 100CP-0TC levemente hemolítico y el recubrimiento 0CP-100TC no-hemolítico. Esto se puede explicar por la mayor solubilidad de los fosfatos de calcio con respecto al titanato de calcio (Ozeki, et al., 2007).

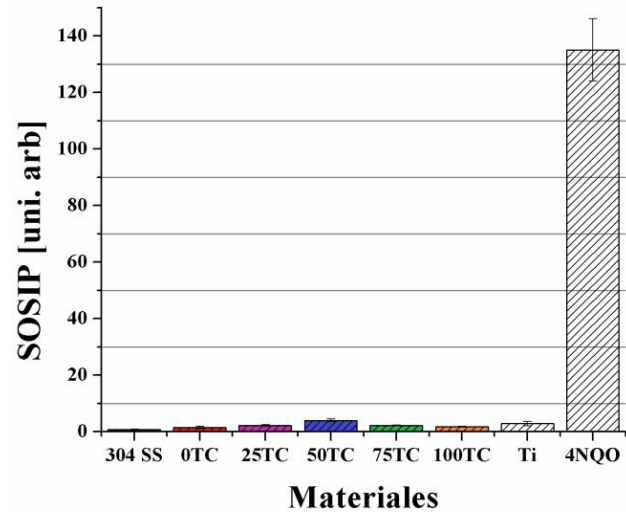


Figura 6. Genotoxicidad para cada material expresada como SOSIP
Fuente: los autores.

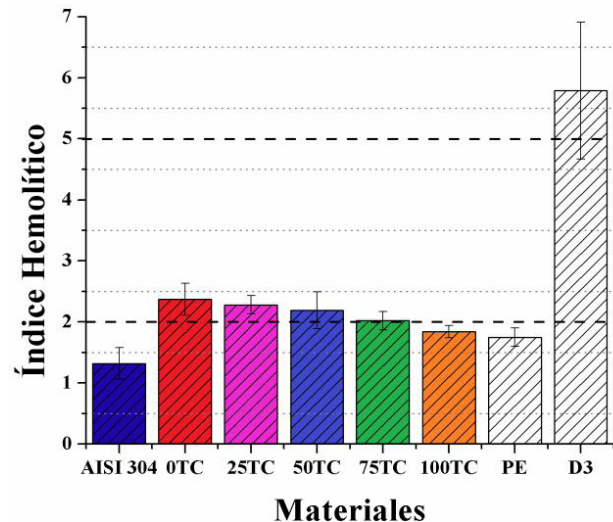


Figura 7. Índice hemolítico para cada material
Fuente: los autores.

Conclusiones

Se llevó a cabo exitosamente la evaluación de adherencia, genotoxicidad y hemólisis *in vitro* de recubrimientos de fosfato de calcio – titanato de calcio, obtenidos mediante magnetrón sputtering.

Con respecto a los modos de falla en la evaluación de adherencia mediante ensayo de rayado, se encontró que todos los recubrimientos exhiben grietas semicirculares transversales, astillamiento y desprendimiento. Se corroboró que a mayor módulo elástico de los recubrimientos se obtiene mayor carga cohesiva de los mismos.

El valor de adherencia del recubrimiento 100CP-0TC es superior al reportado por otros autores para recubrimientos de fosfatos de calcio. El valor de adherencia del recubrimiento 0CP-100TC fue aproximadamente de 10N. Con respecto a los recubrimientos de mezcla se encontró que la adherencia incrementa al adicionar un material en el otro y es máxima en el recubrimiento 50CP-50TC. Además, todos los recubrimientos mostraron ser no genotóxicos y, a lo sumo, parcialmente hemolíticos *in vitro*. Por tanto, se recomienda su evaluación de biocompatibilidad *in vivo*, para ser usados como recubrimientos para vástagos de prótesis de cadera.

Agradecimientos

Los autores dan sus sinceros agradecimientos al profesor Óscar Gutiérrez del Grupo de Farmacología de la Facultad de Salud de la Universidad del Valle por su apoyo en la realización de las pruebas de biocompatibilidad *in vitro*.

Referencias bibliográficas

- Andersen, M. R.; Petersen, M. M. (2015). Adaptive bone remodeling of the femoral bone after tumor resection arthroplasty with an uncemented proximally hydroxyapatite-coated stem. *Journal of Clinical Densitometry*, Article impress Available online 3 April.
- ASTM C1624 – 05 (Reapproved 2010). (2005). *Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing*, West Conshohocken, PA, American Society for Testing and Materials.
- ASTM E2546 – 07.(2007). *Standard Practice for Instrumented Indentation Testing*, West Conshohocken, PA, American Society for Testing and Materials.
- ASTM F756-08.(2008). *Standard Practice for Assessment of Hemolytic Properties of Materials*, West

Conshohocken, PA, American Society for Testing and Materials. .

- Bao, Q.; Chen, C.; Wang, D.; Ji, Q.; Lei, T. (2005). Pulsed laser deposition and its current research status in preparing hydroxyapatite thin films. *Applied Surface Science* 252: 1538–1544.
- Bull, S. J.; Berasetegui, E. G. (2006). Capítulo 7: *An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing*. En S. K. Sinha, editor. *Scratching of Materials and Applications*. Tribology and Interface Engineering Series, 51. USA: Elsevier; 136–165.
- Candidato Jr., P. Sokołowski, P.; Pawłowski, L.; Denoirjean, A. (2015). Preliminary study of hydroxyapatite coatings synthesis using solution precursor plasma spraying. *Surface & Coatings Technology*, 277 : 242–250.
- Chandran, P.; Azzabi, M.; Miles, J.; Andrews, M.; Bradley, J.(2010). Furlong hydroxyapatite-coated hip prosthesis vs the Charnley cemented hip prosthesis. *The Journal of Arthroplasty*, 25: 52 – 57.
- De-Jun, K.; Dan, L.; Yong-Zhong, W.; Chao-Zheng, Z. (2012). Mechanical properties of hydroxyapatite-zirconia coatings prepared by magnetron sputtering. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22: 104-110.
- Dinda, G. P.; Shin, J.; Mazumder, J. (2009). Pulsed laser deposition of hydroxyapatite thin films on Ti-6Al-4V: Effect of heat treatment on structure and properties. *Acta Biomaterialia*, 5: 1821–1830.
- Esguerra Arce, J.; Esguerra Arce, A.; Aguilar, Y.; Yate, L.; Moya, S.; Rincón, C.; Gutiérrez, O. (2016). Calcium phosphate-calcium titanate composite coatings for orthopedic applications, *Ceramics International*, 42: 10322-10331.
- Grandia, G.; Heitz, C.; Dos Santos, L. A.; Silva, M. L.; Sant’ana Filho, M.; Miranda Pagnocelli, R.; Nascimento Silva, D. (2011). Comparative histomorphometric analysis between α -TCP cement and β -TCP/HA granules in the bone

- repair of rat calvaria. *Materials Research*, 14(1): 11-16.
- Goyenvallea, E.; Aguad, E.; Nguyen, J. M.; Passuti, N.; Guehenec, L. L.; Layrolle, P.; Daculsi, G. (2006). Osteointegration of femoral stem prostheses with a bilayered calcium phosphate coating. *Biomaterials* 27: 1119–1128.
- Harle, J.; Kim, H. W.; Mordan, N.; Knowles, J. C.; Salih, V. (2006). Initial responses of human osteoblasts to sol-gel modified titanium with hydroxyapatite and titania composition. *Acta Biomaterialia*, 2: 547–556.
- Holmberg, K.; Laukkanen, A.; Ronkainen, H.; Wallin, K.; Varjus, S. A. (2003). Model for stresses, crack generation and fracture toughness calculation in scratched TiN-coated steel surfaces. *Wear* 254: 278–291
- Hong, Z.; Luan, L.; Paik, S. B.; Deng, B.; Ellis, D. E.; Ketterson, J. B.; Mello, A.; Eon, J. G.; Terra, J.; Rossi, A. (2007). Crystalline hydroxyapatite thin films produced at room temperature - An opposing radio frequency magnetron sputtering approach. *Thin Solid Films*, 515: 6773–6780.
- Huracek, J.; Spirig, P. (1994). The effect of hydroxyapatite coating on the fixation of hip prostheses. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 113 : 72 – 77.
- Kubásek, J.; Vojtěch, D.; Jablonská, E.; Pospíšilová, I.; Lipov, J.; Ruml, T. (2016). Structure, mechanical characteristics and *in vitro* degradation, cytotoxicity, genotoxicity and mutagenicity of novel biodegradable Zn-Mg alloys. *Materials Science and Engineering C*, 58: 24–35.
- Liu, D. M.; Yang, Q.; Troczynski, T. (2002). Sol-gel hydroxyapatite coatings on stainless steel substrates. *Biomaterials*, 23: 691–698.
- Martín-Cameána, A.; Jos, A.; Mellado-García, P.; Iglesias-Linares, A.; Solano, E.; Cameán, A. M. (2015). *In vitro* and in vivo evidence of the cytotoxic and genotoxic effects of metal ions released by orthodontic appliances: A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 40: 86–113.
- Mcentire, B. J.; Bal, B. S.; Rahaman, M. N.; Chevalier, J.; Pezzoti, G. (2015). Ceramics and ceramics coatings in orthopaedics. *Journal of the European Ceramic Society*, 35: 4327-4369.
- Nelea, V.; Ristoscu, V.; Chiritescu, C.; Ghica, C.; Mihailescu, I. N.; Pelletier, H.; Mille, P.; Cornet, A. (2000). Pulsed laser deposition of hydroxyapatite thin films on Ti-5Al-2.5Fe substrates with and without buffer layers. *Applied Surface Science*, 168: 127-131.
- Núñez, C.; Roca, A.; Jorba, J. (2012). *Comportamiento mecánico de los materiales*. Volumen 1: Conceptos fundamentales. 2ª ed. Barcelona: Publicaciones Universidad de Barcelona.
- Ohtsu, N.; Abe, C.; Ashino, T.; Semboshi, S.; Wagatsuma, K. (2008). Calcium-hydroxide slurry processing for bioactive calcium-titanate coating on titanium. *Surface & Coatings Technology*, 202: 5110–5115.
- Ozeki, K.; Janurudin, J. M.; Aoki, H.; Fukui, H. (2007). Photocatalytic hydroxyapatite/titanium dioxide multilayer thin film deposited onto glass using an rf magnetron sputtering technique. *Applied Surface Science*, 253: 3397–3401.
- Park, J. W.; Tustusmi, Y.; Lee, C. S.; Park, C. H.; Kim, Y. J.; Jang, J. H.; Khang, D.; Im, Y. M.; Doi, H.; Nomura, N.; Hanawa, T. (2011). Surface structures and osteoblast response of hydrothermally produced CaTiO₃ thin film on Ti-13Nb-13Zr alloy. *Applied Surface Science*, 257: 7856–7863.
- Porter, A. E.; Taak, P.; Hobbs, L. W.; Coathup, M. J.; Blunn, G. W.; Spector, M. (2004). Bone bonding to hydroxyapatite and titanium surfaces on femoral stems retrieved from human subjects at autopsy. *Biomaterials*, 25: 5199–5208.
- Protocolo de Lonza. (2016). Recuperado de http://bio.lonza.com/uploads/tx_mwaxmarketingmaterial/Lonza_ManualsProductInstructions_TechSheet_-

Human_Osteoblast_Cell_System_NHOst.pdf

- Quan, R.; Tang, Y. ; Huang, Z.; Xu, J.; Wu, X.; Yang, D. (2013). Study on the genotoxicity of HA/ZrO₂ composite particles *in vitro*. *Materials Science and Engineering C*, 33: 1332–1338.
- Silva, C. C.; Thomazini, D.; Pinheiro, A. G.; Aranha, N.; Figueiró, S. D.; Góes, J. C.; Sombra, A. S. (2011). Collagen–hydroxyapatite films: piezoelectric properties. *Materials Science and Engineering*, B86 : 210–218.
- Stanishevsky, A. V.; Holliday, S. (2007). Mechanical properties of sol–gel calcium titanate bioceramic coatings on titanium. *Surface & Coatings Technology*, 202: 1236–1241
- Surmeneva, M. A.; Mukhametkaliyev, T. M.; Tyurin, A. I.; Teresov, A. D.; Koval, N. N.; Pirozhkova, T. S.; Shuvarin, I. A.; Shuklinov, A. V.; Zhigachev, A. O.; Oehr, C.; Surmenev, R. A. (2015). Effect of silicate doping on the structure and mechanical properties of thin nanostructured RF magnetron sputter-deposited hydroxyapatite films. *Surface & Coatings Technology*, 275: 176–184.
- Tang, H.; Wang, F. (2013). Synthesis and properties of CaTiO₃-containing coating on AZ31 magnesium alloy by micro-arc oxidation. *Materials Letters*, 93: 427–430.
- Velasco-Ortega, E.; Jos, A.; Cameán, A. M.; Pato-Mourelo, J.; Segura-Egea, J. J. (2010). *In vitro* evaluation of cytotoxicity and genotoxicity of a commercial titanium alloy for dental implantology. *Mutation Research*, 702: 17–23.
- Webster, T. J.; Ergun, C.; Doremus, R. H.; Lanford, W. A. (2003). Increased osteoblast adhesion on titanium-coated hydroxylapatite that forms CaTiO₃. *Journal of Biomedical Materials Research Part A: Applied Biomaterials*, 67A: 975 – 980.
- Wiff, J. P.; Fuenzalida, V. M.; Arias, J. L.; Fernandez, M. S. (2007). Hydrothermal–electrochemical CaTiO₃ coatings as precursor of a biomimetic calcium phosphate layer. *Materials Letters*, 61: 2739–2743.
- Zhen-Jun, W.; Li-Ping, H.; Zong-Zhang, C. (2006). Fabrication and characterization of hydroxyapatite/Al₂O₃ biocomposite coating on titanium. *Trans. Nonferrous Met. SOC. China* 16: 259-266.

Estimación del volumen de un Biodigestor tipo balón usando redes neuronales artificiales

Estimate of the kind-ball biodigester's volume using artificial neural networks

Recibido: 18-11-2015 Aceptado: 29-04-2016

Victor Hugo Tabarquino Muñoz²
Luis Octavio González Salcedo³
Adrian Luis Ernesto Will⁴

¹ Artículo producto del Proyecto "Estimación de Parámetros de Diseño de un Biodigestor Tipo Balón usando Redes Neuronales Artificiales". Trabajo de Grado (Ingeniero Agrícola), Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Agosto – Diciembre 2014, Palmira.

² Colombiano, Ingeniero Agrícola, Grupo de Energías Alternativas y Ahorro Energético – GEAL, Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira – Colombia.

³ Colombiano, PhD. Ingeniería de Materiales, Profesor Asociado, Grupo de Energías Alternativas y Ahorro Energético – GEAL, Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira – Colombia. ⁴Autor de correspondencia: logonzalezsa@unal.edu.co

⁴ Argentino, PhD. Matemáticas, Profesor Adjunto, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, y Grupo de Investigación en Tecnologías Informáticas Avanzadas – GITIA, Tucumán – Argentina.

Resumen

La biomasa como fuente alterna de energía puede ser convertida en biogás producido a partir de la digestión anaeróbica de materia orgánica. Para tal fin se usa un compartimiento denominado biodigestor, y diversos protocolos se han definido para la estimación de su volumen y del biogás obtenido, usando una combinación de tablas para el origen de la fuente de la biomasa, ecuaciones que involucran variables como la temperatura ambiente, la carga de la masa biológica y el tiempo de retención. El tratamiento de residuos de materia orgánica y la sistematización de dicha actividad en granjas pecuarias, requiere la intervención de expertos o la utilización de sistemas inteligentes que permitan involucrar variables tanto cualitativas como cuantitativas. En el presente trabajo se estima el volumen de un biodigestor tipo balón, usando redes neuronales artificiales (RNA), las cuales son entrenadas para condiciones generales de generación de residuos por actividades pecuarias y agrícolas. Para evaluar la confiabilidad en la estimación, se usó como indicador de desempeño de la RNA el factor de correlación R. Los resultados muestran que la estimación usando la técnica elaborada es confiable y puede ser usada de manera generalizada.

Palabras Clave: energías alternativas; biomasa; biodigestor; inteligencia artificial; redes neuronales artificiales.

Abstract

Biomass, as an alternative source of energy, can be converted into biogas through the anaerobic digestion of organic material. The device used for this purpose is called biodigester, and several protocols have been studied aimed at estimating the volume and quantity of the gas obtained. These protocols use a combination of the origin

of the biomass and equations involving environment temperature, biological load and retention time. The treatment of organic residues and the systematization of the activity on livestock farms requires the intervention of expert users or the implementation of intelligent systems, which allow for quantitative and qualitative variables. In this paper, we use Artificial Neural Networks (ANN) to estimate the production volume of a bio-digester ball. The networks are designed for this use on both livestock and farming residues. The efficiency of the estimation is evaluated using R Correlation Coefficient. Results show that the technique is reliable and can be used in practice.

Keywords: alternative energy; biomass; bio-digester; artificial intelligence; artificial neural networks.

Introducción

Las fuentes de energía alternas, renovables o blandas, en contraposición de las provenientes de los hidrocarburos, destacan a la energía solar, la energía eólica, la biomasa, la energía hidráulica, la energía maremotriz, entre otras (Correa, 2007). La biomasa, cantidad de productos obtenidos por fotosíntesis, es susceptible de ser transformada en combustible, y puede provenir de los residuos de actividades pecuarias y agrícolas (Rodríguez et al., 2013).

La actividad pecuaria produce residuos de materia orgánica, y cada especie pecuaria es una fuente de esta comúnmente conocida con el término de estiércol, e incluso las heces del hombre han sido consideradas como fuente energética (González, 2010). Por su parte, la actividad agrícola produce residuos, principalmente del tipo cáscaras de frutas, de semillas, hojas, y frutas en descomposición. Ambos residuos son llamados biomasa agrícola (González, 2010).

La biomasa agrícola se convierte en un combustible tradicional, el biogás, el cual corresponde a una mezcla de metano y otros gases producidos durante la degradación anaerobia de la materia orgánica, en un compartimiento digestor o bien canalizándolo en un vertedero controlado (FAO, 2011). En el primer caso, denominado biodigestor, la temperatura es mantenida alrededor de 50 °C, un pH entre 6,2-8,0, favoreciendo las actividades de los microorganismos y la degradación bioquímica entre 10-25 días, para que en tres fases (acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) se realice la producción de biogás (FAO, 2011).

Diversos Autores citados por (Olaya & González 2009, pp 8-10), consideran dentro del proceso una fase inicial a las mencionadas, denominada como hidrólisis; la figura 1 resume las distintas características de cada una de las diferentes etapas, agrupadas con sus respectivos compuestos químicos que en ellos intervienen (Martí, 2008, Olaya & González, 2009, p.10).

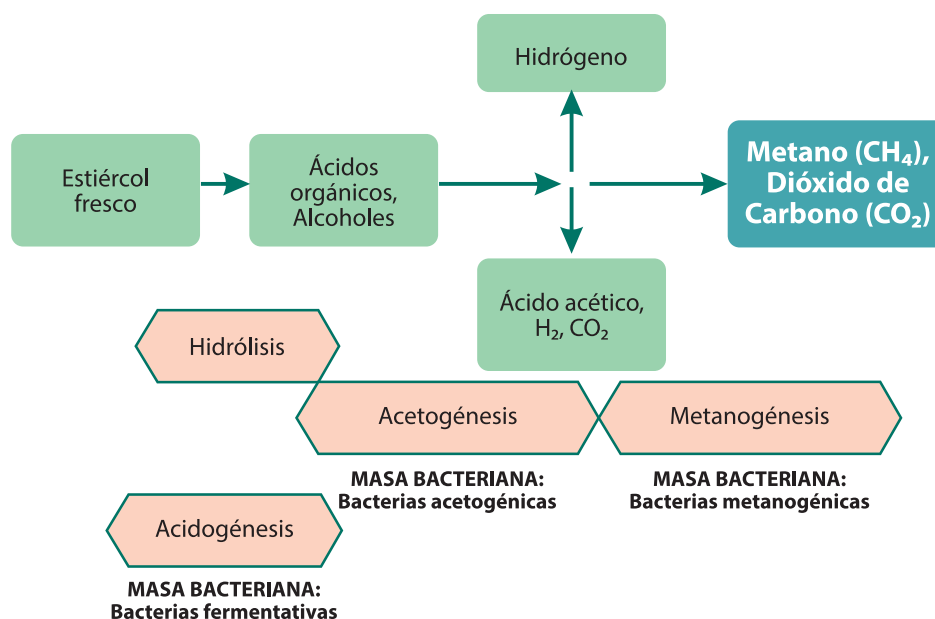


Figura 1. Síntesis de las etapas presentes en la digestión anaeróbica
Fuente: (Martí, 2008; Olaya y González, 2009).

La instalación de biodigestores son también sistemas para el tratamiento de residuos de materia orgánica, los cuales son evitados sus vertimientos en las fuentes de agua, que a su vez generan un combustible, generalmente utilizado para calefacción de espacios y cocción de alimentos, y en los últimos años, como combustible en plantas utilitarias de generación eléctrica (González, 2011).

Los biodigestores son de tres tipos (Olaya & González, 2009): tubular o tipo balón, de cúpula fija, y de cúpula móvil; la instalación de los dos últimos es de mayor costo, en razón a que son construidos con elementos de mampostería o de hormigón, mientras que el de tipo balón (Figura 2), es elaborado a partir de láminas plásticas tubulares comercialmente disponibles, y se reportan casos exitosos de instalación por parte de la misma comunidad (Moncayo, 2008).



Figura 2. Biodigestor tipo balón o tubular
Fuente: (González, 2010).

Cobra pertinencia entonces, la búsqueda de elementos y técnicas que permitan sistematizar el proceso de producción de biogás para potenciar el uso de este combustible, principalmente, en comunidades rurales. Sin embargo, los protocolos de diseño de los biodigestores combinan el uso de tablas que contienen las capacidades energéticas acordes al origen de la fuente de la biomasa, y ecuaciones para estimar el volumen del biodigestor y de biogás producido, involucrando variables cualitativas y cuantitativas en dicho proceso (Martí, 2008).

Al respecto, Martí (2008, p.31), basado en una fundamentación teórica, propone una metodología de diseño para estimar el volumen de biogás y del biodigestor tipo balón, válida para cualquier piso térmico, como se muestra en la Figura 3.

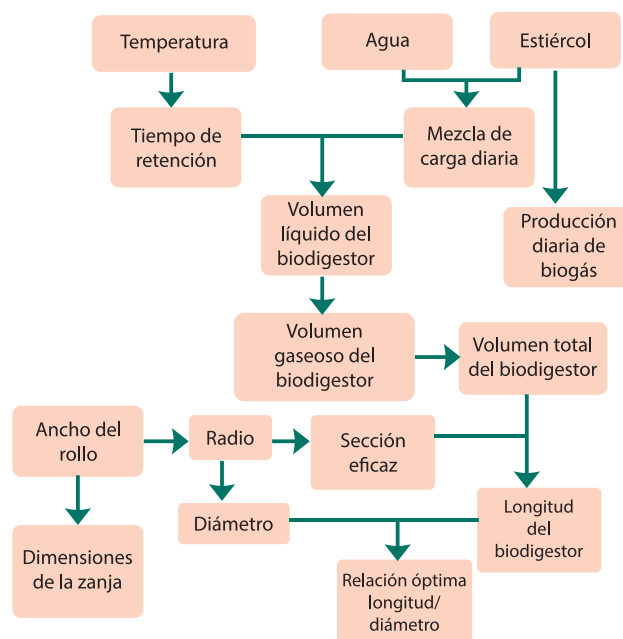


Figura 3. Propuesta metodológica para el diseño de biodigestores tipo balón
Fuente: Martí, 2008, p.31

Por su parte, la inteligencia artificial, término acuñada en 1960 por Minsky, quien en su sentido más amplio indica la capacidad de un artefacto de realizar los mismos tipos de funciones que caracterizan el pensamiento humano, y en estos términos, sus métodos son una respuesta al deseo de aproximar el comportamiento y el pensamiento humano a diversos sistemas para la solución de determinadas problemáticas (Cagnina, 2010). Uno de estos métodos son las redes neuronales artificiales (RNA), abstracción funcional de la estructura neuronal biológica del sistema central nervioso (Figura 4), recreando desde la perspectiva biológica la estructura de un cerebro humano (Bishop, 2006).

Las RNA hoy en día son consideradas como poderosas reconocedoras y clasificadoras de patrones (Bishop, 2006), utilizadas en la solución (predicción) de problemas de ingeniería, como una alternativa en sistemas complejos caracterizados por factores de interacción, en sistemas de aproximaciones estadísticas no lineales, o en sistemas de solución computacional basados en algoritmos complejos y extensos (Haykin, 2005), que involucrarían variables cuantitativas y cualitativas, y que en estas últimas, relacionarlas en un modelo matemático se hace difícil.

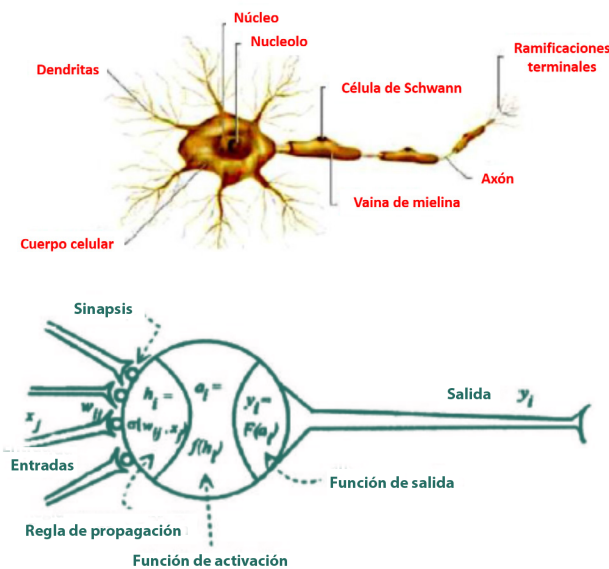


Figura 4. Similitud entre una neurona biológica y una computacional, a partir de la comparación de las estructuras biológicas y computacionales, respectivamente
Fuente: (Isasi, 2007; Bertona, 2005).

En su contexto histórico, las RNA se iniciaron como una red monocapa, denominada Perceptrón Simple que solo podía realizar soluciones de algunas funciones lógicas, como OR, AND y NOT, sin estimaciones numéricas. Posteriormente, su desarrollo permitió estimaciones numéricas, siendo conocida como red ADALINE. Hoy en día, muchos problemas en la ingeniería son abordados a partir de redes con diversas capas, y reciben el nombre de Perceptrón Multicapa, con un procedimiento supervisado de aprendizaje, es decir, se entrenan a partir del error de aproximación contra los verdaderos resultados (Bishop, 2006).

En el presente trabajo, se procede a la elaboración de una RNA Multicapa con entrenamiento supervisado y ajuste del error hacia atrás, entrenada para la estimación del volumen de un biodigestor tipo balón, para condiciones generales de temperatura ambiental y origen de la fuente de la biomasa.

Procedimiento metodológico

Construcción del conjunto de entrenamiento de la red neuronal artificial

Para el entrenamiento de la RNA se prepara una base de datos conformada por patrones o vectores de información, que le permitan al modelo de predicción hacer

el reconocimiento de las relaciones que existen entre las neuronas (variables) de entrada que conllevan al resultado de la neurona a predecir (variable de salida). Para tal fin, de acuerdo con el protocolo de diseño de biodigestores propuesto por Martí, (Figura 3), se hace una selección de variables de entrada relevantes en el problema de determinación del volumen de un biodigestor tipo balón.

Estas son las siguientes: origen de la fuente del residuo orgánico [OF], temperatura ambiente en °C [T], tiempo de retención de la materia orgánica dentro del biodigestor en días [t], carga de estiércol de acuerdo con la fuente en l/día [C], contenido de sólidos orgánicos del residuo orgánico en % [%SO], producción de biogás de acuerdo con el contenido de sólidos orgánicos en m³/kg de %SO [PBG], y perímetro tubular del plástico comercialmente disponible para la construcción del biodigestor en m [P]. Como variable de salida, se asocia a esta información para cada patrón el volumen del biodigestor tipo balón en m³ [V].

La variable OF corresponde a una variable cualitativa, la cual es tratada como variable cuantitativa jerarquizada, procedimiento que consiste en convertir una variable simbólica o de valor discreto en una variable pseudo-discreta, y en el cual, a partir de un orden establecido de posición jerárquica de la respuesta de la variable discreta, se establecen sub-intervalos para cada neurona binaria, 0 a 1, como es descrito por March, 2001.

Posterior a la determinación de las variables de entrada y de salida, se realiza la elaboración de la base de datos general con el cual se determina el conjunto de entrenamiento, conformado por 90 vectores de información (variables de entrada y de salida), usando el protocolo de diseño de biodigestores tipo balón presentado por (Martí, 2008).

Elaboración, entrenamiento, puesta en marcha, validación y selección de la red neuronal artificial para la estimación del volumen del biodigestor tipo balón

Se usa el conjunto de entrenamiento mencionado en la sección 2.1., en el cual se relacionan las variables de entrada con la variable de salida, se elabora una propuesta de RNA multicapa alimentada hacia adelante y con metodología de entrenamiento/aprendizaje hacia atrás (Figura 5), cuyas características son definidas por Rumelhart et al., 1986; Hinton 1987, 1988, respectivamente.

Las conexiones entre las neuronas de la capa de entrada a cada capa oculta, se hace usando la función sigmoidea descrita por Hinton, 1987, 1988; las conexiones entre las neuronas de la última capa oculta y la neurona a estimar ubicada en la capa de salida, se hace usando una función lineal, de tal forma que se permita la comparación de la estimación y del resultado verdadero, como es descrito en el entrenamiento supervisado (Rumelhart et al., 1986, y Hinton 1987, 1988).

Para tal fin, Tabarquino, 2014, elaboró 82 conformaciones de RNA, y las evaluó a partir del factor de correlación lineal R; para su funcionamiento computacional, la RNA se codificó en un algoritmo usando el lenguaje de programación M, propio de la herramienta de software matemático MATLAB® para plataforma Windows®, el código usó la librería contenida en el Neural Networks Toolbox del mismo software, lo cual permitió implementar los modelos del tipo de RNA que se ha descrito.

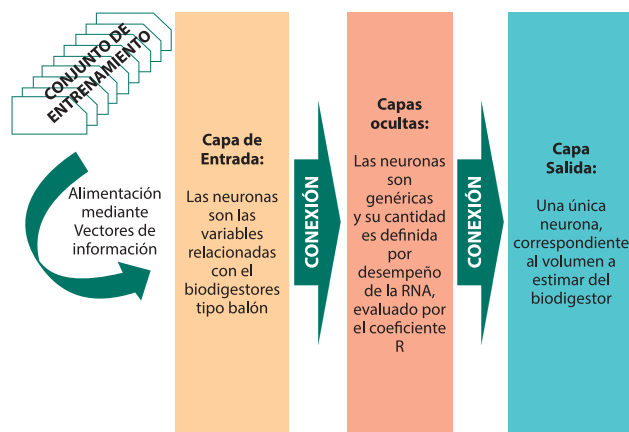


Figura 5. Propuesta de modelo neuronal para la estimación del volumen de un biodigestor tipo balón
Fuente: los autores.

Los resultados de este proceso, no presentado en este artículo, mostraron que arquitecturas con dos y tres capas ocultas, y usando métodos de aprendizaje de Levenberg-Marquardt, Gradiente Conjugado de Cuasi-Newton, Gradiente Conjugado Clásico, Gradiente Conjugado de Powell-Beale, Gradiente Conjugado de Fletcher-Powell, Gradiente Conjugado de Pollak-Ribière, Secante de Paso Unitario, y Gradiente Descendiente de Tasa de Entrenamiento Variable, obtuvieron mejores, adecuados y confiables desempeños ($R > 0,98$), que usando los métodos de Regulación Bayesiana, y Propagación Resiliente hacia Atrás. La arquitectura de la RNA se configura entonces con una capa de entrada con 7 variables de entrada, una primera capa oculta con 20 neuronas, una segunda capa oculta con 10 neuronas, una capa de salida con una variable

de respuesta y un algoritmo de aprendizaje hacia atrás de Levenberg-Marquardt (Figura 6).

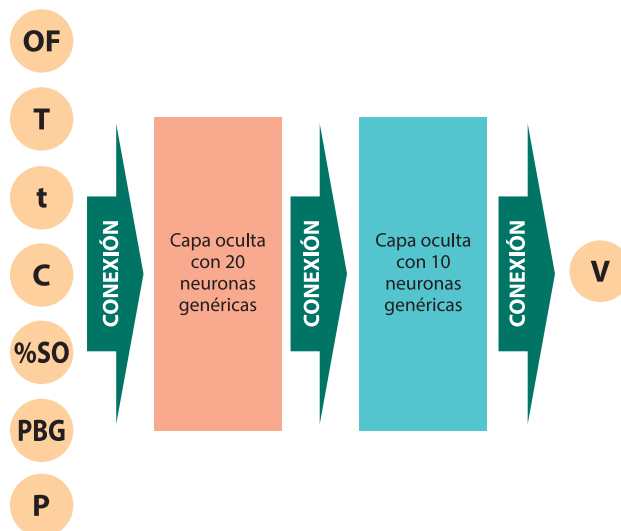


Figura 6. Arquitectura y topología de la RNA seleccionada para la estimación del volumen de un biodigestor
Fuente: los autores.

Resultados y discusión

A partir de la elaboración de una RNA, correspondiente a un red neuronal supervisada Perceptrón Multicapa, con alimentación hacia adelante y entrenamiento/aprendizaje para la propagación del error hacia atrás, se realizó la estimación del volumen de un biodigestor tipo balón. El modelo neuronal consistió de una RNA conformada por una capa de entrada con 7 variables de entrada (de las cuales una es de tipo cualitativa con tratamiento a variable numérica jerarquizada), una primera capa oculta con 20 neuronas, una segunda capa oculta con 10 neuronas, una capa de salida con una variable de respuesta correspondiente a la estimación del volumen del biodigestor tipo balón, y algoritmo de aprendizaje de Levenberg-Marquardt.

La Figura 7, muestra los resultados de desempeño de la RNA seleccionada, para cada una de las etapas de entrenamiento de la misma (entrenamiento, prueba, validación computacional, y con todo el conjunto de entrenamiento). Para todas las etapas, se hace una comparación entre el resultado obtenido por la RNA (output) y el valor obtenido usando el protocolo de diseño (target), para lo cual se asocia a dicha comparación el factor de correlación lineal R.

El desempeño se basó en el factor de correlación lineal R ($R > 0,99$), de acuerdo con Ascombe, 1973, y Aschen, 1982, muestran una relación lineal positiva fuerte entre el valor del volumen del biodigestor obtenido, a partir

del protocolo de diseño propuesto por Martí, 2008, y el obtenido mediante la predicción de la RNA, lo cual permite inferir que la herramienta computacional es adecuada y confiable para hacer dichas estimaciones.

En la Figura 8, se representan simultáneamente los resultados estimados por la RNA, y los obtenidos por el protocolo de diseño de Martí, 2008, con el fin de verificar

la bondad en el ajuste de la predicción, a partir de la comparación gráfica entre los dos resultados, como es sugerido por Martínez (2005, p.22). La corroboración para cada registro en la aproximación del resultado obtenido por predicción, permite inferir que el modelo computación basado en la RNA puede ser usado como metodología de diseño de biodigestores tipo balón.

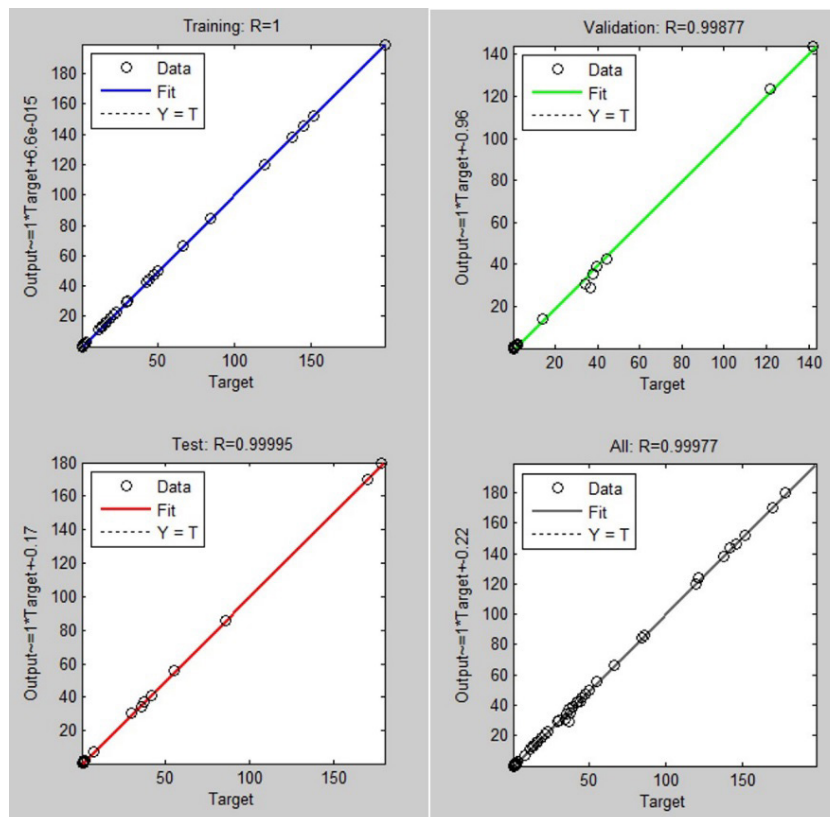


Figura 7. Resultados de desempeño de la RNA seleccionada para la estimación del volumen del biodigestor tipo balón
Fuente: los autores

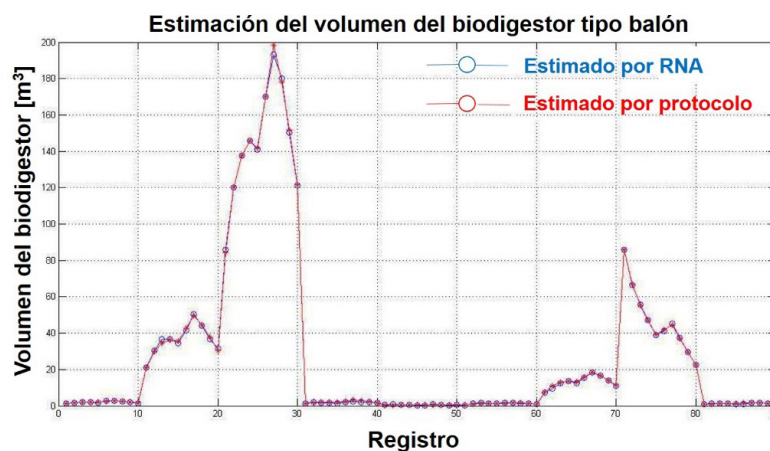


Figura 8. Comparación gráfica de los resultados entregados por la Red Neuronal Artificial y los obtenidos por protocolo de diseño
Fuente: los autores

La literatura reporta el uso de RNA en el diseño de sistemas de aprovechamiento de energías alternativas, como solar (Gandolfo et al., 2011, González, 2013), eólica (López et al., 2007) e hidráulica (Villada et al., 2008); sin embargo, no se reportan aplicaciones similares en el diseño de biodigestores, razón por la cual la utilización de modelos neuronales artificiales en dicho campo es una aplicación novedosa.

Conclusiones y recomendaciones

Una red neuronal artificial fue elaborada para la estimación del volumen de biogidestores tipo balón, la cual generaliza adecuadamente los resultados que se obtienen en los protocolos convencionales de diseño. Los resultados obtenidos permiten trazar las siguientes conclusiones y recomendaciones para futuras agendas:

El indicador de desempeño considerado, el factor de correlación lineal, muestra que la red neuronal artificial es confiable para la estimación del volumen del biodigestor, acorde a los resultados que se obtendrían con los métodos convencionales de diseño.

La consideración en el modelo neuronal de variables que representan la fuente de origen del residuo de la materia orgánica, y variabilidad en los factores influyentes como la temperatura ambiente y el tiempo de retención, permiten tener una herramienta de predicción universal del volumen de un biodigestor tipo balón.

La red neuronal artificial permite considerar entonces, una variable cualitativa, lo cual aventaja en este caso en particular, a otros modelos matemáticos para fines similares.

La red neuronal artificial puede potenciar su uso como herramienta computacional para procesos de sistematización en las actividades agropecuarias que generen residuos de materia orgánica encaminadas a la producción de biogás como combustible alternativo.

La posibilidad de controlar las variables de entrada, permite hacer ajustes a las mismas, de acuerdo con dinámicas propias de la generación de residuos, mediante nuevos entrenamientos y aprendizajes de la propia red neuronal artificial.

Se abre una agenda futura de investigación, al extender el modelo neuronal para el diseño de otros tipos de biodigestores, y la utilización de la biomasa como fuente alterna de energía para la producción de biogás.

Referencias

- Achen, C.H. (1982). *Interpreting and Using Regression*. Series/Number 07-029, Sage University Paper. Sage Publications, Newbury Park (CA). 89p. ISBN: 0-8039-1915-8.
- Ascombe, T.W. (1973). Graphs in Statistical Analysis. *The American Statistician*, (27): 17-21.
- Bertona, L.F. (2005). *Entrenamiento de Redes Neuronales basado en Algoritmos Evolutivos*. Tesis (Ingeniería Informática). Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Buenos Aires, 256p.
- Bishop, C.M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, Singapore, 803p. ISBN: 978-0387-31073-2.
- Cagnina, L.C. (2010). Un nuevo paradigma Computacional basado en una antigua investigación biológica. *Fundamentos en Humanidades*, 11 (1:21): 133-150.
- Correa H., N. (2007). *Fuentes Alternas de Energía*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente. Medellín. 198p.
- FAO. (2011). Manual de Biogás. Proyecto CHI/00/32 Chile: *Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables*, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – FAO. Santiago de Chile, 119p. ISBN: 978-95-306892-0.
- Gandolfo, D.C.; Molina, M.G.; Patiño, H.D. (2011). *Estimación de la energía generada por sistemas fotovoltaicos mediante redes neuronales artificiales*. Memorias del Cuarto Congreso Nacional y Tercer Congreso Iberoamericano Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía – HYFUSEN 2011. Ponencia 11-075. Mar de Plata, Junio 6-11.
- González I., G.I. (2011). *Planificación y Evaluación Económica, Financiera y de Impacto Ambiental de la Instalación de un Biodigestor en un Criadero de Cerdos*. Trabajo Final (Ingeniero Agrónomo). Universidad Nacional de Río Cuarto,

- Facultad de Agronomía y Veterinaria. Río Cuarto, 78p.
- González R., A.F. (2013). *Modelo para la predicción de la radiación solar a partir de redes neuronales artificiales*. Trabajo de Grado (Ingeniero Mecatrónico), Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado, 80p.
- González S., L.O. (2010). *Lectura de Introducción a las Fuentes Alternas de Energía y su Aplicación en la Explotación Agropecuaria*. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira, 27p.
- Haykin, S. (2005). *Neural Networks, a Comprehensive Foundation*. 2nd Edition. Pearson Prentice Hall, Delhi, 823p. ISBN: 81-7808-300-0.
- Hinton, G.E. (1987). *Connectionist Learning Procedures*. Technical Report CMU-CS-87-115. Computer Science Department, Carnegie-Mellon University, Pittsburg, 58p.
- Hinton, G.E. (1988). *Connectionist Learning Procedures*. *Artificial Intelligence*, 40 (1-3): 185-234.
- Isasi V., P. (2007). *Redes de Neuronas*. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Informática, Madrid, 59p.
- López A., P.; Velo S., R.; Maseda E., F. (2007). *Estimación de la velocidad del viento mediante redes neuronales*. Memorias del XI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Lugo, Septiembre 26-28, 1083-1092.
- Martínez R., E. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario Jurídico y Económico Escurialense*, (38): 315-332.
- Minsky, M. (1960). *Steps toward Artificial Intelligence*. Department of Mathematics, Research Laboratory of Electronics, MIT, 65p.
- Moncayo R., G.; (2008). *Biodigestores: Dimensionamiento, Diseño y Construcción de Biodigestores y Plantas de Biogás*. AquaLimpia Beratende Ingenieure. Madrid, 750p. ISBN: 978-9942-01-719-2.
- Olaya A., y.; González S., L.O. (2009). *Fundamentos para el Diseño de Biodigestores*. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira, 32p.
- Rodríguez S., J.; González S., L.O.; Rojas G., A.F.; Palacios P., J.A. (2013). *Energía y Ambiente*. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira, 380p. ISBN: 978-958-761-596-8.
- Tabarquino M., V.H. (2014). *Estimación de parámetros de diseño de un biodigestor tipo balón usando redes neuronales artificiales*. Trabajo de Grado (Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Facultad de Ingeniería y Administración, Palmira, 84p.
- Villada. F.; Cadavid, D.R.; Molina, J.D. (2008). Pronóstico del precio de la energía eléctrica usando redes neuronales artificiales. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, (44), junio: 111-118.

Diseño e implementación de un prototipo electrónico para monitoreo de parámetros físico-químicos en cultivo de tilapia a través de una aplicación móvil

Design and implementation of an electronic prototype for monitoring of physico-chemical parameters in tilapia crop through mobile application

Recibido: 30- 03 - 2016 Aceptado: 31-05-2016

Sergio A. Dussán¹
Oscar Vanegas²
Adrian F. Chavarro³
Johan J. Molina⁴

¹ Colombiano. Ingeniero Electrónico. Universidad Surcolombiana Neiva. Correo electrónico: Checho260790@gmail.com

² Colombiano. Ingeniero Electrónico. Universidad Surcolombiana Neiva. Correo electrónico: Oscarvanegas89@hotmail.Com

³ Colombiano. Master en Ingeniería de control industrial. Líder línea de E. y T. Tecnoparque Sena Neiva. Correo electrónico: achavarroc@sena.edu.co

⁴ Colombiano. Master en Aplicaciones Móviles. Universidad Surcolombiana Neiva. Avenida Pastrana Carrera 1ª. Correo electrónico: julian.molina@usco.edu.co

Resumen

En los estanques de agua dulce para cultivo de tilapia, especialmente en su etapa de engorde, se presenta un alto índice de mortalidad de peces. Debido a lo anterior, fue diseñado e implementado un prototipo electrónico para monitorear los parámetros físico-químicos como temperatura y oxígeno disuelto del agua, con el fin de identificar los momentos críticos del cultivo. Las pruebas en campo se realizaron en la granja piscícola "Pezcomsi", ubicada en el municipio de Campoalegre, en el departamento del Huila (Colombia). El prototipo cuenta con un sistema de adecuación de las señales para los sensores, las cuales llegan al microprocesador ATMEGA 328P, que realiza el proceso de adquisición y conversión de datos análogos a digitales para su procesamiento y almacenamiento en una memoria microSD. A través del módulo Bluetooth HC-05, estos datos son enviados a la interfaz gráfica soportada en una aplicación móvil, en donde el usuario puede visualizar el comportamiento de las variables en el cultivo. El sistema es alimentado por medio de paneles solares y presenta porcentajes de error bajo comparados con patrones estándar, por lo que se considera una herramienta electrónica de monitoreo confiable. Con este sistema se espera contribuir a la disminución de índices de mortalidad de la tilapia, debido a cambios bruscos de temperatura y oxígeno disuelto que se presentan diariamente en los estanques; además, los resultados encontrados muestran una disminución en la concentración de oxígeno disuelto que podría ser objeto de estudio posterior.

Palabras clave: dispositivo electrónico, innovación, piscicultura.

Abstract

In freshwater ponds for tilapia crop in its fattening stages, a high mortality rate of fish is presented. Because of this, an electronic prototype to monitor physicochemical parameters such as temperature and dissolved oxygen of the water was designed and implemented in order to identify the critical moments of the crop. Field tests were conducted on the fish farm PEZCOMSI, located in the municipality of Campo alegre, in the department of Huila ((Colombia)). The prototype has a system of adequacy of the sensor signals, which are read by the microprocessor ATMEGA 328P, the Analog to digital conversion data is used for processing and storage on a microSD memory . Through the HC-05 Bluetooth module this info is sent to the GUI supported on a mobile application where the user can visualize the crop's behavior. The system is powered by solar panels and has low error rates compared to standard patterns, so it is considered a reliable electronic monitoring tool. This system is expected to contribute to lower mortality rates of tilapia due to sudden changes in temperature and dissolved oxygen, that are presented throughout the day in the ponds; moreover, the results show a decrease in dissolved oxygen concentration that could be subject to a further study.

Keywords: electronic prototype, novelty, fish farming, mobile application, remote sense.

Introducción

En estos tiempos donde la pobreza y el hambre van en aumento, existen sectores productivos con alto crecimiento, como las pesquerías y la acuicultura que está desempeñando un papel importante en la disminución de estos problemas. Estas actividades favorecen la generación de empleo, el mejoramiento de la salud y disminución de la pobreza, gracias a que el pescado es uno de los productos más comercializados a nivel mundial, del cual las familias de escasos recursos recogen su sustento diario (FAO, 2014). La acuicultura como actividad multidisciplinaria, constituye una empresa productiva que utiliza los conocimientos sobre biología, ingeniería y ecología, para ayudar a resolver el problema nutricional. Según la clase de organismos que se cultivan, se ha dividido en varios tipos, siendo uno de los más desarrollados la piscicultura o cultivo de peces (Cifuentes et al., 2000).

En varias regiones de Colombia se ha aprovechado el clima tropical y la gran cantidad de fuentes hidrológicas, para crear un importante número de granjas piscícolas, que tienen como nicho económico la crianza y producción de especies acuícolas (Anuario Gobernación del Huila, 2012). En la mayoría de las piscícolas ubicadas en el departamento del Huila se cultiva tilapia roja (*Oreochromis* sp), debido a que es una especie que tolera grandes variaciones de temperaturas, cuenta con un rápido crecimiento, es resistente a enfermedades y se adapta con mayor facilidad a condiciones adversas (Ezquivel et al, 2014).

Una de las problemáticas con que se encuentran los piscicultores con mayor frecuencia, es el alto índice de mortalidad, el cual llega a ser mayor al 20% (Rural, 2014). Esto se debe a que los acuicultores no cuentan con asesoría técnica que les ayude a mejorar el manejo de los cultivos, las prácticas administrativas y a disminuir los costos de producción, además, no se tiene el control de algunas variables del cultivo, ya sea por falta de presupuesto o conocimiento, debido a esto muchos prefieren seguir aplicando las técnicas tradicionales en el cultivo de tilapia para evitar subir sus costos (Palacio, 2015).

Existe una tendencia de crecimiento de la acuicultura al pasar de 9.2 toneladas en 1990 a 82.7 en 2011; es decir, un incremento del 12% anual promedio, superando por mucho la tasa media del crecimiento del resto del sector agropecuario y del conjunto total de la economía nacional. Del total de la producción acuícola lograda en el año 2011, las actividades piscícolas correspondientes al cultivo de tilapia roja y tilapia plateada aportaron el 58,5%. Siendo el departamento del Huila el mayor productor con 29.6 toneladas, seguido por los departamentos del Meta y Tolima (Merino et al., 2013).

Basados en que el departamento del Huila es uno de los principales productores de tilapia en el país (Merino et al., 2013), y que muchas piscícolas están siendo afectadas por los altos índices de mortalidad, debido a la falta de monitoreo en parámetros físicoquímicos del agua, el objetivo de este trabajo fue diseñar e implementar un sistema electrónico para monitorear parámetros físicoquímicos del agua en estanques de cultivo de tilapia roja. Con este sistema se busca facilitar las actividades diarias de monitoreo y ayudar a reducir la tasa de mortalidad de peces, así como los costos generados por los equipos utilizados.

Metodología

Se implementó un dispositivo electrónico para monitorear oxígeno disuelto y temperatura del agua en estanques de tierra ubicados en la piscícola “Pezcomsi” (latitud = 2,6907158; longitud = -75,305935) del municipio de Campoalegre en el departamento del Huila (Figura 1); este dispositivo funciona a través de energías renovables, por medio de un sistema fotovoltaico, ayudando a contrarrestar el calentamiento global y evitando el uso de energías convencionales que dependen de combustibles fósiles (Messenger & Ventre, 2010).

La implementación del dispositivo se realizó en estanques de tierra con un volumen de agua de 300 metros cúbicos (20x10x1.5), colocándose el instrumento de medida en la mitad del estanque, y los sensores de monitoreo a unos 80 centímetros de profundidad.

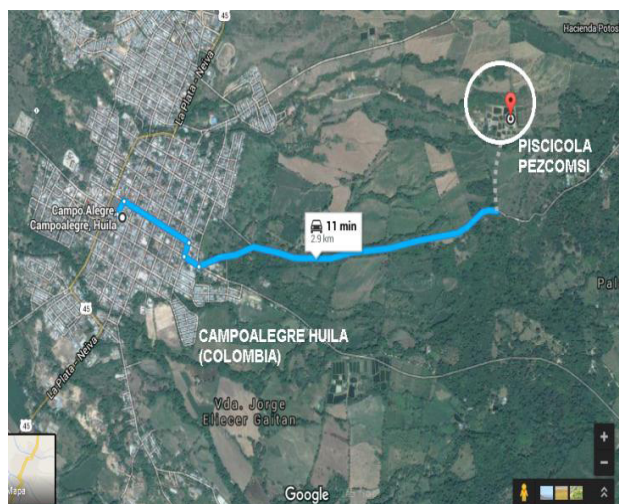


Figura 1. Ubicación Piscícola Pezcomsi, Municipio de campoalegre Huila.
Fuente: los autores

Los datos obtenidos por el dispositivo, se almacenaron en la memoria del mismo, y se enviaron a través de comunicación bluetooth a cualquier dispositivo móvil que tenga instalada la aplicación nativa desarrollada en Android donde el usuario podrá observar la información tanto numérica como gráficamente (Figura 2), y así poder realizar el respectivo análisis estadístico descriptivo.

El sistema de monitoreo contó con cuatro etapas: 1) alimentación, 2) adecuación de los sensores, 3) adquisición de datos y procesamiento de información, y 4) comunicación y visualización de datos (Figura 3).

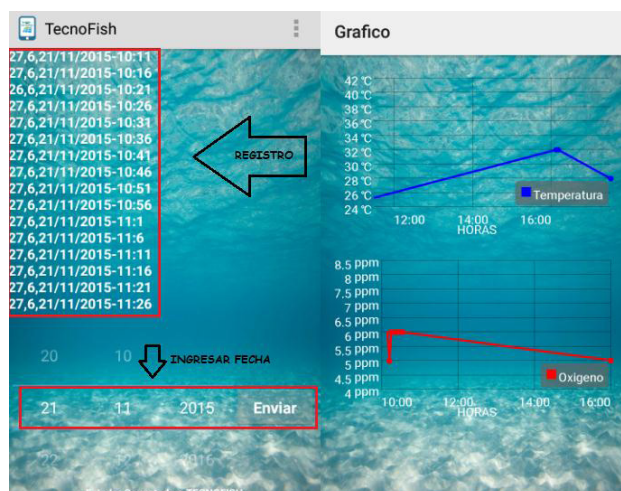


Figura 2. Interfaz gráfica del dispositivo electrónico
Fuente: los autores.

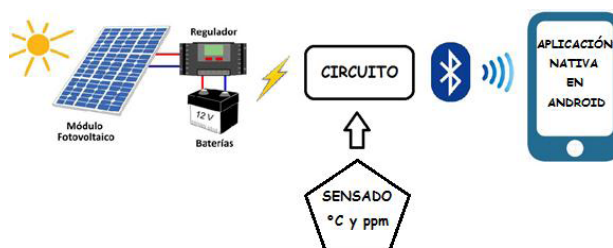


Figura 3. Diagrama general del sistema de monitoreo
Fuente: los autores

Etapas de alimentación

El sistema en esta etapa funcionó tal y como se muestra en la Figura 4, el cual se alimentó a través de un panel solar de 20W (Vatios), con un controlador de voltaje de 12V (Voltios) se unió a dos baterías de 6V y 4.2A-h (Amperios-Hora) conectadas en serie, llevando este voltaje de las baterías al circuito que se encargó de regular y distribuir los diferentes niveles de tensión, esto de acuerdo a los requerimientos del sistema.

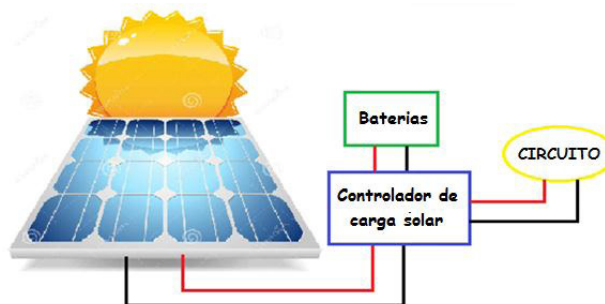


Figura 4. Diagrama etapa de alimentación
Fuente: los autores.

Etapa de Adecuación de los sensores

En esta etapa se utilizaron componentes y circuitería adicional para la adecuación de las señales provenientes de los sensores de temperatura y de oxígeno disuelto, con el fin de proveer las señales necesarias para que puedan ser procesadas por el microcontrolador (Figura 5).

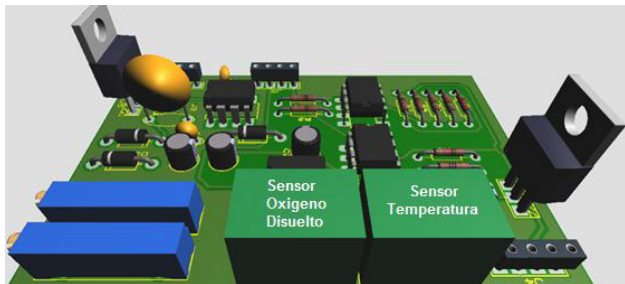


Figura 5. Circuito Adecuación de los sensores
Fuente: los autores.

Debido a que las señales provenientes de los sensores eran demasiado pequeñas, se amplificaron por medio del amplificador AD620, el cual a su vez requiere de una fuente dual para su funcionamiento; por lo cual se utilizaron los reguladores de voltaje 7805 y 7905 para obtener voltajes de 5V y -5V, respectivamente.

Sensor de Temperatura

Para monitorear la temperatura del sistema, se utilizó una RTD PT100, fabricada con platino, y posee una resistencia eléctrica de 100 ohmios a una temperatura de 0°C, a la cual se le realizó su respectiva adecuación (Figura 6).



Figura 6. RTD PT100
Fuente: los autores.

Debido a que la PT100 es una sonda resistiva, se buscó la forma de equilibrar y darle sensibilidad al sensor mediante un puente wheatstone, con el fin de evitar mediciones erróneas (Figura 7).

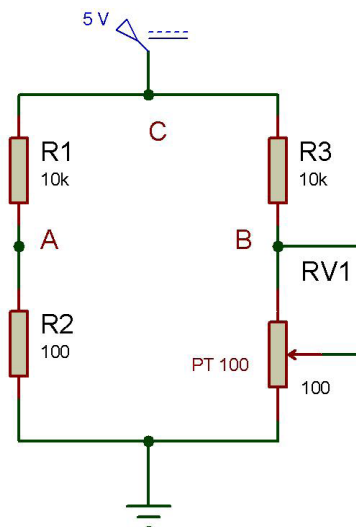


Figura 7. Puente wheatstone
Fuente: los autores.

Una vez que el sensor se encontró en una de las ramas del puente, se instaló el circuito fuente de corriente, el cual se conectó en el nodo C con el puente wheatstone para alimentarlo y hacer pasar una corriente menor a 1mA (miliamperio), a través de sus ramas; con esto se evitó el autocalentamiento en los cables del sensor de temperatura y evitar distorsiones en su linealidad (Figura 8).

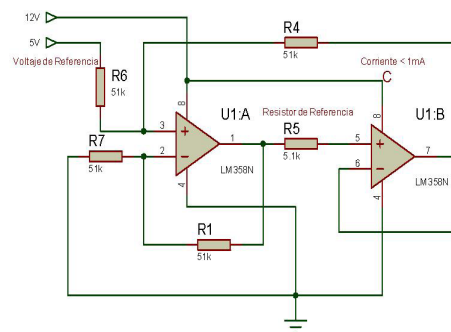


Figura 8. Circuito fuente de corriente
Fuente: los autores.

Teniendo en cuenta los bajos niveles de voltaje en la señal de salida del puente wheatstone, esta se amplió a través del amplificador AD620, el cual se configuró como comparador, ya que conectaron los puntos A y B del puente wheatstone (Figura 7) a los pines 2 y 3 del amplificador de instrumentación, respectivamente (Figura 9). La resistencia RG conectada entre los pines 1 y 8 del amplificador se encargó de dar la amplificación que requirió el sistema. El valor de RG se obtuvo de la hoja de datos del fabricante a través de la Ecuación 1.

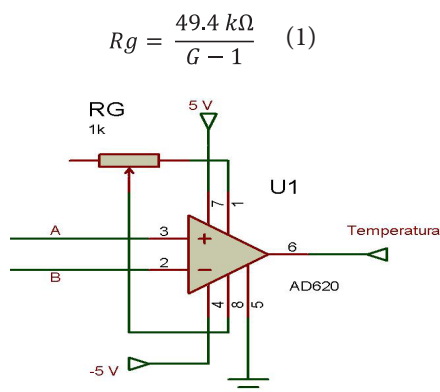


Figura 9. Amplificación de la señal del puente wheatstone
Fuente: los autores

Los voltajes obtenidos de la etapa de amplificación de la PT100, se compararon con un elemento patrón para su calibración, con el fin de tener mayor confiabilidad en las mediciones tomadas. El elemento patrón de medición fue el sensor DS18B20, que es un termómetro digital de alta precisión ($\pm 0.5^\circ\text{C}$) con tres terminales, dos para alimentación, y una terminal DATA que transmitió y recibió los bits de información. Para observar las mediciones de temperatura obtenidas por este sensor, este se conectó a la placa Arduino Uno (Figura 10).

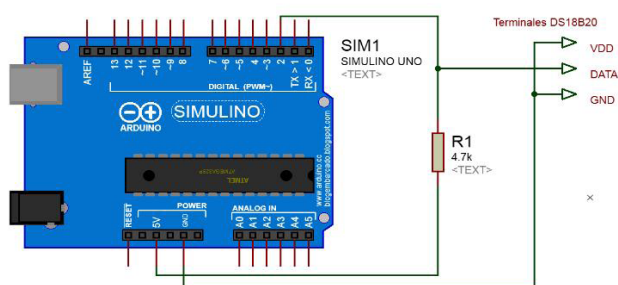


Figura 10. Conexión sensor digital
Fuente: los autores.

Una vez instalados los sensores de temperatura, se realizaron las pruebas necesarias para concatenar los voltajes obtenidos de la amplificación del puente wheatstone con el valor de temperatura que registraba el termómetro digital (Figura 11).



Figura 11. Pruebas para calibrar PT100
Fuente: los autores.

Una vez tabulados los datos, se procedió a realizar la linealización de los voltajes obtenidos de la amplificación del puente wheatstone, encontrando la Ecuación 2, que se utilizó en la programación del microcontrolador.

$$y = 10,002x + 0,3498 \quad (2)$$

Dónde: y: Temperatura en grados Celsius

x: Voltaje en voltios

Sensor de oxígeno disuelto

Para monitorear el oxígeno disuelto en el estanque de tierra, se utilizó el sensor DO1200/T, el cual es un dispositivo con una sonda galvánica electroquímica que no requiere de alimentación externa para generar una señal de control (Figura 12). Esta es una sonda que genera una señal en mV (milivoltios) proporcional al porcentaje de oxígeno que se encuentra en el agua.



Figura 12. Sensor de Oxígeno disuelto DO1200/T
Fuente: los autores.

Para determinar la concentración de oxígeno en ppm (partes por millón), se observaron los valores de porcentaje de oxígeno y la temperatura del agua mostrada en la tabla suministrada por el fabricante del sensor de oxígeno disuelto DO 1200/T (Tabla 1).

Para efectuar la respectiva lectura de la señal del sensor de oxígeno disuelto por parte del microprocesador; se realiza la respectiva adecuación donde se toma el valor que genera el sensor al aire libre, el cual será al 100% de saturación. Posteriormente, se sumerge el sensor en el agua para obtener el porcentaje de oxígeno, y se aplica la Ecuación 3 para encontrar el rango.

$$r = \frac{\text{voltaje oxígeno en el agua}}{\text{voltaje oxígeno en el aire}} \quad (3)$$

Tabla 1. Datos para calibrar sensor de oxígeno disuelto

TEMPERATURA SALINITY – in parts per thousand (ppt)						
Deg °C	Deg °F	0	5	10	15	20
0	32	14,6	14,11	13,64	13,18	12,74
1	33,8	14,2	13,73	13,27	12,83	12,4
2	35,6	13,81	13,36	12,91	12,49	12,07
3	37,4	13,45	13	12,58	12,16	11,76
4	39,2	13,09	12,67	12,25	11,85	11,47
5	41	12,76	12,34	11,94	11,56	11,18
6	42,8	12,44	12,04	11,65	11,27	10,91
7	44,6	12,13	11,74	11,37	11	10,65
8	46,4	11,83	11,46	11,09	10,74	10,4
9	48,2	11,55	11,19	10,83	10,49	10,16
10	50	11,28	10,92	10,58	10,25	9,93
11	51,8	11,02	10,67	10,34	10,02	9,71
12	53,6	10,77	10,43	10,11	9,8	9,5
13	55,4	10,53	10,2	9,89	9,59	9,3
14	57,2	10,29	9,98	9,68	9,38	9,1
15	59	10,07	9,77	9,47	9,19	8,91
16	60,8	9,86	9,56	9,28	9	8,73
17	62,6	9,65	9,36	9,09	8,82	8,55
18	64,4	9,45	9,17	8,9	8,64	8,39
19	66,2	9,26	8,99	8,73	8,47	8,22
20	68	9,08	8,81	8,56	8,31	8,07
21	69,8	8,9	8,64	8,39	8,15	7,91
22	71,6	8,73	8,48	8,23	8	7,77
23	73,4	8,56	8,32	8,08	7,85	7,63
24	75,2	8,4	8,16	7,93	7,71	7,49
25	77	8,24	8,01	7,79	7,57	7,36
26	78,8	8,09	7,87	7,65	7,44	7,23
27	80,6	7,95	7,73	7,51	7,31	7,1
28	82,4	7,81	7,59	7,38	7,18	6,98

Fuente: fabricante del Sensor

Una vez que obtenido el valor del rango (r), se empleó en la Ecuación 4, al multiplicarse por el dato que se encontró en la Tabla 1 que dependió de la temperatura en el momento de tomar la medición. Se consideró la temperatura en grados Celsius y la salinidad baja, ya que las mediciones se realizaron en un estanque de agua dulce.

$$y = r * x \quad (4)$$

r = Rango obtenido de la Ecuación 3

x = Dato de la Tabla 1, dependiendo de la temperatura obtenida por la pt100 al momento de la medición

y = Valor en ppm del sensor

Al igual que el sensor de temperatura, la señal de este sensor se amplió mediante el amplificador operacional AD620, y al no requerir fuente de alimentación externa se conectó directamente (Figura 13).

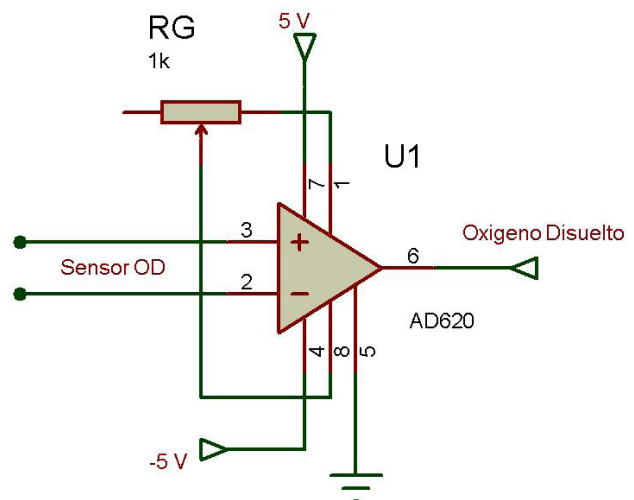


Figura 13. Amplificación señal sensor de oxígeno disuelto

Fuente: los autores.

Adquisición de datos y procesamiento de información

Después de adecuar la señal de los sensores, esta es enviada a los puertos analógicos del microcontrolador ATmega328-P, donde se convirtió en datos digitales para ser procesados, y así enviar la información por puerto serial a las terminales de comunicación y recepción conectadas al módulo bluetooth HC05. La información se envió a través del puerto SPI desde el microcontrolador hacia memoria microSD para el almacenamiento (Figura 14).

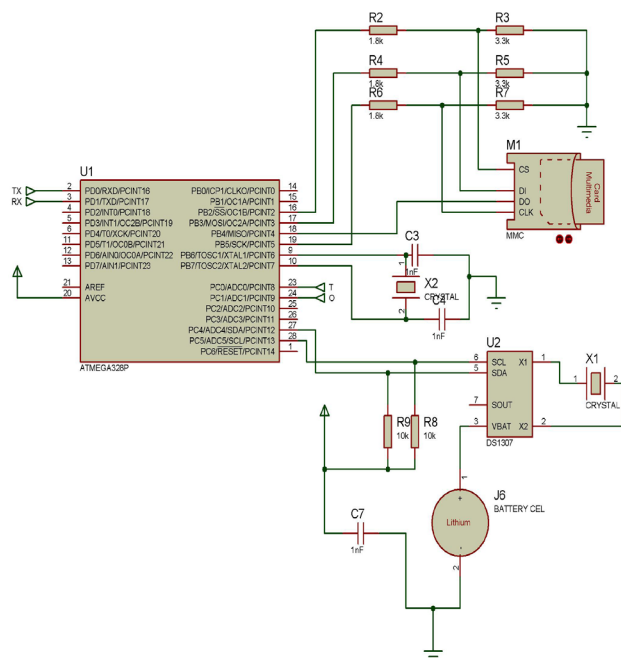


Figura 14. Circuito Adquisición de datos
Fuente: los autores.

Microcontrolador ATmega 328-P

El microcontrolador ATmega 328-P es el componente principal del circuito y hace la respectiva adquisición de datos. Para su funcionamiento se conectó un cristal de 16 MHz con 2 capacitores de 22 pF cada uno. Las señales provenientes de los amplificadores operacionales; una de temperatura y otra de oxígeno, se conectó a los pines 23 y 24 del microcontrolador, respectivamente (Figura 14). Con estos pines se convirtió la señal analógica a digital con una resolución de 8 bits, con el fin de que el microcontrolador los pueda ejecutar y operar, de acuerdo a la programación establecida. Para programar el microcontrolador Atmega 328-P se utilizó el software de Arduino, que utilizó un lenguaje de alto nivel llamado Processing, similar a C++ (Arduino, 2015).

En esta etapa se procesó la información, definidas las entradas del microcontrolador para recibir las señales análogas de los sensores, las cuales son A0 y A1 (pines 23 y 24), siendo A0 para la señal de temperatura y A1 para la señal de oxígeno disuelto.

Memoria microSD

Esta memoria se encargó de llevar un registro de las mediciones generadas por los sensores, y se alimentó a

través de un regulador de 3.3 voltios (78R33). La memoria se comunicó con el microcontrolador por medio de una comunicación SPI.

Al registro de datos se le adicionó la fecha y la hora en que fueron tomados, por lo cual fue necesario un circuito RTC (Real Time Clock o Reloj en Tiempo Real) con el integrado DS1307. Este circuito se encargó de almacenar y llevar la cuenta de la fecha y hora; tiene dos fuentes de alimentación, una de 5V con la que trabaja normalmente, y otra de 3V (pila 3V) que es la fuente de alimentación auxiliar, y se activa cuando el circuito no está energizado.

El registro de los datos guardados se realizó cada cinco minutos en el siguiente orden: temperatura, oxígeno disuelto, día, mes, año, hora y minuto. El uso de los datos se realizó través de la librería RTC.h y Time.h,

Etapa de comunicación y visualización de datos

El sistema utilizó un medio de comunicación inalámbrica por una conexión bluetooth, que es un protocolo que permitió la comunicación inalámbrica a corto alcance para dispositivos comerciales (Prabhu & Prathap, 2004).

El módulo bluetooth HC-05 se utilizó en la etapa de comunicación, es el encargado de transmitir los datos almacenados en la memoria microSD, los cuales pasan por el microprocesador, y son enviados al módulo de radio frecuencia (bluetooth clase 2) hacia el dispositivo móvil a través del puerto serial. El módulo se alimentó entre 3.3V y 5V, y sus pines Tx y Rx se conectan a los pines 2 (Rx) y 3 (Tx) respectivamente, los cuales son el puerto serial del microcontrolador.

El módulo viene configurado de fábrica para trabajar como maestro o esclavo. El modo maestro se puede conectar con otros módulos bluetooth, mientras que en el modo esclavo queda a la escucha de peticiones de conexión. Este módulo utilizó el protocolo UART RS 232 serial que es ideal para aplicaciones inalámbricas, fácil de implementar con PC, microcontrolador o módulos Arduino.

Una vez que se recolectó y almacenó la información en el sistema, el usuario realizó la conexión entre el dispositivo móvil y el dispositivo electrónico a través de la comunicación bluetooth, para así tomar los datos almacenados en la microSD, visualizarlos y estar informados del comportamiento de su cultivo.

Para desarrollar la aplicación móvil se empleó el software Android Studio, que es un entorno de desarrollo integrado para crear aplicaciones en la plataforma Android (Cruz, 2013). Android Studio es software libre, que además de permitir un desarrollo por medio de código Java, también se puede realizar por medio de plantillas. Como las aplicaciones móviles desarrolladas hoy en día, en su mayoría tienen una plataforma base. Se tuvo de guía una plantilla que permitió la comunicación bluetooth con cualquier dispositivo enlazado por comunicación serial (Bluetooth Terminal) a partir de la conexión con el dispositivo, el envío y la recepción de datos, para luego hacerle mejoras mediante código Java, de tal forma que la aplicación enviara por defecto el char “#” y el microcontrolador detectara que ese era el final de la cadena de caracteres para hacer su operación de envío de datos. La aplicación se diseñó para que los datos de entrada se almacenaran en la memoria RAM del dispositivo móvil, y así poder graficarlos, además se generará una alerta si la última línea enviada no está dentro de los rangos óptimos de los parámetros monitoreados (Figura 15).



Figura 15. Interfaz gráfica de la aplicación móvil
Fuente: los autores.

Resultados y análisis de datos

Se obtuvo un prototipo funcional validado en campo para monitorear temperatura y oxígeno disuelto del agua en el estanque de tilapia roja de la piscícola “Pezcomsi” en el municipio de Campoalegre, departamento del Huila (Figura 16).



Figura 16. Prototipo recolectando datos en campo
Fuente: los autores.

Validación del sistema

Para saber qué tan confiables son las mediciones obtenidas por el sistema, se realizaron pruebas de laboratorio para comparar los datos obtenidos por el sistema, con las mediciones del sensor de temperatura VOLCRAFT DET 1R, el cual cuenta con una precisión alta ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$) (Figura 17).

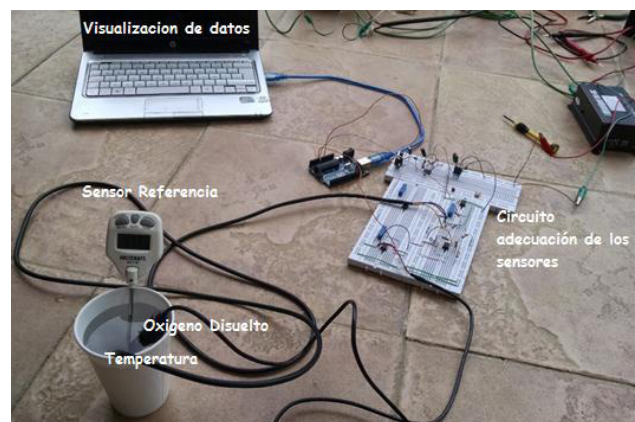


Figura 17. Validación del sistema
Fuente: los autores.

Se realizaron 40 pruebas con una temperatura inicial en el agua de 18°C , que se aumentó hasta llegar a temperatura ambiente de 33°C . Los valores de temperatura para cada prueba se observan en la Figura 18.

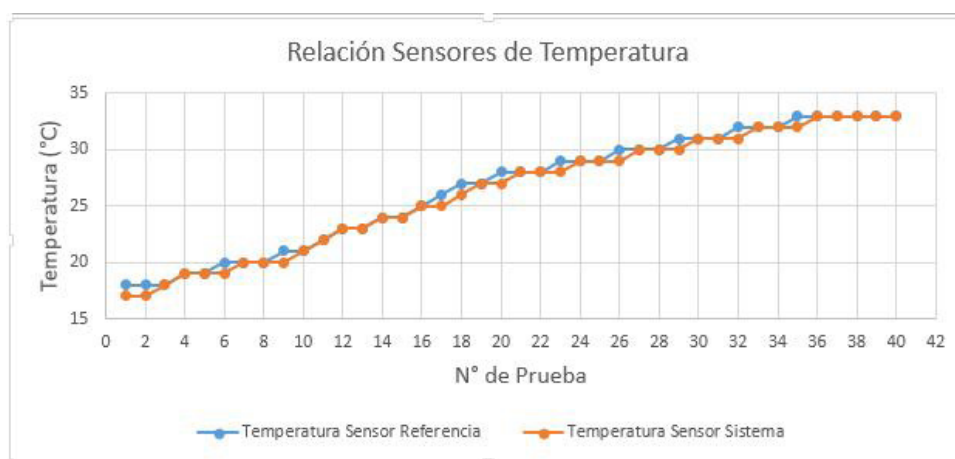


Figura 18. Valores de temperatura obtenidos en cada prueba
Fuente: los autores.

Ahora se procede a determinar la media aritmética o promedio de los valores registrados por cada sensor de temperatura, para calcular el porcentaje del error relativo y así demostrar la confiabilidad del sistema por medio de la Ecuación 5.

$$E_{\text{relativo}} = \frac{|Media\ Sens\ Sist - Media\ Sens\ Ref|}{Media\ Sens\ Ref} * 100 \quad (5)$$

$$Error\ relativo = \frac{|26,275 - 26,575|}{26,575} * 100 = \pm 1,13\%$$

Para las pruebas realizadas al sensor de temperatura, se obtuvo un delta con el sensor patrón de $\pm 0.3\ ^\circ\text{C}$.

Respecto a las mediciones con el sensor de oxígeno disuelto, se hizo una comparación del método indirecto llamado método Winkler, la respuesta de un sensor comercial YSI550A (Figura 19) y el dispositivo desarrollado, tomando muestras del estanque que se combinaron con unos reactivos químicos, con el fin de obtener como resultado la cantidad de oxígeno encontrado en el agua. Luego se procede a comparar los resultados tanto del sensor como del método químico, y el dispositivo desarrollado, para así observar la confiabilidad del dispositivo. Es de gran importancia resaltar que la implementación de este método fue realizado por el ingeniero químico Jaime Rojas Puentes, coordinador del Laboratorio de Aguas de la Universidad Surcolombiana.



Figura 19. Agua del estanque en botella de Winkler
Fuente: los autores.

$$Error\ relativo = \frac{|6 - 6,4|}{6,4} * 100 = \pm 6,25\%$$

Las pruebas se realizaron al sensor de oxígeno disuelto en un día, entre las 8 y las 16 tomando muestras cada hora, dando como resultados un margen de error manejable y apto para soportar unas mediciones confiables y precisas del dispositivo electrónico con $\pm 0.4\ \text{ppm}$, ver Figura 20.

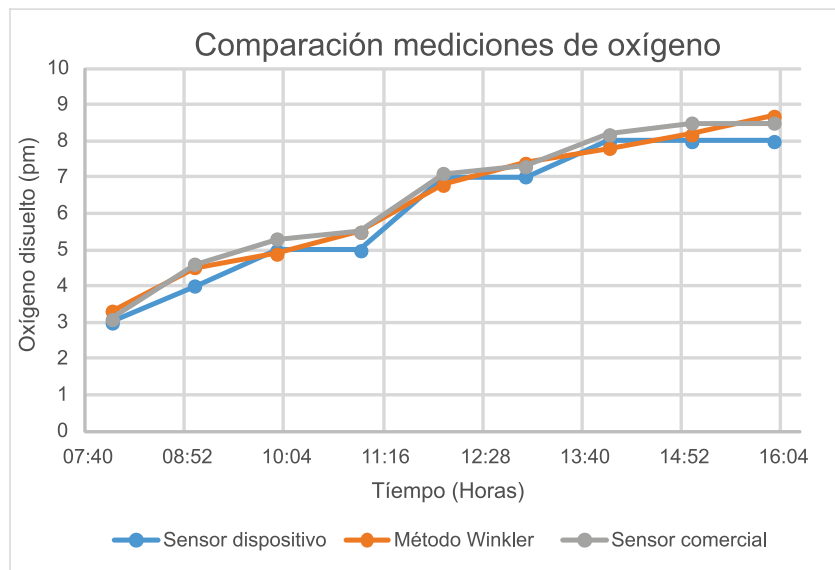


Figura 20. Datos de comparación, sensor de oxígeno disuelto comercial YSI550A, el método Winkler, y el dispositivo desarrollado
Fuente: los autores.

El error relativo del sistema es pequeño, otorgándole confiabilidad al dispositivo electrónico creado para determinar la temperatura y concentración de oxígeno en el agua de un estanque en tierra para piscicultura.

Registro datos parámetros fisico-químicos

El análisis y comportamiento de los datos que arrojó el monitoreo realizado al estanque durante 15 días, se observan en la Figura 21 y la Tabla 2. Para ello, fueron tomados y promediados los datos de las lecturas por 15 días, durante 24 horas, con frecuencias de muestreo de 24 muestras por día.

Tabla 2. Análisis estadístico de los datos

Análisis de datos	Temperatura (°C)	Oxígeno Disuelto (ppm)
Media	26,806	5,076
Desviación estándar	0,906	2,203
Coefficiente de Variación (%)	3,380	43,400

Fuente: los autores.

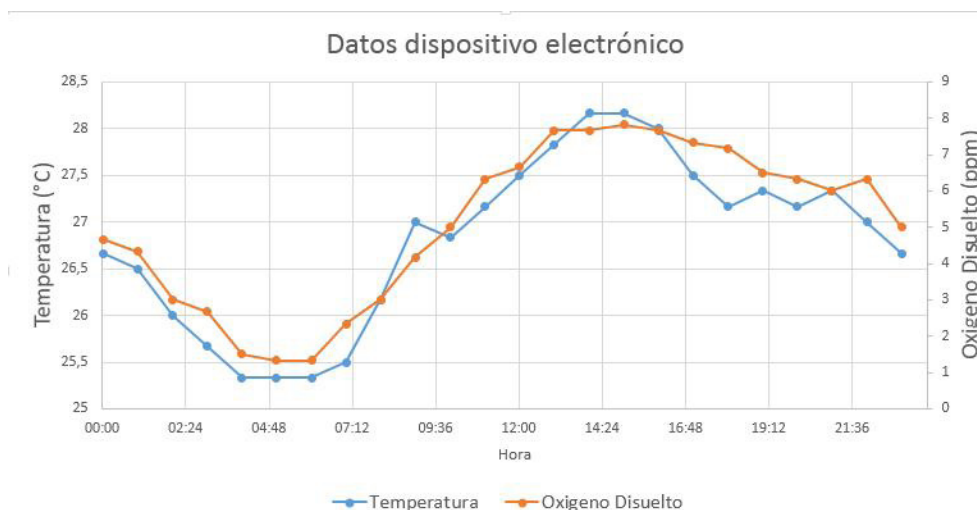


Figura 21. Registro de datos del dispositivo
Fuente: los autores.

Análisis de resultados

Se observa que el prototipo creado, monitorea efectivamente los parámetros en estudio obteniendo unos valores adecuados de temperatura y de concentración de oxígeno que se encuentran en el rango aceptable del cultivo de tilapia.

Observando la Figura 21 y el promedio de los días que el dispositivo electrónico monitoreó en el estanque, se pudo determinar que los niveles de oxígeno en este cultivo disminuyeron entre la 1 y las 8 de la mañana, siendo un periodo de alerta para el piscicultor. Esto debido a que los peces y otros microorganismos presentes en el estanque consumen el oxígeno hasta llevarlo a niveles críticos (Goyenola, 2007).

El oxígeno disuelto en el día aumenta ya que temprano en las mañanas el operario de la piscícola realiza recambio de agua al cultivo con el fin de eliminar desechos orgánicos de los propios peces. Además de que en estos estanques se encuentran algunas algas y plantas acuáticas que generan oxígeno por medio del proceso de fotosíntesis (Goyenola, 2007).

Mediante el sistema utilizado fueron registrados niveles de temperatura mayores a 29°C entre las 10 y 17 horas, por lo que se sugiere que el piscicultor esté alerta en ese periodo, y que se realicen recambios del agua, con la intención de reducir las posibilidades de mortalidad en los peces.

Estadísticamente la temperatura presentó un porcentaje de variación bajo y se mantiene en un rango aceptable para el cultivo de tilapia. Por otro lado, el oxígeno disuelto presentó un alto porcentaje de variación entre 1 y 8 ppm; por lo cual es sugerido el empleo de herramientas que ayuden a que este parámetro no varíe de manera abrupta y se mantenga en un rango aceptable.

Conclusiones

Este prototipo electrónico se convierte en una herramienta útil y práctica para la prevención de los índices de mortalidad en cultivo de tilapia.

El dispositivo electrónico diseñado es eficaz en el monitoreo de temperatura y oxígeno disuelto en aguas de estanques donde se cultiva tilapia.

La aplicación móvil creada a través de Android Studio, permite visualizar de manera inalámbrica los niveles de temperatura y de concentración de oxígeno del estanque.

El prototipo electrónico diseñado funciona a través de un sistema fotovoltaico, que se destaca por aprovechar las energías renovables, para evitar la contaminación por uso de energías convencionales.

El oxígeno disuelto fue el parámetro que presentó mayor variación y alerta en el cultivo de tilapia.

Todas las etapas implementadas en el sistema funcionaron de manera adecuada, obteniendo un prototipo funcional y novedoso para el sector piscícola que, con unos ajustes necesarios como el control de estas variables, ayudaría a bajar los niveles de mortalidad que tanto afecta a la piscicultura en nuestra región.

Es de considerarse en un estudio posterior, la implementación de estrategias para controlar los niveles de oxígeno en esta clase de cultivo de peces.

Agradecimientos

A la red Tecnoparque Colombia nodo Neiva del SENA, quienes brindaron ayuda técnica y acompañamiento con asesorías en el transcurso del desarrollo del proyecto; al ingeniero Jaime Rojas Puentes, docente de la Universidad Surcolombiana, quien fue jurado de este proyecto de grado, y colaboró brindando sus conocimientos en calidad de aguas, para brindar confianza y ofrecer una buena herramienta al sector piscícola del departamento de Huila.

Referencias bibliográficas

- Arduino, (2015). *Qué es Arduino*. Recuperado de 2015. <https://www.arduino.cc/>.
- Cifuentes Lemus, J. L.; Torres García, M. D. & Frias Mondragón, M. (2000). *Piscicultura*. El Océano y sus Recursos XI, vol. 2.
- Cruz, Z. B. (2013). *Installing and Configuring Android Studio. Android Studio Application Development*, Packt Publishing, 87 pp.

- Ezquivel, M. A.; Merino, M. C.; Restrepo, J. J.; Narváez, A.; Polo, C.; Plata, J. & Puentes, V., (2014). *Estado de la Pesca y la Acuicultura*, AUNAP 13-14.
- FAO. (2014). *Examen Mundial de la Pesca y la Acuicultura. El estado mundial de la pesca y la acuicultura*, FAO, 253 .
- Goyenola, G., 2007. *Guía para la utilización de las valijas viajeras. Red de monitoreo ambiental participativo de sistemas acuáticos*, Red Mapsa, 1.
- Merino, M. C., Bonilla, S. P., & Bages, F. (2013). *Diagnostico del estado de la acuicultura en Colombia*, 160 pp.
- Messenger, A. R., & Ventre, J. (2010). *Photovoltaic Systems Engineering*. New York: Taylor & Francis Group, 3, 461 pp.
- Palacio, A. (2015). *Manejo de la producción en cultivo de tilapia*. Entrevistador: Dussán, S.
- Prabhu, C., & Prathap, R. A. (2004). *Introduction to Bluetooth. Bluetooth Technology and its Application with Java and J2ME*. New Delhi: Prentice-Hall, 326 pp.
- Rural, M. d. (2014). *Cultivo de la tilapia roja en estanques de tierra. Insumos y factores asociados a la producción agropecuaria*. 63 pp.

Modelo de Dinámica de Sistemas para la Gestión del Emprendimiento, Fondo Emprender - SENA, Valle del Cauca

Dynamics Model Management Systems for Entrepreneurship, Entrepreneur Fund-SENA, Valle del Cauca

Recibido: 03- 03 - 2015 Aceptado: 29-03-2016

Raúl Burbano Criollo¹
Elidier Gómez Sánchez²
Oscar Rubiano Ovalle³

¹ Colombiano. Ingeniero Industrial, Universidad del Valle, Instructor del Centro de Gestión Tecnológica de Servicios, SENA, CGTS, Colombia. Correo electrónico: burcr@yahoo.es

² Colombiano. Ingeniero Sanitario, Universidad del Valle, Subdirector del Centro de Gestión Tecnológica de Servicios, SENA, CGTS, Colombia.

³ Colombiano. PhD en Ingeniería Industrial, profesor titular Universidad del Valle. Correo electrónico: oscar.rubiano@correounivalle.edu.co

Resumen

El presente artículo de investigación propone un Modelo de Dinámica de Sistemas para la Gestión del Emprendimiento del Fondo Emprender, el cual se construyó mediante la caracterización de la cadena de valor del proceso, usando la herramienta SIPOC, (Suppliers, Inputs, Process, Outputs and Costumers). Para la definición del problema, en términos estructurales, también fue aplicada mediante una adaptación del Modelo Causal, con el fin de establecer las interdependencias sistémicas y los ciclos de retroalimentación, posibilitando la construcción del modelo a través de la herramienta VENSIM, (Ventana Systems Inc), que utilizó como base conceptual el Diagrama Forrester. De igual manera se realizó una calibración del mismo con datos reales, y se desarrollaron simulaciones que determinaron los principales atributos y permitieron la caracterización del Modelo de Emprendimiento del Fondo Emprender; la quiebra de las empresas, el tiempo dedicado por los asesores a la evaluación de los proyectos, y, en menor grado, el número de planes de negocios evaluados, toda vez que el paradigma propuesto permitió identificar tanto los puntos críticos como de apalancamiento de un modelo dinámico como es el del emprendimiento, convirtiéndose así en una herramienta importante para su gestión.

Palabras clave: dinámica de sistemas, atributo, variable emprendimiento, simulación, emprendedor, empresario, Fondo Emprender, gestión.

Abstract

This research paper proposes a System Dynamics Model for Entrepreneurship Management, The Emprender Fund, which was constructed by the characterization of the value chain of the process using the tool SIPOC

(Suppliers, Inputs, Process, Outputs and Costumers). A turn to the definition of the problem in structural terms, applied by an adaptation of the Causal Model to establish systemic interdependencies and feedback loops, enabling the construction of the model through the VENSIM tool (Ventana Systems Inc) used conceptually based Forrester Diagram. Also, it was calibrated with real data, performing simulations that determined that the main attributes that characterize the model of Emprender Fund are: the bankruptcy of enterprises, time spent by consultants to evaluate projects, and to a lesser extent, the number of business plans evaluated, since the proposed paradigm identifies both critical points of leverage as a dynamic model such as Entrepreneurship, becoming an important tool for management.

Keywords: dynamic systems, attribute, entrepreneurship, variable, Simulation, entrepreneur, businessman, Fondo Emprender, management.

Introducción

El 92% de la población colombiana considera que ser empresario es una alternativa de carrera deseable y válida, siendo el porcentaje más alto registrado entre todos los países que participan en la Asociación General Monitor Entrepreneurship (GEM), mientras que en los considerados con mayor nivel de desarrollo económico, tales como Bélgica, Finlandia y Japón, el índice es inferior al 50 % (Colombia Global Entrepreneurship Monitor, 2012).

Desde la primera convocatoria del Fondo Emprender -SENA en el año 2005 y hasta el 2012 -momento cronológico para la investigación del emprendimiento en el Valle del Cauca, Colombia-, han sido aprobados 146 proyectos empresariales, cuyo capital asignado alcanzó los \$8,738,177,600 millones de pesos; de las 146 empresas financiadas, el 40,41% han logrado convertir su desembolso en capital semilla; el 38,36 % , debe reintegrar el dinero , puesto que no han cumplido con los indicadores de gestión; y el 21,23 %, se pueden considerar como fugas de emprendedores, ya que decidieron no iniciar su empresa, por lo cual se convierten en un recurso no ejecutado, según la información recopilada de la base de datos de estadísticas del SENA (2014).

La problemática actual de las empresas creadas bajo el Modelo de Emprendimiento en la región del Valle del Cauca, se constituyó en una oportunidad para poner en

práctica un Modelo de Dinámica de Sistemas, con el fin de estudiar las relaciones causales que expliquen los resultados obtenidos.

Este artículo se dividió en cinco partes; introducción temática, antecedentes, desarrollo del modelo propuesto en cuatro ítems; análisis funcional del problema, caracterización de la cadena de valor del proceso, interdependencias y círculos del Sistema de Formación para el Emprendimiento (SFPE), y el modelamiento-. Por último se consideran los resultados y discusión, y conclusiones.

Antecedentes

Según el Censo General Empresarial, DANE (2005), la estructura empresarial nacional está conformada por microempresas y pymes, las cuales, en su conjunto, son la principal fuente de generación de empleo e ingresos en Colombia, apreciándose que, en muchas de ellas, se generan empleos no legalizados, esto es, inscritos en la informalidad (Cárdenas y Mejía, 2007).

Como quiera que las microempresas y las pymes agrupan una gran variedad de unidades económicas de diferente naturaleza y nivel de desarrollo, la información a partir de la cual se les puede hacer aproximación, proviene de diversas fuentes, con diferentes metodologías y contenidos temáticos, limitando la posibilidad de llevar a cabo un análisis de todo el sector teniendo en cuenta los mismos criterios, variables y escalas de medición.

Así mismo, las microempresas, en su mayoría, son establecimientos que ocupan menos de cinco empleados dedicándose, de modo preferente, a desarrollar actividades de los sectores comercio y servicio, y, en especial al por menor. Esta composición del sector no ha cambiado en grado significativo a saber; se ven iniciativas empresariales de subsistencia, negocios que aparecen y desaparecen rapidez, personas que dicen haber iniciado una empresa y la cierran por la competencia, registros de las cámaras de comercio que indican que empresas matriculadas en un año, no se refrendan en el siguiente, entre otras.

En el mismo sentido, según el Concejo Nacional de Política Económica y Social (Conpes, 2008), entre las características más relevantes de las microempresas en Colombia se destacaron las siguientes: 1. Escasez de recurso de capital; 2. Estrechez en la cobertura del mercado; 3. Reducida capacidad de comercialización; 4. Limitada

capacidad de negociación; 5. Defectuosa calidad del producto; 6. Débil asociatividad y cooperación; 7. Escasa preparación de la mano de obra; 8. Ineficiente formación gerencial; 9. Deficiente organización de la producción; 10. Heterogeneidad en el sector; 11. Restringido acceso al financiamiento; 12. Delimitado mercado interno; 13. Circunscrito mercado externo; 14. Problemas de producción limpia y tecnologías ambientalmente sanas; 15. Atraso tecnológico; 16. Disminución de la productividad de los factores de producción; 17. Exceso de trámites estatales; 18. Poco nivel de gestión de calidad; 19. Desarticulación de encadenamientos productivos; 20. Baja formación del talento humano; y 21. Inseguridad.

El Gobierno nacional ha venido legislando sobre el tema; la Ley 344 sobre Ciencia y Tecnología (Congreso de Colombia Ley 344, 1994) y la Ley 119 de 1994, donde se estableció que el 20% del presupuesto del SENA debe ser destinado a programas de competitividad y tecnología empresarial y al fortalecimiento de los programas de tecnólogos.

Por su parte, el Congreso de la República, en el artículo 40 de la Ley 789 de 2002 (Congreso de Colombia Ley 789, 2002) creó el Fondo Empezar como una cuenta independiente y especial adscrita al SENA, el cual debe ser administrado por esta entidad, y cuyo objeto exclusivo es financiar iniciativas empresariales que provengan y sean desarrolladas por aprendices o asociaciones entre aprendices, practicantes universitarios o profesionales cuya formación se esté desarrollando o se haya desarrollado en instituciones que, para los efectos legales, sean reconocidas por el Estado, de conformidad con las Leyes 30 de 1992 y 115 de 1994.

El Fondo Empezar tiene como misión apoyar proyectos productivos que integren los conocimientos adquiridos por los emprendedores en sus procesos de formación con el desarrollo de nuevas empresas, facilitando el acceso a capital semilla (recurso que es condonado después del primer año de ejecución del proyecto siempre y cuando cumpla con todos los indicadores de gestión establecidos), para poner en funcionamiento ideas de negocio productivas. De acuerdo con el número de empleos generados, el capital semilla se caracterizó así:

- si el plan de negocio supera los tres empleos hasta 80 SMLV;
- cinco empleos 150 SMLV;
- más de seis empleos, 180 SMLV;

• Si el proyecto requiere un monto superior a los 180 SMLV para su implementación, el emprendedor debe financiarlos con aportes o recursos propios.

Entre los rubros financiables, se tienen:

- Capital de trabajo, maquinaria y los equipos relacionados con el proyecto, gastos administrativos y operacionales, costos de constitución legal y licencias requeridas.

Entre los no financiables:

- compra del inmueble, estudios de factibilidad, adquisición de vehículos, pagos de pasivos, formación académica, entre otros. (Acuerdo 0007, 2011).

Para profundizar el Modelo de Gestión del Emprendimiento se usó un enfoque “sistémico” como paradigma de representación y abordaje circular; Según Senge (1999), las decisiones tomadas hoy serán el reflejo del futuro, y lo que se está viviendo hoy es consecuencia de las tomadas en el pasado.

Sobre el particular, O'Connor y McDermott (1998) y , Senge (1999) plantearon que el pensamiento habitual resultó insuficiente para manejar los sistemas complejos, ya que tiende a ver secuencias simples de causa y efecto limitadas en espacio y tiempo, en lugar de una combinación de factores que se influyen mutuamente; es necesario entonces pensar el problema desde el punto de vista sistémico y repetitivo, y que tiene rastros en el pasado, y tanto más cuanto el abordaje sistémico concibe cualquier aspecto del mundo como la iteración causal entre atributos que lo describen, consiguiendo representaciones sistémicas con flechas y puntos, denominadas Diagramas Causales, que capturan todas las hipótesis propuestas.

Desarrollo del modelo propuesto

Análisis funcional del problema

El Gobierno nacional, con el propósito de superar las debilidades y dificultades que actualmente viven los emprendedores, cuenta con una política de emprendimiento (Congreso de Colombia, Ley 1014 de 2006), que tiene como objetivos fundamentales promover la articulación institucional, facilitar la formalización de la

actividad empresarial, desarrollar nuevos instrumentos de financiación, fortalecer la industria de soporte no financiero para el emprendimiento, y fomentar emprendimientos que incorporen cada vez más ciencia, tecnología e innovación.

El objetivo del Fondo Emprender es financiar proyectos productivos que integren los conocimientos adquiridos por los emprendedores en sus procesos de formación con el desarrollo de nuevas empresas, facilitando el acceso a capital semilla, al poner a disposición de los beneficiarios los recursos necesarios que la apuesta exija y demanda.

En Colombia se puede creer que el emprendimiento ya es una política establecida. (Tarapuez et al., 2013). Los esfuerzos realizados en la implementación de estas directrices nacionales se pudo evidenciar en la creación del Fondo Emprender, pero exige y demanda a las empresas que han sido financiadas, que no muestran los indicadores deseados. Pese a ello, grandes estudiosos del emprendimiento como Kantis et al., 2002; Komori (2002); Stevenson (1998) y Cooper (2013), sostuvieron que una política de emprendimiento puede incrementar en gran suma la riqueza de un país y disminuir, ostensiblemente, los fenómenos sicosociales.

Permite el nivel de cumplimiento de los indicadores de gestión determinar al Consejo Directivo Nacional del Fondo Emprender el reintegro del dinero, o la asignación de capital semilla, a los emprendedores que en definitiva deciden continuar en el proceso de legalización de la empresa.

Las cláusulas son conocidas por los emprendedores, y quedan legalizadas en forma a partir de la fecha del acta de inicio de la empresa. Esta firma se hace con el interventor asignado al proyecto y con la empresa debidamente constituida ante la legislación comercial de Colombia. El Contrato de Cooperación (Ley 1676, 2013), contempló que, este es una obligación financiera que se debe cumplir con toda la normatividad y en las sanciones establecidas al enfrentar al marco jurídico colombiano.

Según el Acuerdo 001617 de 2006, que modificó del Manual de Operaciones del Fondo Emprender, los principales indicadores de gestión para estas empresas son la generación de empleo, la ejecución presupuestal, la gestión de mercadeo, y el monitoreo de ventas.

Caracterización de la cadena de valor y análisis estructural del problema

La cadena de valor del proceso del emprendimiento se inicia cuando un ciudadano propone una idea de negocio en una unidad de emprendimiento, hasta el momento en que es evaluada por el Fondo Emprender como empresa, para que el recurso asignado se convierta en capital semilla condonado o la empresa deba reintegrar los recursos monetarios y asumir una deuda con su respectivo periodo de pago.

Caracterización de la cadena de valor del proceso empresarial del Fondo Emprender.

Para abordar la caracterización de este proceso, es preciso entender algunos conceptos utilizados en el lenguaje de la Dinámica de Sistemas, la cual es una metodología desarrollada por el Instituto de Tecnología de Massachusetts (ITM) a cargo del ingeniero Jay Forrester (1969). Redondo (2013) propone la siguiente definición: "la Dinámica de Sistemas concibe cualquier aspecto del mundo como la iteración causal entre atributos que lo describen; de esta forma se consiguen representaciones sistémicas con flechas y puntos, denominadas Diagramas Causales, que capturan todas las hipótesis propuestas. El modelo y la recomendación son puntos de vista del modelador".

En Dinámica de Sistemas, las partes del sistema se denominan atributos entendidos como aquello que se puede decir del sistema. Esta comprensión depende del analista del problema y su capacidad para entender su estructura.

• Diagramas causales

Las relaciones que se utilizan en Dinámica de Sistemas para articular los atributos, se denominan Relaciones Causales.

• Diagrama de niveles

Representan las variables de estado del sistema, a través de las cuales se puede visualizar de manera general; en ellas se muestran las acumulaciones no tangibles o de información y la información de tipo tangible o material.

• Flujos

Son razones de cambio del sistema, es decir, aquellas

que producen la acumulación en las variables de estado.

- **Variables auxiliares**

Son variables que capturan situaciones muy específicas del sistema.

- **Parámetros**

Son valores constantes en cada proceso del sistema, pero que pueden variar de proceso a proceso.

En esta investigación se utilizaron las convenciones ver Figura 1, que representan los niveles, los flujos y las variables auxiliares de Dinámica de Sistemas. Estas permitieron desarrollar el Modelo de Emprendimiento y simular algunas variables.

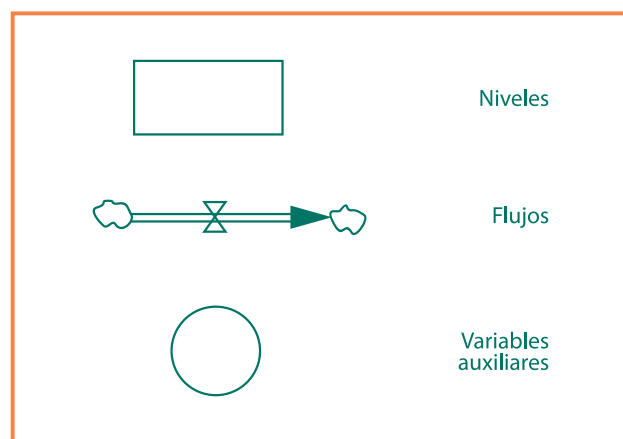


Figura 1. Convenciones de Dinámica de Sistemas.
Fuente: Forrester, 1969.

Se entiende como cadena de valor las actividades de planeación, ejecución y control que se realizan para entregar valor a los clientes (Womack y Jones, 2005). En este modelo se pretende caracterizar el proceso de emprendimiento para el Fondo Emprender SENA, Regional Valle del Cauca. La herramienta usada para la caracterización del Sistema de Formación para el Emprendimiento (SFPE) es el Diagrama SIPOC (Simón, 1981), cuyo nombre proviene de su sigla en inglés para Suppliers (S), Inputs (I), Process (P), Outputs (O) and Customers (C) (traducida al castellano como Proveedores, Entradas, Proceso, Salidas y Clientes).

El SIPOC permite tener una visión clara de la cadena de valor del proceso de emprendimiento y su entorno, mediante la identificación de sus elementos relevantes (Figura 2).

Los Suppliers (S), del sistema de la cadena de valor del emprendimiento son las personas naturales, mayores de edad para el Estado colombiano, provenientes de las Instituciones de Educación Superior (IES); las incubadoras de empresas; los aprendices de formación titulada y en formación especial del SENA, y las empresas que tengan menos de un año de haberse constituido legalmente y que cumplan con los requisitos del Acuerdo 007 de 2011 del Fondo Emprender.

Los Inputs (I) del sistema son los planes de negocio, provenientes de las Instituciones de Educación Superior (IES), las incubadoras de empresas; los aprendices en formación especial del SENA y las empresas que tengan menos de un año (1) de haberse constituido legalmente.

Los Procesos (P) son los planes de negocio que cursan 16 etapas, descritas en la Figura 2, iniciando con la acreditación del plan de negocio en una unidad de emprendimiento, hasta que la empresa logre la liberación después de ejecutar todo el proceso, es decir, que le sea condonado el capital por parte del Fondo Emprender, o la empresa entre a negociar la devolución del dinero desembolsado.

Los Outputs (O), para la cadena de valor del emprendimiento son las personas naturales con empresa condonadas o con obligación financiera, que han cumplido o incumplido los indicadores de desempeño, pactados a lo largo del proceso emprendedor con el Fondo Emprender

Finalmente, los Customers (C) serán las unidades de emprendimiento encargadas de hacer el seguimiento permanente a las empresas financiadas mediante sus asesores. Por su parte el Fondo Emprender hará el seguimiento permanente a los empresarios, la ejecución de los recursos y las metas a cumplir. El SENA es la entidad encargada de recolectar el desempeño del proceso emprendedor del Fondo Emprender. De la comunidad depende, en gran medida, la aceptabilidad o no en la adquisición de los productos o servicios que ofrecen las nuevas empresas, y también de entidades gubernamentales, como cámaras de comercio, DIAN, y Contraloría, que son los entes involucrados en el funcionamiento del proceso de emprendimiento en Colombia.

Hollingsworth (1995) propone una forma de diagramar los flujos para resumir en una imagen, de manera coherente, los flujos de trabajo, de información y de decisiones que representan la realidad de la operación del sistema.

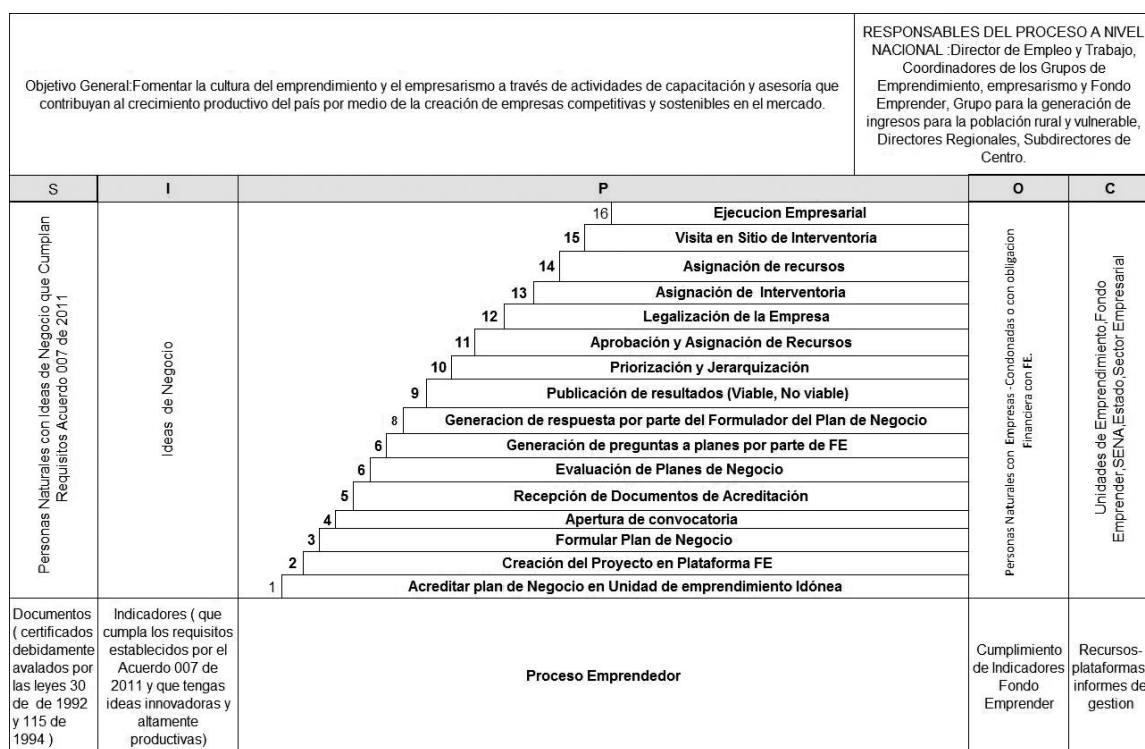


Figura 2. SIPOC- Cadena de valor del emprendimiento

Fuente: los autores.

Los elementos del sistema son:

- Los lineamientos operativos suministrados por la Dirección del Fondo Emprender (parte inferior derecha de la Figura 3), los cuales son: i) Los objetivos operativos y financieros, y ii) Lineamientos de seguimiento y control que la Dirección General establece para que sean verificados por parte del Interventor del proyecto, quien hace las veces de árbitro de los proyectos y de quien depende su ejecución.
- Los atributos de los procesos de la cadena de valor del emprendimiento (parte central interna de la Figura 3) son: i) Los elementos de los cuales depende la Apropiación de los Proyectos Emprendedores (APE), por lo cual se consideraron como atributos de idoneidad del sistema, pensando cada uno de manera diferente en el proceso de aprobación del proyecto; ii) La tasa esperada de desembolso de los proyectos (desembolso), y iii) El Seguimiento Trimestral de Criterios de Evaluación (SMCE).
- El Horizonte de Seguimiento (HS) es el tiempo transcurrido desde la aprobación de la ideas y las consolidación como empresa. En este lapso, se identificaron y se reprogramaron los planes de acción.
- El esfuerzo de atención de eventualidades, generado por los resultados obtenidos en el desempeño de las empresas simuladas. En este estudio se identificó la correlación

entre los elementos de los cuales depende la APE y la Tasa esperada de Éxito de los Proyectos (TEP), es decir, el estado y la correlación entre los primeros, determina el resultado de la segunda. Esto se expresó como una función: $TEP = f(\text{sinergia de APE})$. Ante mayor número de proyectos presentados por las Instituciones de Educación Superior (IES), e incubadoras de empresas, menor será la calidad o tiempo de dedicación por parte del evaluador del Fondo Emprender. La aprobación de los proyectos con baja calidad de criterios se derivó en quiebras en el proceso emprendedor. El esfuerzo adicional de mejoramiento implicó examinar las APE para identificar los puntos de apalancamiento y las acciones de mejora.

- Los flujos de información y trabajo entre los elementos del proceso del emprendimiento.
- Los indicadores de medición de las salidas del sistema.

Las APE representan los atributos necesarios con que se cuenta para analizar la cadena de valor, cuya estructura de correlación representó a los empresarios en formación en una Unidad de Emprendimiento de la Regional Valle del Cauca.

De acuerdo con lo expresado, a partir de este estudio se determinó que:

Los APE representan los atributos de idoneidad de los agentes humanos y físicos, para ejecutar la cadena de valor y cuya estructura de interdependencias determina los resultados del proyecto de emprendimiento

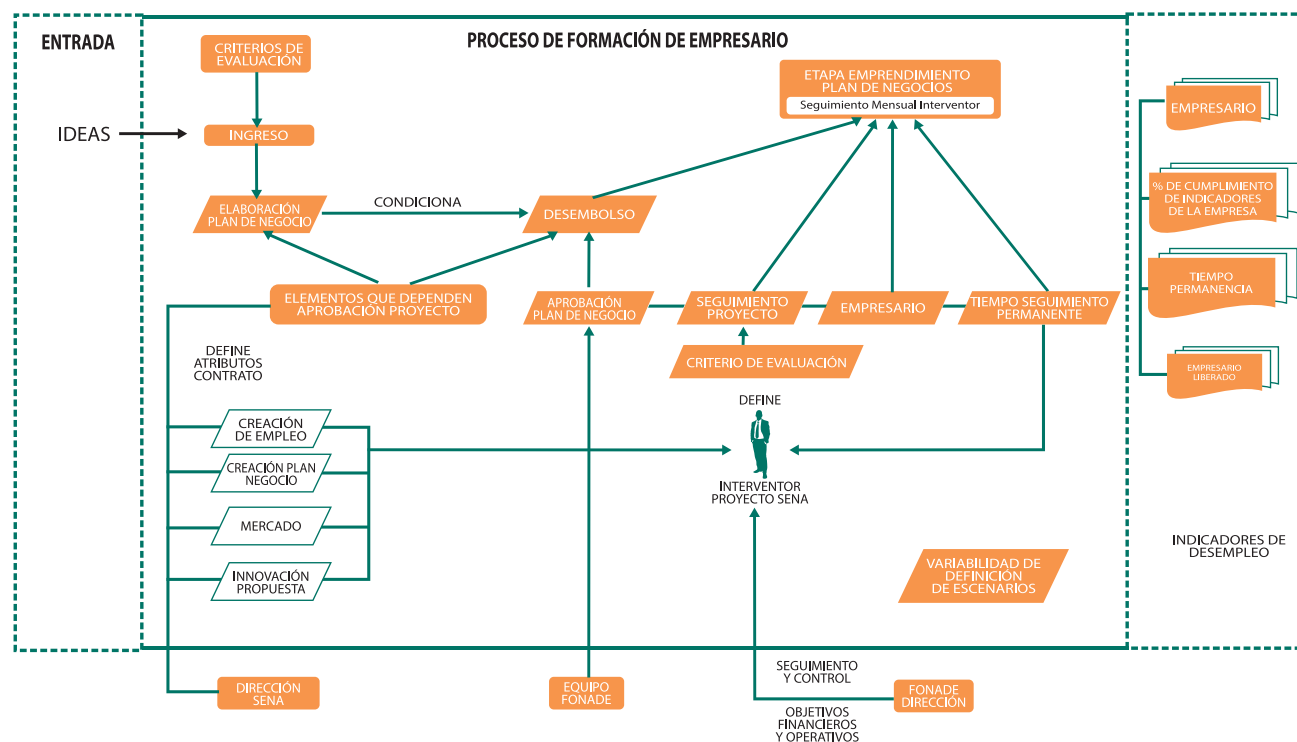


Figura 3. Estructura del Flujo de Trabajo para el Emprendimiento
Fuente: Adaptado de Hollingsworth, 1995.

En esta metodología, las APE son identificadas por el equipo de agentes operativos del sistema a estudiar. En este sistema dicho equipo está compuesto por los interventores del proyecto y la coordinación del Fondo Emprender. En el modelo propuesto se identificaron las siguientes APE:

- Competencia técnica para realizar el ingreso de la idea (competencias del grupo que convoca y selecciona a los emprendedores).
- Condiciones del emprendedor (competencias y características que debe tener el emprendedor).
- Planeación del plan de seguimiento por parte de los interventores, Fondo Emprender y SENA.

Interdependencias y círculos en la cadena de valor del SFPe

Una herramienta utilizada en este estudio para definir el problema estructuralmente, es una adaptación del llamado Diagrama Causal, (Sterman, 2000), el cual definió el conjunto de los elementos que tienen relación con el problema y que permitieron, en principio, explicar el comportamiento observado en las empresas creadas con capital semilla del Fondo Emprender.

Las interdependencias sistémicas para analizar el problema del emprendimiento se pueden observar en la Figura 4, donde se muestran los bucles de retroalimentación (círculos) sistémicos.

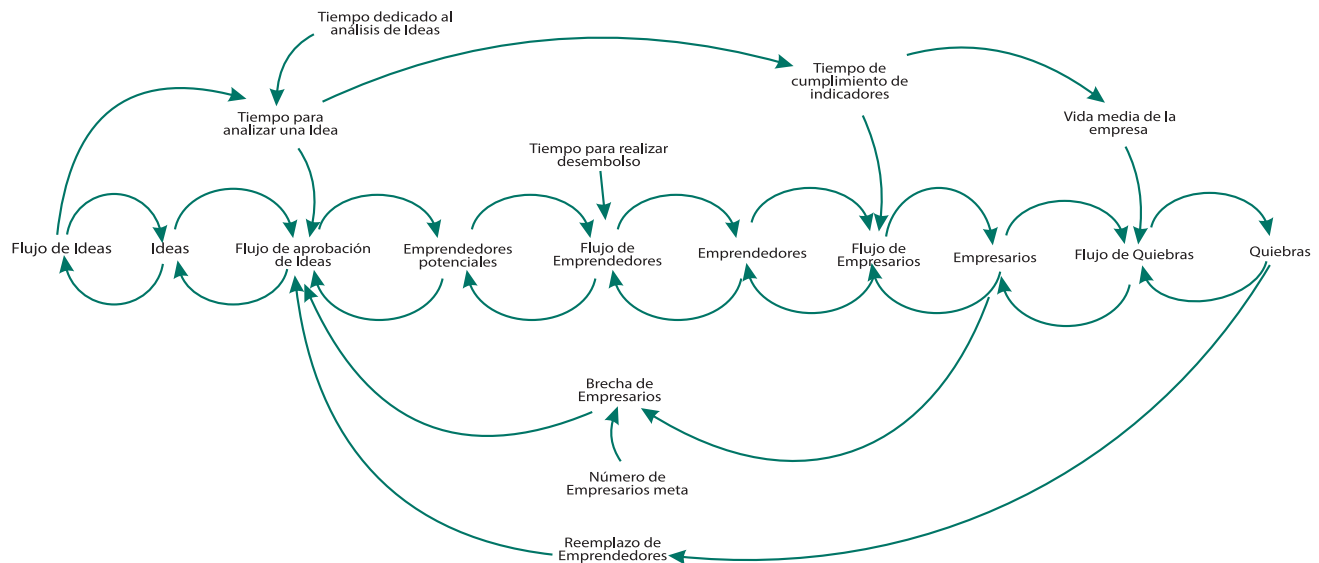


Figura 4. Diagrama para la Gestión del Emprendimiento.

Fuente: los autores.

La relación estructural de los elementos conexos al problema son: atributos de los insumos ideas de negocio (I), procesos de la cadena de valor (P), variables de resultado y variables de impacto en el sistema (O). La mayoría de los elementos son “importados” del SIPOC, como lo indica la Figura 2, y de la estructura del flujo de trabajo para el emprendimiento en la Figura 3.

La identificación de los parámetros de definición de escenarios y de los indicadores de medición de las salidas o de desempeño del sistema, mostrados en la Figura 3, permite construir el Mapa del Problema (Figura 5).

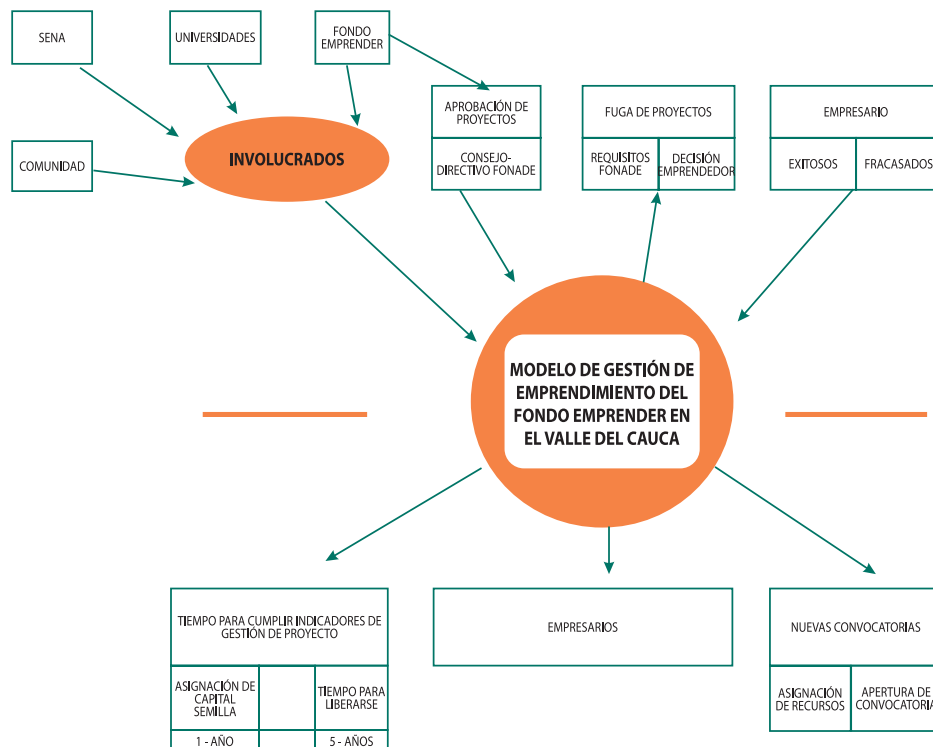


Figura 5. Mapa del problema de gestión del emprendimiento

Fuente: los autores.

Modelamiento de la cadena de valor del emprendimiento

Subíndices:

t = (Subíndice de tiempo): Referencia de cada uno de los meses del periodo de estudio ($t=1,36$).

Variables de nivel:

Emprendedores: cantidad de emprendedores en el mes t . Su ecuación viene dada por = Flujo de emprendedores – Flujo de empresarios, iniciando en, 1).

Emprendedores Potenciales: cantidad de emprendedores potenciales en el mes t . Su ecuación viene dada por = Flujo de aprobación de ideas – Flujo de Emprendedores, 1).

Empresarios: cantidad de empresarios formados activos en el mes t . Su ecuación viene dada por = Flujo de Empresarios – Flujo de Quiebras, 0).

Ideas: número de ideas aprobadas en el mes t . Su ecuación viene dada por = Flujo de Ideas – Flujo de aprobación de Ideas, 1).

Quiebras: número de empresarios que sus empresas han fracasado en el mes t . Su ecuación viene dada por = Flujo de Quiebras, 0).

Variables de flujo:

Flujo de aprobación de Ideas: Nivel entre las nuevas ideas y los espacios dejados por la diferencia en la meta a lograr, y el reemplazo de Emprendedores sobre el tiempo para analizar una idea que tienen los interventores. La ecuación = (Ideas + Brecha de Empresarios + Reemplazo de Emprendedores)/Tiempo para analizar una idea.

Flujo de Emprendedores: Es el flujo en unidad de tiempo que mide los emprendedores potenciales sobre el tiempo para realizar el desembolso de dinero por Fondo Nacional de Emprendimiento (FONADE).

Flujo de Empresarios: Emprendedores/Tiempo de cumplimiento de indicadores (el flujo de emprendedores que cumplen los Indicadores de Gestión para llegar a ser empresarios).

Flujo de Quiebras: Empresarios/Vida media de la empresa (las quiebras generadas por el tiempo de operación de la empresa cumpliendo Indicadores Cuotas Económicas).

Flujo de Ideas: la cantidad inicial de ideas que llegan al sistema; 240 en promedio.

Variables auxiliares:

Brecha de Empresarios: número de Empresarios meta – Empresarios, es el límite del sistema.

Reemplazo de Emprendedores: emprendedores que se les aprueban proyectos.

Quiebras: empresarios quebrados que van a dar un cupo a nuevas ideas y seguramente a nuevos emprendedores.

Tiempo de cumplimiento de indicadores: analiza la calidad del análisis de la Idea, si sobrepasa los treinta y seis (36) meses.

Tiempo para analizar una idea: Flujo de Ideas/Tiempo dedicado al análisis de ideas, revisando el tiempo de los interventores y FONADE.

Parámetros:

Número de Empresarios meta = 1.340 es el valor esperado en el programa.

Tiempo dedicado al análisis de ideas: 2/mes.

Tiempo para realizar el desembolso = 1 mes después del estudio (supuesto ideal).

Vida media de la empresa = se pregunta por el Tiempo de cumplimiento de indicadores por parte de la empresa en meses.

Tiempo de la simulación = 36 meses.

Los parámetros de definición de escenarios y los indicadores de desempeño del sistema se distinguen como los elementos críticos del modelo en el Diagrama Causal mostrado en la Figura 4. En esta estructura se identifican bucles de realimentación tanto positiva como negativa. Se muestra un bucle de refuerzo (Figura 6) como el efecto balanceador del tiempo para la aprobación de Ideas de Negocio.

Hipótesis dinámica

La representación del sistema está planteada en la Figura 6, convirtiéndose en la hipótesis dinámica para el estudio o bucle de refuerzo en el análisis de las Ideas de Negocio.

Bucle de refuerzo en el Análisis de las Ideas de Negocio

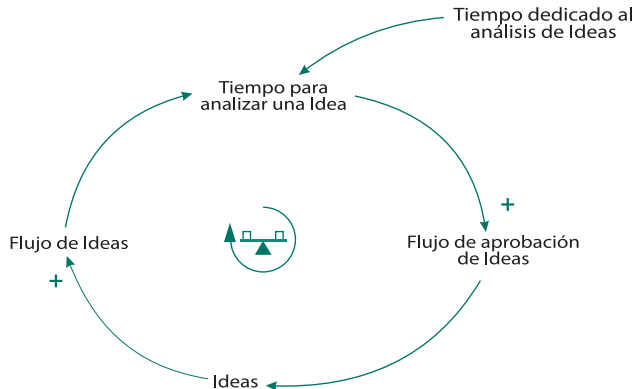


Figura 6. Bucle de refuerzo en el Análisis de las Ideas de Negocio
Fuente: los autores.

A medida que se presenten más ideas, se tendrá un mayor número de flujo de ideas, que si no aumentan los evaluadores proporcionalmente, derivarán en menor tiempo para analizar la Idea, lo que disminuirá la calidad de la evaluación y aumentará el flujo de aprobación de ideas. La calidad del proceso, según el modelo depende del tiempo dedicado al análisis de ideas; lo que se ha propuesto como la calidad de la evaluación de la idea.

El Diagrama de Forrester en la Figura 7, muestra las relaciones de causalidad entre las variables de Flujo, Nivel y Auxiliares con los parámetros de todo el sistema.

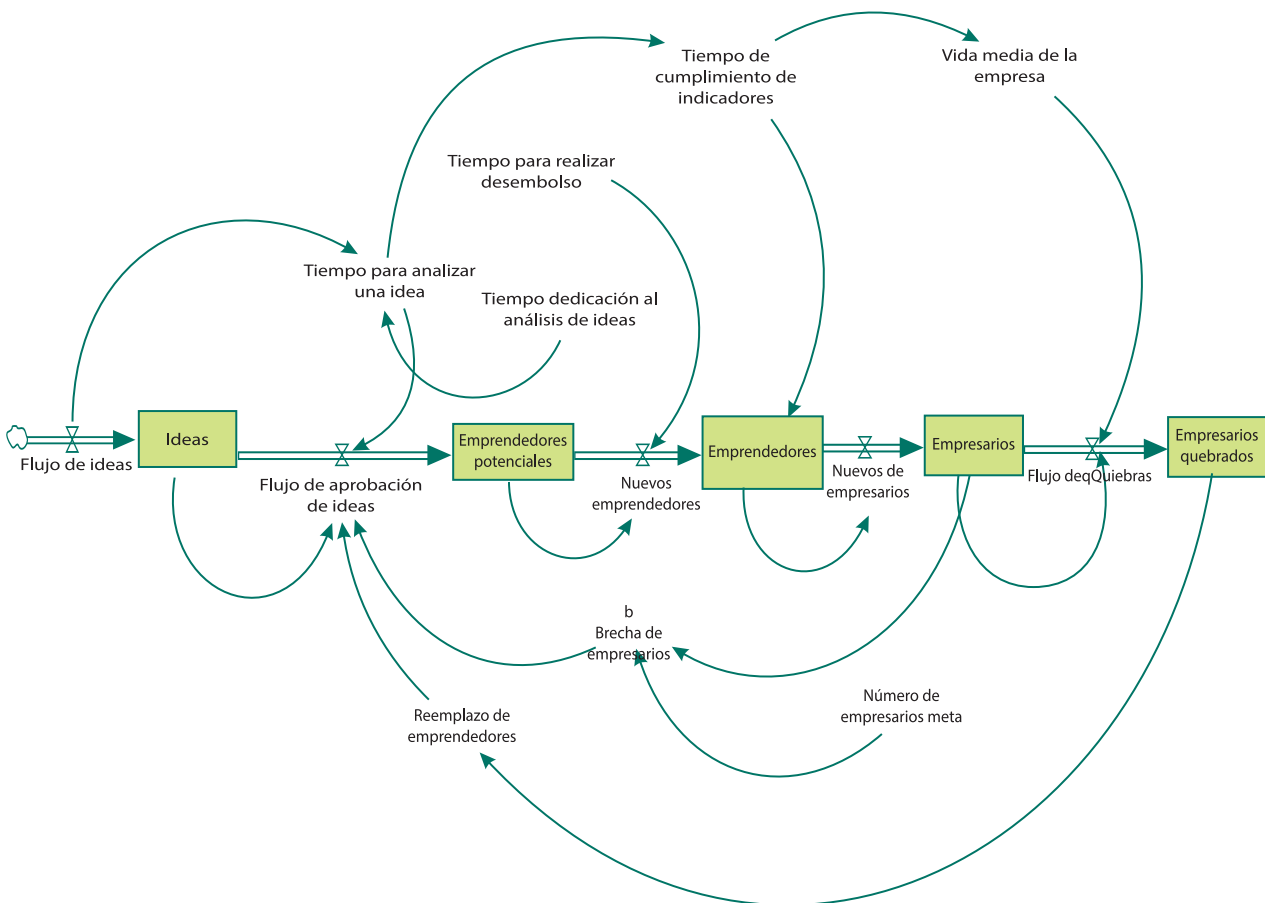


Figura 7. Diagrama de Forrester del Proceso Emprendedor
Fuente: los autores.

Resultados y discusión

El modelo desarrollado no representa la realidad absoluta, el modelador es una persona que trata de entender la posición de la realidad que representa, se puede creer que esa posición la ha entendido completamente. Un modelo es una representación que siempre puede ser mejorada (Stermán, 2000).

Todos los problemas tienen una estructura de comportamiento y generalmente, el ser humano observa el evento de ocurrencia. Para la Dinámica de Sistemas, los eventos son lo observable, la foto instantánea, generalmente, una cuarta parte del problema, los patrones, la estructura, y los modelos mentales, representan las tres

cuartas partes restantes. Los patrones se refieren a los indicadores comportamentales en un lapso de tiempo; la estructura, se refiere a todos los procesos involucrados en el funcionamiento de un sistema, (equipos de trabajo, la infraestructura, los recursos financieros, la tecnología), y los modelos mentales se refieren a las creencias y principios que tienen las personas del funcionamiento de un sistema (Aljure, 2007).

La herramienta de simulación VENSIM, permitió ver gráficamente las variables involucradas en el comportamiento del sistema de emprendimiento, se inicia mostrando las relaciones de Variables de la Gestión del Emprendimiento (Figura 8).

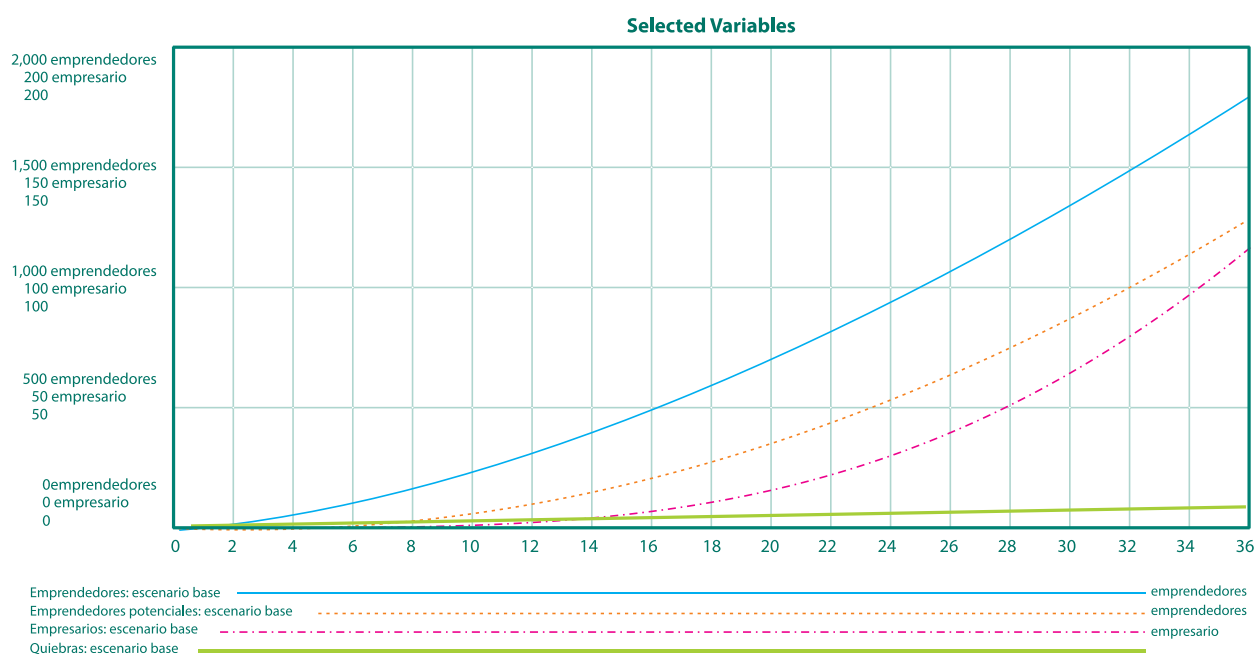


Figura 8. Relaciones de Variables de la Gestión del Emprendimiento
Fuente: los autores.

Como se puede observar en la Figura 8, existe una trascendental relación entre las variables de nivel: Ideas, Emprendedores potenciales, Emprendedores, Empresarios y Empresario quebrados; a medida que aumenta el horizonte del tiempo del sistema de emprendimiento. Todas las variables crecen en magnitud, desde luego, si el sistema continúa funcionando igual y sin ninguna política de control, todo crecerá. Lo más crítico, según este estudio de prospectiva, es el número de empresarios quebrados, quiere decir es que el sistema continuarán fracasado a través del tiempo; para corroborar dicha información a continuación se presentan algunas simulaciones.

De igual forma, en la Figura 9 se puede observar una relación directa entre los aumentos de las ideas; por ejemplo, cuando aumenta la calidad de sensibilizaciones al programa de emprendimiento, existe una disminución de la brecha de empresarios; se supone entonces que aumenta la conciencia empresarial, si se da una buena información; las ideas de negocio se siguen robusteciendo o aumentando puesto que el proceso es atractivo, pero el efecto importante sigue siendo las quiebras de las empresas en el periodo simulado. Esta relación lleva a afirmar que el emprendimiento continuará obteniendo quiebras, dadas las políticas de expansión del emprendimiento a nivel mundial.

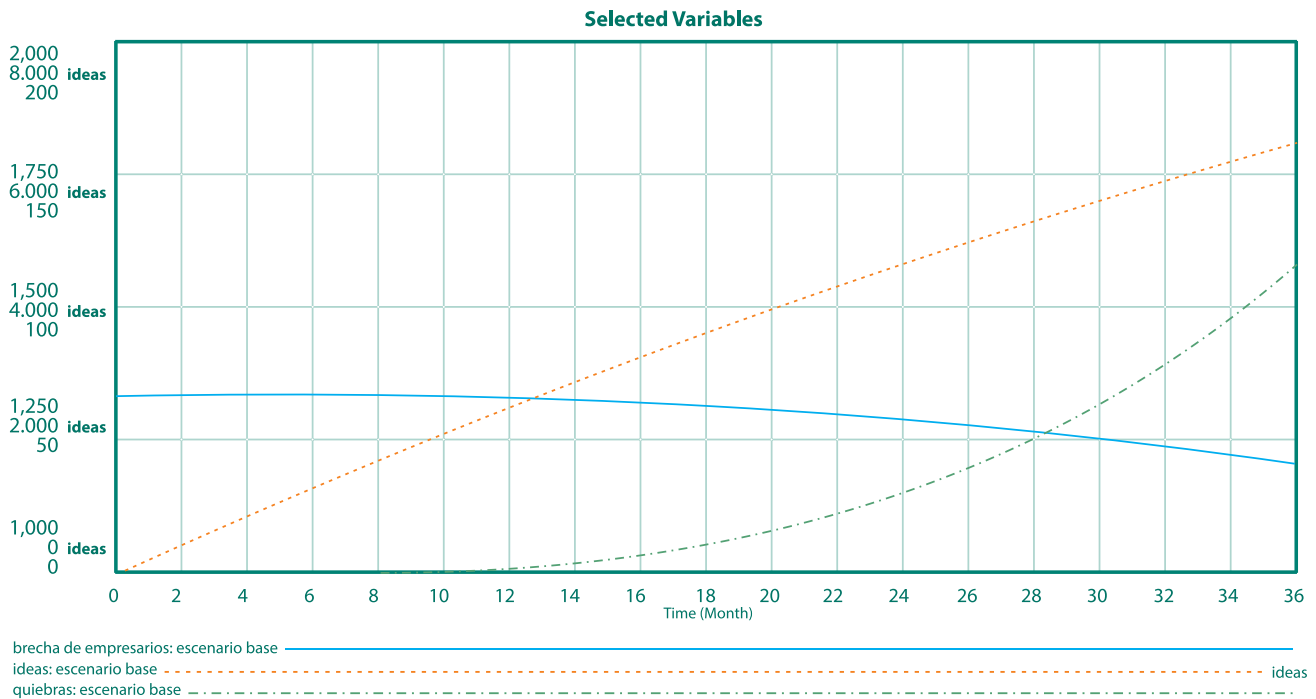


Figura 9. Simulación de Variables de la Gestión del Emprendimiento
Fuente: los autores.

Simulación para aumento del tiempo en el análisis de ideas

La simulación para el aumento del Tiempo (t) de dedicación al análisis de las ideas tuvo en cuenta la afectación de la variable de nivel Empresarios, para lo cual

se modificó $t = 2, 4, 5, 6$, simulando un cambio de la política del Fondo Emprender. Así entonces, se pudieron obtener los resultados para realizar este análisis, por lo cual se presenta a continuación la simulación obtenida (Figura 10).

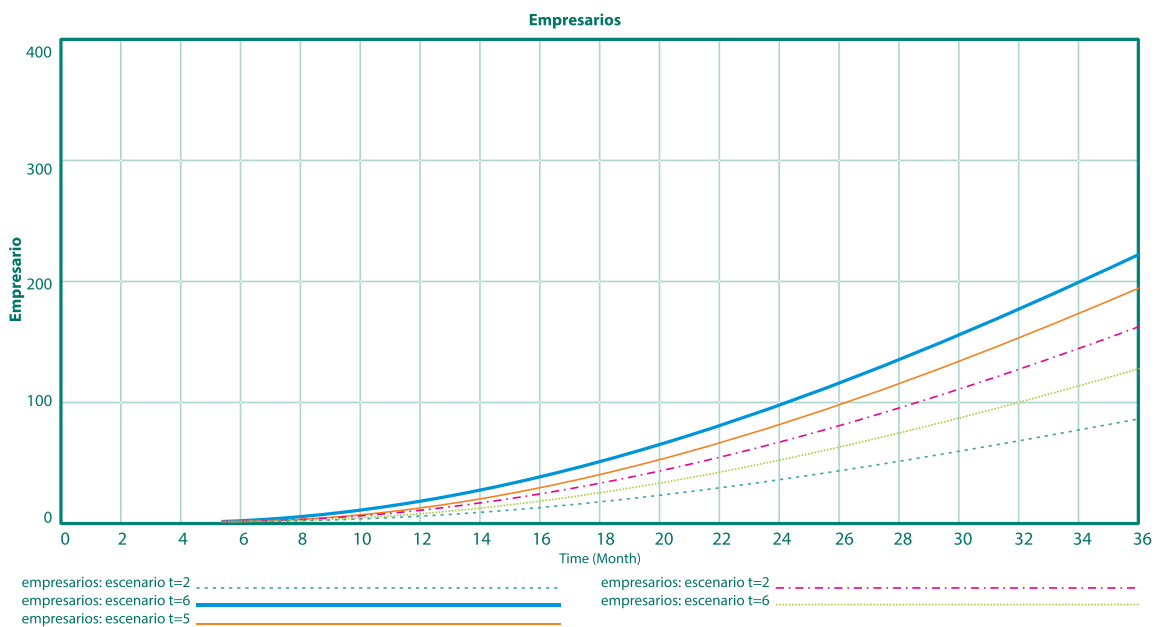


Figura 10. Simulación tiempo de la dedicación al Análisis de Ideas de Proyecto
Fuente: los autores.

La Figura 10 evidencia que en la simulación, a medida que se aumenta el tiempo de dedicación al análisis de las ideas, se aumenta directamente el número de empresarios exitosos. El efecto es más evidente si se observan los

cambios en la variable Auxiliar Brecha de Empresarios, que disminuye a medida que aumenta el número de empresarios de manera significativa, logrando cerrar la brecha con rapidez, como lo evidencia en la Figura 11.

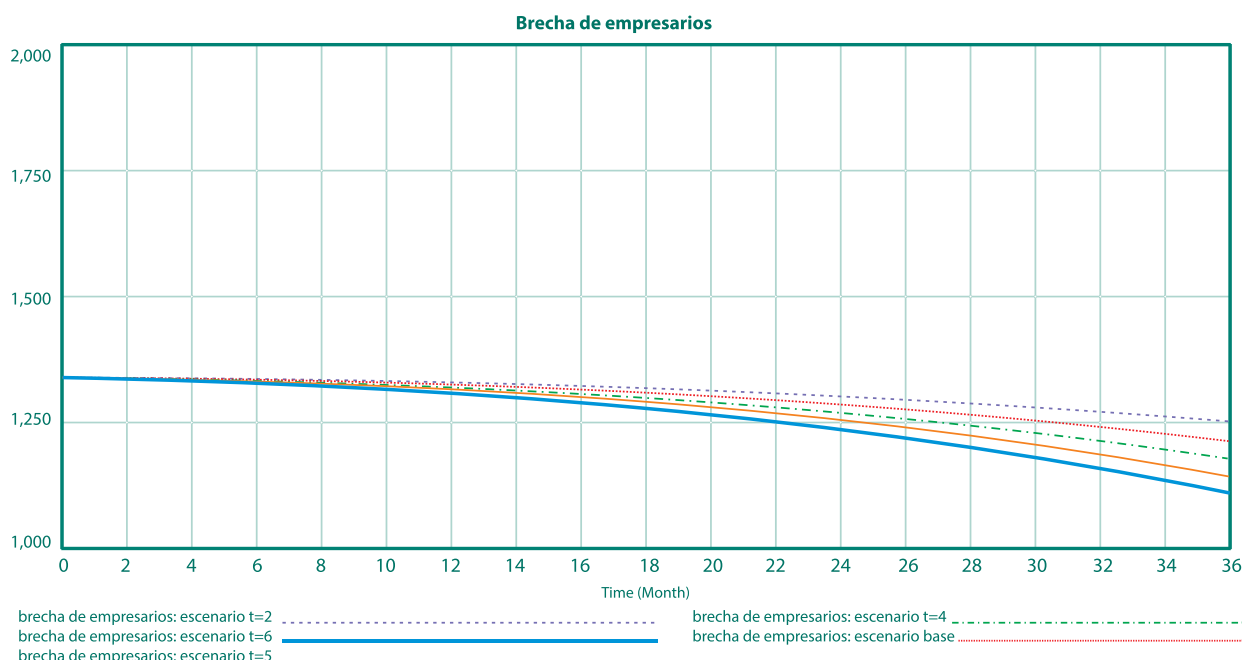


Figura 11. Disminución de la Brecha de Quiebras
Fuente: los autores.

Quiere decir esto que la variable Tiempo, en cuanto al análisis de los proyectos propuestos se refiere, haría disminuir el número de quiebras, esto es, de la calidad del tiempo dedicado a la evaluación, pueden surgir más éxitos empresariales. Es una condición que es preciso analizar, ya que las políticas de empresas no deben ser una condición de cantidad, sino por el contrario, una condición de calidad; es más garantía para un sistema de emprendimiento financiar pocas empresas con altas posibilidades de ser exitosas, que financiar muchas empresas condenadas a unas tasas elevada de fracasos; cuesta afirmar esta realidad, pero muchos de los sistemas funcionan mostrando tasas elevadas de indicadores.

Simulación del flujo de ideas

Si se simula el efecto de variar el Flujo de Ideas, el número de Empresarios y las Quiebras, manteniendo las demás variables constantes, se evidencia que el comportamiento es similar tanto para el nivel de empresarios como para las quiebras de empresas. (Figura 12).

El análisis determina que a medida que se formulan políticas para incentivar emprendedores, el flujo de ideas crecerá en forma significativa, (casi que en una progresión geométrica), y que, en aras de la calidad y análisis de los proyectos, no es plausible; quiere decir entonces que podría convertirse en un bucle de retroalimentación positiva (crecimiento) sin control (Figura 13).

Simulación de los empresarios meta

Si se simula el aumento del número de Empresarios meta, manteniendo las condiciones iniciales, el modelo se estabiliza, pero no cierra las brechas respectivas, como se muestra en la Figura 14.

Tanto las quiebras como las ideas se mantendrán constantes, comportándose como un modelo lineal de crecimiento, que no ha sido analizado en términos dinámicos, dejando a la deriva sus límites de crecimiento. Un modelo lineal solo puede medir pobremente la gestión del crecimiento empresarial; puede ser una política muy acogedora y una meta muy deseada, mas solo puede ser un crecimiento empresarial aparente.

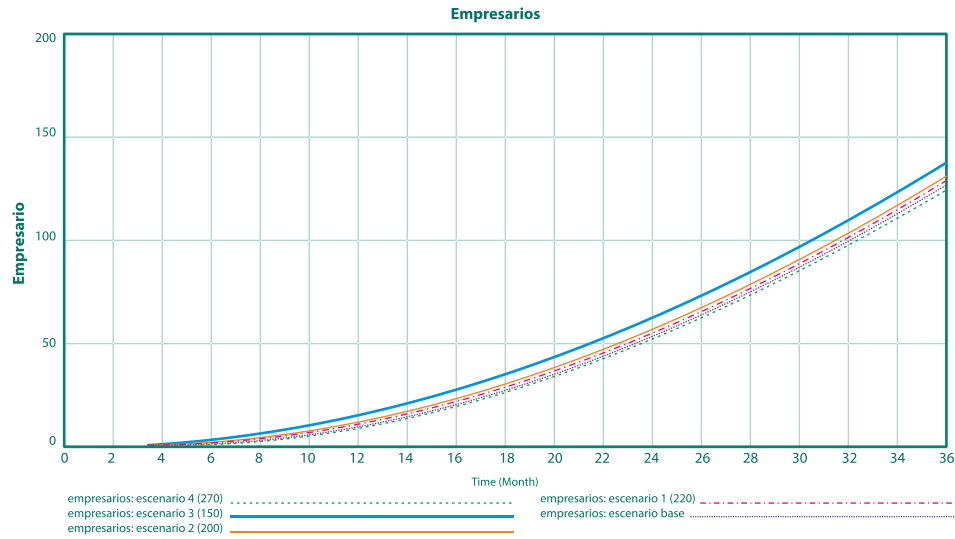


Figura 12. Simulación del Flujo de Ideas
Fuente: los autores.

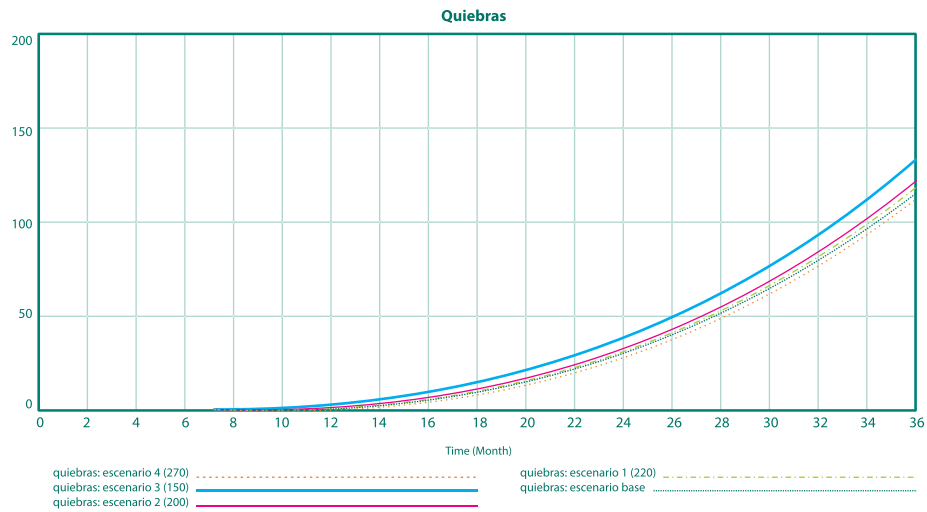


Figura 13. Comportamiento de la Quiebra de Empresarios
Fuente: los autores.

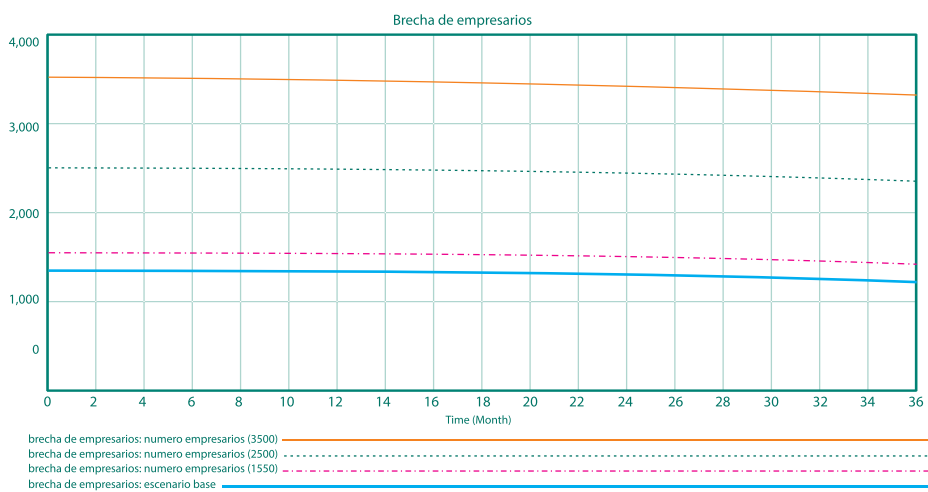


Figura 14. Simulación de los Empresarios meta
Fuente: los autores.

Está demostrado en varios estudios consultados en el estado del arte de este artículo que el fenómeno de quiebras empresariales no afecta a las grandes empresas regionales, nacionales, y demás. Algunos estudios consultados en el estado del arte de este artículo demuestran que el fenómeno de quiebras empresariales no afecta a las grandes empresas regionales, nacionales, y demás. Debería preocupar a diversas sociedades del mundo moderno, que actualmente predicen e incentivan a jóvenes a desarrollar iniciativas emprendedoras que en muchas ocasiones terminan siendo fracasos.

Para este artículo de prospectiva, los resultados encontrados no necesariamente son una verdad absoluta, depende de la visión obtenida en las diferentes simulaciones, más sin embargo, la calidad de la idea de negocio, la asertividad en la formulación del proyecto, una actitud positiva frente a una eminente crisis, combinada con todos los entes involucrados en el proceso emprendedor, actuando en la calidad de todos los procesos y disminuyendo los indicadores a mostrar, podrían resultar en mejores resultados de éxito para los programas de emprendimiento financiados a través del Estado colombiano.

Conclusiones

Las principales limitaciones encontradas en el transcurso de la investigación fueron la insuficiente información sobre el estado del arte en cuanto a modelación dinámica de emprendimiento, el desconocimiento de la metodología Pensamiento Sistémico de los actores del emprendimiento, así como también la falta de información estadística del proceso.

En esta investigación se obtuvo y se aplicó un marco metodológico sistémico y sistemático que utiliza herramientas no integradas para el estudio y mejoramiento de cadenas de valor en el Fondo Emprender, el cual incluye tanto la modelación como su simulación. Este marco se aplicó al Proceso de Formación de Emprendedores del SENA, y la consistencia de los resultados validó el marco metodológico propuesto como un instrumento de análisis y exploración de los factores claves del sistema objeto de estudio, con el fin de simular e identificar puntos de apalancamiento para la mejora de la cadena de valor del sistema. Un elemento característico del marco metodológico es la cuantificación de la evaluación de los factores claves,

en su mayoría cualitativos, de manera consensuada por parte de los actores claves del sistema, como insumo para el modelo de simulación y el análisis de las mejoras resultantes.

En el caso del emprendimiento estudiado, los resultados obtenidos conducen a caracterizar, como punto de apalancamiento, el tiempo de aprobación de la idea. Sin embargo, si se desea impactar altamente la calidad de la cadena de valor de formación del emprendimiento, es pertinente intervenir en gran medida los atributos de idoneidad. Se puede concluir que la supervivencia de las empresas está determinada por la calidad del tiempo de dedicación a la evaluación de las ideas; y por atributos como la idoneidad, que caracterizan tanto a los agentes humanos como a los físicos, generadores de valor en los procesos.

La metodología propuesta, si bien es solo una primera aproximación sistémica al problema, puede permitir el desarrollo de un modelo dinámico más completo que permita predecir el comportamiento del proceso, permitiendo identificar puntos críticos y de apalancamiento del emprendimiento. En este sentido, este estudio es el insumo principal para desarrollar una tesis de Maestría en Ingeniería Industrial, donde se profundiza en el análisis cuantitativo de los factores de éxito claves para el proceso emprendedor del Fondo Emprender; además se está creando un grupo de investigación para el Centro de Gestión Tecnológica de Servicios (CGTS) en Pensamiento Sistémico, que será matriculado en los semilleros de investigación del SENA, SENNOVA.

Referencias

- Acuerdo 001617 de 2006. Por el cual se modifica el Manual de operaciones del Fondo Emprender. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA.
- Acuerdo 0006 de 2007. Manual de Operaciones Fondo Emprender.
- Acuerdo 007 de 2011. Modificación del acuerdo 004 de 200. Consejo directivo del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA.
- Aljure, J. P. (2007). Pensamiento sistémico: la clave para la creación de futuros realmente deseados, revista ELEGIR, 9, 1-9.
- Cárdenas, M, y Mejía, C. (2007). *Informalidad en Colombia: Nueva Evidencia*.

- Colombia Global Entrepreneurship Monitor (2012). *Reporte anual Colombia.2011* GEM Recuperado de file:///C:/Users/revistaitastin/Downloads/GEM-Colombia-2011.pdf
- Congreso de Colombia. Ley 905 de 2004 *Por medio de la cual se modifica la Ley 590 de 2000 sobre promoción del desarrollo de la micro, pequeña y mediana empresa colombiana y se dictan otras disposiciones.*
- Congreso de Colombia, Ley 789 de diciembre 27 de 2002. *Apoyo al empleo y la protección social y sus decretos 3930 de noviembre 9 de 2006 y 934 de noviembre 4 de 2003.*
- Congreso de Colombia Ley 1014 de enero 26 de 2006 *Fomento a la Cultura del Emprendimiento.*
- Congreso de Colombia Ley 344 de 1996. *Ley de Ciencia y Tecnología, Financiación de proyectos para creación de Empresas.*
- Congreso de Colombia Ley 1676 del 20 agosto de (2013).Por el cual se promueve se promueve el acceso al crédito y se dictan normas sobre garantías mobiliarias.
- Congreso de Colombia Ley 30 de diciembre de 1992. por el cual se organiza el servicio público de la educación superior.
- Congreso de Colombia Ley 115 de 1994.Ley general de la Educación. La educación es un proceso de formación permanente, personal, cultural y social que se fundamente en un proceso integral.
- Conpes 3527. (2008) *Política de Competitividad y Productividad*, Bogotá: DNP.
- Cooper, D., y Krista, J. S. (2013). *Entrepreneurship and team participation: An experimental study.*
- DANE. (2005). *Encuesta de Microestablecimientos.* DANE.
- DANE, DNP, y Colciencias (2006). *Segunda Encuesta de Innovación y Desarrollo Tecnológico en la Industria Manufacturera, 2004-2005.* Bogotá: DANE.
- Forrester, J. W.(1986). *Dinámica industrial.* Buenos Aires: El Ateneo.
- Forrester, J. W. (1969). *Urban dynamics.* Norwalk, CT: Productivity Press.
- Forrester, J. W. (1971). *World dynamics* (2 Ed.). Norwalk, CT: Productivity Press.
- Forrester, J. W. (1975). *Collected Papers of Jay W. Forrester.* Norwalk, CT: Productivity Press.
- Hollingsworth, David. 1995. *The workflow reference model, workflow management coalition,* Hampshire, UK, 1995.
- Kantis, H. (ed). (2004). *Desarrollo emprendedor. América Latina y la experiencia internacional.* Recuperado de <http://idbdocs.iadb.org/mwg-internal/de5fs23hu73ds/>
- Kantis, H, Ishida, M. y Komori, M. (2002). *Empresarialidad en economías emergentes: Creación y desarrollo de nuevas empresas en América Latina y el Este de Asia.* Washington: BID. Recuperado de file:///C:/Users/revistaitastin/Downloads/1481923.pdf
- O'Connor, J. McDermott, I. (1998). *Introducción al pensamiento sistémico.* Ed. Urano. Barcelona.
- Redondo, Johan Manuel. (2013). *Modelos de mercados de Electricidad.* Tesis doctoral .Doctor en Ingeniería Automática. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales
- Senge, Peter. (1999). *La quinta disciplina.* Ed. Granica. Barcelona.
- Simon, H. A. (1981). *The sciences of the artificial.* Cambridge, MA: MIT Press.
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a complex world.* McGraw-Hill
- Servicio Nacional de Aprendizaje, SENA. (2014). *Estadísticas fondo Emprender.* Cali, SENA, Regional Valle .(documento Interno).
- Stevenson, Howard H., Grousbeck, H. Irving, Roberts, Michael J. y bhide, Amarnath,(1999) *Emprendimientos y al empresario,* Quinta edición, Boston: Irwin / McGraw-Hill, p. 5.
- Tarapuez Chamorro, Edwin; Osorio Cevallos, Hugo; Botero Villa, Juan José (2013). *Política de emprendimiento en Colombia 2002- 2010.* *Estudios Gerenciales* 29: 274-283
- Womack & Jones (2005). *How companies and customers can create value and wealth together* hardcover. New York. Free Press

Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos

Use of vegetable fibers in polymer matrix composites: a review with a view to their application in designing new products

Recibido: 01- 10 - 2015 Aceptado: 02-03-2016

Sandra Milena Velásquez Restrepo¹
Gabriel Jaime Pelaéz Arroyave²
Diego Hernán Giraldo Vásquez³

¹ Colombiana, Líder y Desarrollo Tecnológico del Centro de Diseño y Manufactura del Cuero del SENA Itagüí, Antioquia. Bioingeniera, Magíster en Ingeniería, Especialista en Gerencia. Grupo BIOMATIC - Biomecánica, Materiales, TIC, Diseño y calidad para el sector cuero, plástico, caucho y sus cadenas productivas. Correo electrónico: smvelasquez@sena.edu.co

² Colombiano, Instructor / Investigador del Centro de Diseño y Manufactura del Cuero del SENA Itagüí, Antioquia. Ingeniero de Materiales, Magíster en Ciencia e Ingeniería de Materiales. Grupo BIOMATIC - Biomecánica, Materiales, TIC, Diseño y calidad para el sector cuero, plástico, caucho y sus cadenas productivas.

³ Colombiano, Profesor del Programa de Ingeniería de Materiales de la Universidad de Antioquia. Ingeniero Mecánico, Magíster en Ingeniería. Grupo de Materiales Poliméricos.

Resumen

Las fibras vegetales se están convirtiendo en una alternativa realmente llamativa para aplicaciones industriales por su bajo costo, peso ligero y por ser una materia prima renovable con propiedades superiores a otros materiales cuando se utiliza como refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica. Este tipo de materiales se vienen utilizando en industrias como calzado y marroquinería, componentes en caucho, sector transporte y construcción, por citar los más relevantes. En este trabajo se presenta una revisión sobre el uso de algodón, fique, yute y cáñamo en compuestos de matriz polimérica, iniciando con la clasificación de las fibras vegetales y sus propiedades. Se describe la evolución del uso de las fibras naturales estudiadas en diversos componentes, los principales desafíos para la obtención de compuestos con altas propiedades, y aspectos a considerar por los responsables por el diseño de productos industriales o de consumo masivo.

Palabras Clave: compuestos poliméricos, fibras naturales, materiales compuestos biodegradables, resistencia mecánica, aplicaciones.

Abstract

Natural fibers are becoming a really striking alternative for industrial applications because of its low cost, light weight and as a renewable raw material. This type of fibers shows better properties than other conventional materials when used as reinforcement in polymeric composite materials (PCM). Because of these facts, these materials are being used in footwear and leather goods, rubber parts, vehi-

cles and building industry. This work is a review about the use of cotton, fique, yute and hemp in PCM, starting with the classification of vegetable fibers and its properties. The evolution of natural fibers as raw materials for industry and the key challenges for manufacturing articles with high performance properties are described. Remarkable considerations for designers about properties of PCM are stated.

Keywords: polymer composites, natural fiber, biodegradable composites, mechanical strength, applications.

Introducción

Durante las últimas décadas se ha incrementado significativamente el uso de materiales poliméricos en las más diversas aplicaciones, debido a algunas importantes ventajas frente a otros materiales, como la facilidad de procesamiento, la productividad que puede alcanzarse en su obtención, su baja densidad y su bajo costo (Albinante *et al.*, 2013; Meza *et al.*, 2015). Es una práctica frecuente mejorar las propiedades de los materiales poliméricos mediante la incorporación de partículas, tejidos o fibras de diferente naturaleza, obteniendo materiales compuestos de matriz polimérica termoplástica (Albinante *et al.*, 2013; Araujo, *et al.*, 2008; Mukhopadhyay y Fanguiero, 2009), elastomérica (Mohanty, 2005; Nair y Joseph, 2014) o termoestable (Meza *et al.*, 2015; Raju y Kumarappa, 2012; Shih, 2007; Yousif *et al.*, 2012).

Diversos estudios coinciden en señalar las ventajas de usar fibras naturales como cargas en compuestos de matriz polimérica (Baillie, 2004; Bledzki, *et al.*, 2002; Mohanty *et al.*, 2005; Netravali, 2005; Pickering, 2008), entre las que se destacan: provienen de recursos renovables, lo cual facilita su disponibilidad; son de bajo costo, biodegradables, por lo tanto se atenúa el impacto sobre el medio ambiente, y además son livianas. Una característica de gran interés es que presentan propiedades mecánicas que, en algunas aplicaciones, son comparables con materiales de refuerzo sintéticos convencionales como las fibras de vidrio o de carbono (Kalia *et al.*, 2009; La Mantia y Morreale, 2011; Satyanarayana *et al.*, 2007; Satyanarayana *et al.*, 2009).

Las fibras naturales se clasifican según su origen vegetal, animal o mineral. A su vez, las fibras de origen vegetal se clasifican de acuerdo con la parte de la planta de la que se extraen (Joshi, 2004), como se muestra en la Figura 1.

Fibras vegetales usadas en compuestos de matriz polimérica

La revisión presentada en este trabajo aborda el uso de fibras vegetales, como algodón, fique, cáñamo y yute, por ser las de mayor consumo en compuestos de matriz polimérica, actuando, incluso, como reforzantes en numerosas aplicaciones. Estas fibras están constituidas principalmente por celulosa, lignina, pectina y hemicelulosa (Thakur, 2013).

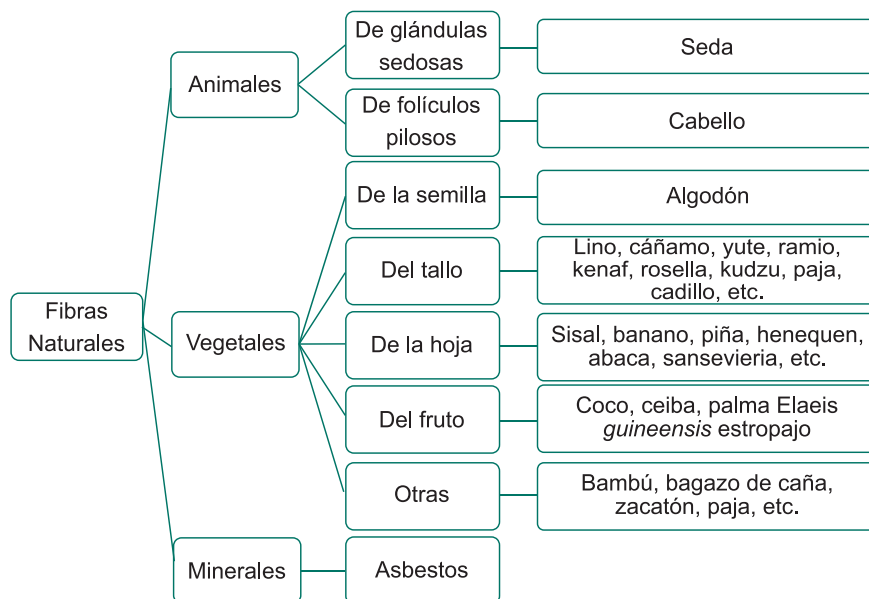


Figura 1. Fibras naturales clasificadas según su origen
Fuente: (John y Thomas, 2008).

La celulosa es el componente estructural más importante en la mayoría de las fibras naturales de origen vegetal, presentándose en forma de microfibrillas cristalinas alineadas a lo largo la longitud de la fibra (Satyanarayana et al., 2009). Es resistente a la hidrólisis y a agentes oxidantes, pero puede degradarse parcialmente cuando se expone a ácidos fuertes (Thakur, 2013). Las microfibrillas de la celulosa están recubiertas por la hemicelulosa, una estructura de cadenas lineales ramificadas compuestas por polisacáridos de peso molecular inferior, que permiten el enlace de las fibras de celulosa con la pectina. La hemicelulosa es hidrófila y puede ser fácilmente hidrolizada por ácidos y bases diluidas.

La lignina es un polímero que resulta de la unión de varios alcoholes fenilpropílicos, que brindan rigidez a la pared celular, haciéndola resistente al impacto y la flexión; es hidrofóbica, resiste la hidrólisis ácida, es soluble en álcali

caliente y de fácil oxidación. La lignificación de los tejidos, además, les proporciona mayor resistencia al ataque de los microorganismos (John y Thomas, 2008). La pectina es un complejo polisacárido aniónico, que proporciona flexibilidad a las fibras dado que su estructura es altamente ramificada (Summerscales et al., 2010; Thakur, 2013).

El contenido de celulosa, lignina, pectina y hemicelulosa en las fibras vegetales influye en sus propiedades, siendo una práctica común eliminar la lignina y la pectina para mejorar el efecto reforzante de las fibras naturales (Dittenber y GangaRao, 2012). Un estudio sobre lino, fibras de yute y sisal mostró que la degradación de fibras de lino comienza a una temperatura relativamente más alta que las otras fibras, lo cual se atribuye a su bajo contenido de lignina (Manfredi et al., 2006). En la Tabla 1 se presenta la densidad y el contenido de reportados en la literatura para algodón, cáñamo, yute y lino (Moriana et al., 2014; Fiore et al., 2014).

Tabla 1. Composición química y densidad de algodón, fique, cáñamo y yute

Fibra	Celulosa (%p/p)	Hemicelulosa (%p/p)	Lignina (%wt)	Cenizas (%p/p)	Densidad (g/cm ³)
Algodón	85 - 90	5,7	----	2	1,5 - 1,6
Cáñamo	69 - 70	20-22	5,5 - 5,7	5,8	----
Yute	72	13	13	2,5	1,3
Lino	81	16,7 - 20,6	3	----	1,50

Fuente: (Moriana et al., 2014; Fiore et al., 2014).

El contenido de celulosa, el ángulo microfibrilar y las dimensiones celulares influyen en las propiedades macroscópicas de las fibras vegetales (Dittenber y GangaRao, 2012; John y Thomas, 2008; Wong et al., 2010; Fiore et al., 2014). La resistencia a la tracción y el módulo de Young aumentan con la longitud de la célula y con el contenido de celulosa, es decir, con el grado de polimerización de la misma (Methacanon et al., 2010; John y Thomas, 2008). La resistencia a la tracción del yute y del cáñamo se reportan en el rango de 400 a 800 N/mm² y 550 a 900 N/mm², respectivamente, propiedades asociadas a sus altos contenidos de celulosa (Sen y Reddy, 2011). El ángulo microfibrilar es el comprendido entre el eje de la fibra y las microfibrillas, cuyo diámetro está entre 10 y 30 nm, e incide significativamente en las propiedades mecánicas de las fibras de tal manera que mientras más agudo sea el ángulo mayor resistencia y rigidez presentan las fibras, y a medida que se incrementa el ángulo lo hace la ductilidad.

A mayor porosidad de las fibras (Wong et al., 2010; Yousif et al., 2012), mayor absorción de humedad que

disminuye la resistencia de las fibras (Methacanon et al., 2010). Un mayor contenido de hemicelulosa también aumenta la absorción de humedad, y además acelera el proceso de biodegradación (Yousif y El-Tayeb, 2009).

A continuación se describe la evolución del uso de algodón, fique, cáñamo y yute, objeto del presente estudio, hasta cuando llegaron a hacer empleados como refuerzos en materiales compuestos de matriz polimérica.

Evolución del uso de fibras naturales

Algodón

El algodón fue el primer textil originario del Perú, sin embargo, se cultiva en todas las regiones tropicales de clima templado alrededor del mundo. De las fibras provenientes de las semillas, el algodón es la más importante, ya que se ha usado durante al menos 5000 años (Mwaikambo, 2006). En el siglo XIII se amplió el comercio europeo de algodón

y en el siglo XV, Venecia, Amberes y Haarlem eran puertos importantes para su comercio, así como para la venta y el transporte de tejidos de algodón (Thakur, 2013). Su demanda se ha duplicado desde la década de los ochenta del siglo veinte. En la actualidad, el mayor productor es China con el 24% de la producción mundial, seguida de Estados Unidos, con un 19%, y la India, con el 13%. La principal aplicación de la fibra de algodón es la elaboración de ropa y calzado, sin embargo, también se utiliza en productos para el hogar como cortinas, tapicería, colchones, edredones (Begum e Islam, 2013), entre otros.

Hoy en día, se buscan usos novedosos para las fibras de algodón en aplicaciones tradicionales, como los investigados por Hashem y sus colaboradores (Hashem et al., 2009), logrando tejidos de algodón libres de arrugas y con mayor suavidad, sin disminuir sus propiedades de resistencia (Hashem et al., 2009; Eryuruk, 2012).

Fique

El fique tiene su origen en los trópicos de América, sobre todo en las regiones andinas de Colombia, Venezuela y Ecuador, donde prevalecen las condiciones climáticas apropiadas para su cultivo durante casi todo el año (Dhanabalan y Joshi, 2014). Su nombre botánico es *Furcraea Macrophylla*, también conocida con el nombre de sisal (Gómez y Vázquez, 2012). Existen diversas variedades de sisal, de acuerdo con las condiciones climáticas de donde proviene el cultivo y las diferentes características morfológicas (Ramakrishna, 2010). Hoy en día, el sisal se encuentra en las regiones más cálidas de México, en muchas partes de África, en India Oriental y en muchos otros países tropicales (Gómez y Vázquez, 2012). Con la introducción de telares horizontales en América, los españoles proporcionaron un avance tecnológico en la tejeduría con este tipo de fibra para aplicaciones en alpargatas y textiles, principalmente para la fabricación de costales. Al finalizar el siglo XIX, la demanda y producción de costales aumentó de manera considerable debido al inicio de las exportaciones de café; fue entonces que la región del oriente antioqueño desarrolló la artesanía de los costales, la cordelería, la elaboración de alpargatas y de enjalmas. La demanda fue tan grande que se necesitó importar costales hechos con yute, lo que indujo al Gobierno a estimular la creación de empresas y, en consecuencia, la importación de maquinaria especializada para el procesamiento del fique (Gómez y Vázquez, 2012). Sin embargo, con la invención de la fibra textil sintética de polipropileno, con la que se empezaron a fabricar costales para productos transportados a través de

contenedores, el gremio fiquero se ha visto cada vez más afectado. Por esto, día a día se buscan nuevas aplicaciones con valor agregado para la fibra de fique en el área textil, industrial y artesanal, como telas para zapatería, tapicería, cortinería, geotextiles, etc. (Gómez y Vázquez, 2012; Gañán y Mondragón, 2002).

Cáñamo

El cáñamo es una de las fuentes más antiguas de las fibras textiles, llegando, incluso, a rivalizar con el lino en el siglo XIX como la principal fibra textil de origen vegetal (Small et al., 2002). Por provenir de una planta opiácea, su cultivo ha tenido prohibiciones en varios países, pero en los últimos 30 años se han presentado significativos avances para el cultivo legal de cáñamo en Europa occidental, especialmente en la utilización de esta fibra para darle valor agregado a diversos productos utilizados en telas para ropa, calzado, bolsos, velas y papel, se buscan aplicaciones innovadoras, como geotextiles y materiales compuestos (Ranalli y Venturi, 2004).

Yute

El yute es un producto agrícola de gran importancia y es una de las fibras naturales más comunes en los países del tercer mundo, como India, China, Bangladesh, etc. La industria del yute tiene especial importancia en la economía de la India y sigue siendo una importante fuente tradicional de divisas (Dey, 2005; Roul, 2009), sin embargo, al igual que el fique, se enfrenta a la dura competencia de las fibras sintéticas. Tiene diversas aplicaciones en materiales decorativos y de mobiliario, como pantallas de lámparas, cubiertas de pared, cortinas, tapicerías, etc. Hoy en día, el yute está entre las fibras menos costosas del mercado, ya que su precio es muy inferior al de otras fibras, como la de vidrio; y es por esto que en términos de volumen, es ahora la segunda fibra más importante en el mundo, después del algodón (Mohanty et al., 2005). En la actualidad, una de las aplicaciones que se le ha venido dando es como refuerzo en materiales compuestos. Sin embargo, posee algunos inconvenientes, por lo que se requiere una modificación química que facilite la humectación con el fin de mejorar la interacción fibra-matriz. Rana y Jayachandran (2000), mencionan también el uso de compatibilizantes para la mejora de la interacción entre los materiales.

Teniendo en cuenta esta perspectiva, se han realizado innumerables estudios en gran variedad de fibras naturales tales como lino, cáñamo, yute, sisal, fibra de coco, banano, fique, heno, entre muchas otras (Netravali, 2005), usando a su vez una extensa variedad de matrices poliméricas entre las que se destacan polietileno (Albinante et al., 2013), polipropileno (La Mantia y Morreale, 2007, Khalil et al., 2000), poliestireno (Khalil et al., 2000), resinas de poliéster (Lovely, 2004) y caucho natural (La Mantia y Morreale, 2011). A pesar de sus ventajas, el uso de fibras naturales como material de refuerzo reviste también varios desafíos. Antes de describirlos, se hablará primero de las características de los materiales compuestos.

Materiales compuestos de matriz polimérica con fibras naturales

Los materiales compuestos están conformados como mínimo por una matriz y un refuerzo de naturaleza diferente, que conservan sus propiedades físicas, químicas y mecánicas de forma individual, y sin embargo, al emplearse de manera adecuada se logra un material que combina sus cualidades individuales (Moriane et al., 2014). En la actualidad, la mayoría de los materiales compuestos utilizados en la industria se basan en matrices poliméricas (Taj et al., 2007).

En la India existe una larga tradición en la producción de compuestos que emplean fibras naturales para aplicaciones como tuberías, paneles y perfiles. Sin embargo, a raíz de las críticas de los últimos años alrededor de la preservación de los recursos naturales, el uso de la fibra natural se ha reinventado en América del Norte y Europa Occidental, porque estos países han puesto un alto interés en las materias primas renovables.

Los materiales poliméricos reforzados con fibras naturales son compuestos a los que las fibras incrustadas en la matrices les confieren propiedades de alta resistencia y rigidez, actuando como cargas reforzantes que actúan como elementos de soporte de cargas mecánicas; la alineación y posición de las fibras, además, protegen el compuesto contra el medio ambiente y posibles daños (Begum et al., 2013). Es posible mejorar las propiedades mecánicas de materiales poliméricos de uso convencional, mediante la incorporación de fibras de alta resistencia, ampliando el campo de aplicación desde el sector calzado hasta la industria aeroespacial, dependiendo del tipo de fibras utilizadas como refuerzo y la resistencia inicial de la matriz polimérica de partida.

El principal desafío asociado al uso de fibras naturales como material de refuerzo de matriz polimérica es la incompatibilidad entre las fibras en estado de entrega y las matrices poliméricas, lo que conlleva a la formación de agregados durante el procesamiento del material compuesto; estos agregados dificultan el proceso de fabricación del compuesto y disminuyen su durabilidad, su resistencia a la humedad y al fuego, limitan sus temperaturas de procesamiento y producen alta variabilidad en propiedades (Dittenber y GangaRao, 2012). La incompatibilidad se debe a la presencia de grupos hidroxilo en las fibras naturales, lo cual las torna hidrofílicas, mientras que las matrices poliméricas son hidrofóbicas (Dittenber y GangaRao, 2012; Xie et al., 2010), conduciendo a una menor fuerza interfacial que cuando se usan fibras de vidrio o de carbono (Dittenber y GangaRao, 2012). Otra desventaja de las fibras naturales es su baja temperatura de degradación térmica en atmósferas oxidativas, inferior a 200°C, teniendo en cuenta que el procesamiento de los termoplásticos se realiza con temperaturas superiores a 200°C, como ha sido reportado para fibras naturales empleadas como refuerzo de polietileno de alta densidad (Araújo et al., 2008); sin embargo, este comportamiento no es una limitante para reforzar matrices elastoméricas o un amplio rango de polímeros termoestables.

Para mejorar la compatibilidad de las fibras naturales con las matrices poliméricas, se aplican a las fibras tratamientos superficiales físicos o químicos (Dittenber y GangaRao, 2012). Los métodos físicos se aplican para separar las fibras en filamentos individuales o alterar la morfología de las fibras, generando poros o mayor rugosidad, y con ello mejorar el anclaje mecánico con la matriz. Entre los métodos reportados destacan la explosión de vapor que satura las fibras y las abre en sus filamentos constituyentes (Mukhopadhyay y Figueiro, 2009), y métodos termomecánicos como el estiramiento o el calandrado (Bledzki et al., 2002), extrusión, calandrado, moldeo por compresión y moldeo por inyección (Nair y Josep, 2014).

Los tratamientos químicos buscan reducir la polaridad de las fibras para tornarlas menos hidrofílicas; los más usados son mercerización, acetilación o propionilación, y silanización (Albinante et al., 2013). En la mercerización se exponen las fibras a una solución de hidróxido de sodio que somete la lignina a una hidrólisis básica, aumentando la rugosidad superficial de la fibra, lo cual mejora la adherencia mecánica. La acetilación y la propionilación consisten en generar una reacción de esterificación del grupo hidroxilo de las fibras, para lo cual estas se tratan

con anhídrido acético o propiónico. En la silanización se emplean silanos, cuyas moléculas presentan un grupo terminal hidrofóbico en uno de los extremos, que puede desarrollar una interacción del tipo van der Waals con la matriz del compuesto, y en el otro extremo un grupo hidrofílico que puede reaccionar con los grupos OH de la fibra, formando de esa manera un puente entre la fibra y la matriz; este tipo de tratamiento se ha reportado para resinas epóxicas reforzadas con fibras y partículas de bambú (Shih et al., 2007), resinas vinílicas reforzadas con fibras de bambú (Chen et al., 2009), ácido poliláctico reforzado con fibras de hojas de piña (Shih et al., 2014), y resinas epóxicas reforzadas con cáscaras de maní trituradas, tamizadas y modificadas químicamente (Raju y Kumarappa, 2012).

Aplicación de fibras de algodón, fique, cáñamo y yute en materiales compuestos para la industria del calzado y la construcción

Aplicaciones en la industria del calzado

La aplicación de fibras naturales en la industria del calzado es, junto con la industria textil, una de las más antiguas. En esta industria se han desarrollado partes como suelas y plantillas con cáñamo en una matriz de poliuretano (Connor, 1999), incorporando cáñamo a poliéster reciclado (Planet Shoes, 2015), o con corcho y yute en una matriz de latex natural (Rieker, 2015). Para las capelladas, que deben ser altamente flexibles, se han incorporado fibras de cáñamo a una matriz de látex de caucho natural (Beltrán, 2011).

Se ha patentado un inserto de cojín desechable para zapatos con el fin de disminuir las fuerzas impartidas a los pies durante actividades como caminar y correr. El cojín de inserción tiene una primera capa de material fibroso compuesto por algodón, yute, cáñamo y bambú, y la segunda capa es de silicona espumada de celdas abiertas unidas a la primera por un adhesivo polimérico. Las fibras se tratan químicamente para disminuir su humedad y mejorar la absorción del adhesivo (Kim, 2012).

Aplicaciones en la industria automotriz

En la actualidad, existen notables tendencias hacia la sustitución de materiales ya establecidos por varios tipos de fibras vegetales incrustadas en matrices poliméricas. La

industria del automóvil está utilizando lino, cáñamo, yute, sisal, kenaf o madera como producto de refuerzo. La matriz polimérica más utilizada es el polipropileno, aunque están emergiendo muchas aplicaciones en poliuretano (Bledzki et al., 2002), principalmente porque las fibras naturales son más livianas que las de vidrio o carbono.

Fátima y colaboradores estudiaron las propiedades acústicas, de inflamabilidad y biodegradabilidad de fibras de yute de baja y alta densidad, y de compuestos de látex de caucho natural reforzado con ellas para aplicaciones en el sector automotriz y arquitectónico. Las propiedades acústicas se midieron en términos de coeficiente de absorción acústica específica normal y de la pérdida en la transmisión de sonido, mientras que las de inflamabilidad mediante pruebas de propagación de la llama y la densidad del humo generado. Los resultados muestran que el yute de baja densidad es un mejor absorbente de sonido que el de alta densidad; también que los compuestos de látex de caucho natural y yute proporcionan buen aislamiento acústico comparados con los productos disponibles comercialmente, que contienen fibras de vidrio. Ambos materiales, además, mostraron una buena capacidad de autoextinción (Fátima y Mohanty, 2011).

La compañía Mercedes Benz ha utilizado yute y algodón desde hace más de 15 años en componentes de interiores de sus vehículos, aprovechado también su capacidad de aislamiento acústico y que no se astillan en caso de impacto directo; incluso en la actualidad realizan investigaciones para reducir la utilización de fibras sintéticas (Tapia et al., 2013). También han desarrollado compuestos con funcionalidad estructural, utilizándolos en los paneles de las puertas, en los pilares de la cabina, partes de los asientos, parachoques y apoyacabezas (Pickering, 2008).

Fiat Chrysler Automobiles emplea paneles de puerta de para vehículos basados en polipropileno reforzado con fibras naturales de kenaf y cáñamo (Bledzki et al., 2002). Los paneles interiores de energía eficiente del Audi A2 se fabrican con poliuretano reforzado con fibras naturales, como lino, sisal o cáñamo, obteniendo compuestos con muy bajas densidades en comparación con otros materiales, y una alta estabilidad dimensional (Ashori, 2008).

Aplicaciones en la industria de la construcción

El alto crecimiento del sector de la construcción ha implicado el desarrollo de aislantes acústicos y térmicos,

buscando continuamente reducir el ruido y mejorar el confort. Tradicionalmente, se usaban aislantes costosos que empleaban materiales no biodegradables, como fibra de vidrio, espumas poliméricas termoestables y telas de relleno, pero se han desarrollado investigaciones con fibras naturales como el coco en matrices de poliéster (Zulkifh et al., 2008; Zulkifh et al., 2009), yute en matrices de látex de caucho natural (Fátima y Mohanty, 2011), curaua en matriz polietileno de alta densidad (Araujo et al., 2008), y cáñamo en diversas matrices termoestables (Dhakal y Zhang, 2015). El uso de estas fibras han permitido disponer de materiales para aislamiento acústico baratos, biodegradables y reciclables, a partir de recursos renovables. Sin embargo, una limitante a tener en cuenta cuando se usan fibras naturales en matrices poliméricas en la industria de la construcción, es la tendencia a la degradación por exposición al medio ambiente, para lo cual se recomienda aplicar recubrimientos protectores o funcionalizar las fibras (Azwa et al., 2013).

Conclusiones

El uso extensivo de fibras naturales y sus productos se debe a propiedades como baja densidad, alta resistencia, módulo y rigidez específicos, su naturaleza no abrasiva, a que pueden emplearse como cargas hasta obtener altos niveles de llenado, y a su biodegradabilidad. Por otro lado, las fibras naturales son materias primas provenientes de fuentes renovables y altamente disponibles, por lo cual están siendo empleadas en industrias como la automotriz, la construcción, calzado y mobiliario, si bien para su uso adecuado se requiere generar mayor conocimiento sobre sus propiedades para que los diseñadores puedan incluirlas en nuevos proyectos.

Por tratarse de productos naturales, sus propiedades físicas y mecánicas varían considerablemente. Estas propiedades están determinadas por el contenido de celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina, así como la estructura de las microfibrillas, características que dependen del desarrollo de cada individuo y del tipo de planta.

La mayor dificultad para la utilización de fibras naturales en matrices poliméricas es su fuerte carácter polar, que crea incompatibilidad con la matriz; los tratamientos superficiales tanto químicos como físicos, permiten atenuar este problema y al mismo tiempo disminuir la absorción de agua.

Bajo ciertas condiciones de preparación, el efecto reforzante de las fibras naturales es comparable con el de otras sintéticas ampliamente utilizadas en la industria, como la fibra de vidrio. Sin embargo, las fibras naturales presentan mayor variabilidad en sus propiedades mecánicas que las fibras sintéticas, lo cual puede tolerarse en diversas aplicaciones considerando la dificultad para reciclar las de origen sintético.

Referencias Bibliográficas

- Albinante, S., Pacheco, E., e Visconte, L. (2013). Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas. *Química Nova*, 36(1), 114-122.
- Araujo, J., Waldman, W. R., and De Paoli, M. A. (2008). Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibers: Coupling agent effect. *Polymer degradation and stability*, 93(10), 1770-1775.
- Ashori, A. (2008). Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries. *Bioresource Technology*, 99(11), 4661-4667.
- Azwa, Z. N., Yousif, B. F., Manalo, A. C., and Karunasena, W. (2013). A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Materials and Design*, 47, 424-442.
- Baillie, C. (Ed.). (2004). *Green composites: polymer composites and the environment*. Elsevier.
- Begum K. and Islam M.A. (2013). Natural Fiber as a substitute to Synthetic Fiber in: *A Review Research Journal of Engineering Sciences*. ISSN 2278 – 9472 Vol. 2(3), 46-53.
- Beltran, M. (2011). *Calzado Natural*. Recuperado de: <http://e-videncia.com/disenio-e-implementacion-de-una-linea-ecologica-de-calzado-con-la-utilizacion-de-fibras-biodegradables>.
- Bledzki, A. K., Sperber, V. E., and Faruk, O. (2002). *Natural and wood fiber reinforcement in polymers* (Vol. 13). Smithers Rapra Publishing.

- Chen, H., Miao, M., and Ding, X. (2009). Influence of moisture absorption on the interfacial strength of bamboo/vinyl ester composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(12), 2013-2019.
- Connor, D. J. (1999). U.S. Patent No. 5,992,055. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Dey, D. (2005). *Indian Jute Industry at the Cross Road: Focus on West Bengal*. Available at SSRN 756411.
- Dhanabalan, L.S.K.V., and Joshi, M. (2014). Furcraea - A unique fibre. *Textile Trends*, 56(11), 29-34
- Dittenber, D. B., and GangaRao, H. V. (2012). Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(8), 1419-1429.
- Dhakal, H.N. and Zhang, Z. (2015). *The use of hemp fibers as reinforcements in composites*, In *Biofiber Reinforcements in Composite Materials*, pp 86-103.
- Eryuruk, S. H. (2012). Greening of the textile and clothing industry. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 20(6), 95.
- Fatima, S., and Mohanty, A. R. (2011). Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. *Applied Acoustics*, 72(2), 108-114.
- Fiore, V., Scalici, T., and Valenza, A. (2014). Characterization of a new natural fiber from *Arundo donax* L. as potential reinforcement of polymer composites. *Carbohydrate polymers*, 106, 77-83.
- Gañán, P., and Mondragón, I. (2002). Surface modification of fique fibers. Effect on their physico-mechanical properties. *Polymer Composites*, 23(3), 383-394.
- Gómez, C., and Vázquez, A. (2012). Flexural properties loss of unidirectional epoxy/fique composites immersed in water and alkaline medium for construction application. *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 3120-3130.
- Hashem, M., Ibrahim, N. A., El-Shafei, A., Refaie, R., and Hauser, P. (2009). An eco-friendly- novel approach for attaining wrinkle-free/soft-hand cotton fabric. *Carbohydrate Polymers*, 78(4), 690-703.
- John, M. J., and Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate polymers*, 71(3), 343-364.
- Joshi, S. V., Drzal, L. T., Mohanty, A. K., and Arora, S. (2004). Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 35(3), 371-376.
- Kalia, S., Kaith, B. S., and Kaur, I. (2009). Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites—a review. *Polymer Engineering and Science*, 49(7), 1253-1272.
- Khalil H.P.S.A., Rozman, H.D., Ahmad, M.N., and Ismail, H. (2000). Acetylated plant-fiber reinforced polyester composites: a study of mechanical, hygrothermal, and aging characteristics. *Polym Plast Tech Eng*, 39:757-81.
- Kim, E.B. (2012). *Disposable cushion shoe insert*. Generic. Recuperado de: <http://www.google.com.br/patents/US8112907>. Google Patents.
- La Mantia, F.P. and Morreale, M. (2007). Improving the properties of polypropylene-wood flour composites by utilization of maleated adhesion promoters. *Composite Interfaces*, 14(7-9), 685-98.
- La Mantia, F. P., and Morreale, M. (2011). Green composites: A brief review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(6), 579-588.
- Lovely, M., Joseph, K.U., Rani, J. (2004). Isora fibres and their composites with natural rubber. *Progress in Rubber Plastics Recycling Technology*, 20(4), 337-349.
- Manfredi, L. B., Rodríguez, E. S., Wladyka-Przybylak, M., and Vázquez, A. (2006). Thermal degradation and fire resistance

- of unsaturated polyester, modified acrylic resins and their composites with natural fibres. *Polymer Degradation and Stability*, 91(2), 255-261.
- Methacanon, P., Weerawatsophon, U., Sumransin, N., Prahsarn, C., and Bergado, D. T. (2010). Properties and potential application of the selected natural fibers as limited life geotextiles. *Carbohydrate Polymers*, 82(4), 1090-1096.
- Meza C.A., Pazos-Ospina, J.F., Franco, E.E., Ealo, J.L., Collazos-Burbano, D.A., and Casanova, G.F. (2015). Ultrasonic Determination of the Elastic Constants of Epoxy-natural Fiber Composites. *Physics Procedia*, 70, 467-470.
- Mohanty, A. K., Misra, M., and Drzal, L. T. (Eds.). (2005). *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. CRC Press.
- Moriana, R., Vilaplana, F., Karlsson, S., and Ribes, A. (2014). Correlation of chemical, structural and thermal properties of natural fibres for their sustainable exploitation. *Carbohydrate polymers*, 112, 422-431.
- Mukhopadhyay, S., and Fanguero, R. (2009). Physical Modification of Natural Fibers and Thermoplastic Films for Composites - A Review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 22(2), 135-162.
- Mwaikambo, L. (2006). Review of the history, properties and application of plant fibres. *African Journal of Science and Technology*, 7(2), 121.
- Nair, A.B. and Joseph, R. (2014). *Eco-friendly bio-composites using natural rubber (NR) matrices and natural fiber reinforcements*, In Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber, pp 249-283.
- Netravali, A. N. (2005). *Biodegradable natural fiber composites*. Biodegradable and Sustainable Fibres, CRC Press Boca Raton, Cambridge, England, 271-309.
- Pickering, K. (Ed.). (2008). *Properties and performance of natural-fibre composites*. Elsevier.
- Planet Shoes (2015). *A New Way to be Vegan: RENEU Footwear*. Recuperado de: <http://blog.planetshoes.com/tag/eco-friendly-footwear-materials/>
- Raju, G., and Kumarappa, S. (2012). Experimental study on mechanical and thermal properties of epoxy composites filled with agricultural residue. *Polymers from Renewable Resources*, 3(3), 117-138.
- Ramakrishna, G. (2010). *Rheological strength and durability characteristics of sisal fibre reinforced cementitious composites*.
- Rana, A. K., and Jayachandran, K. (2000). Jute fiber for reinforced composites and its prospects. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 353(1), 35-45.
- Ranalli, P., and Venturi, G. (2004). Hemp as a raw material for industrial applications. *Euphytica*, 140(1-2), 1-6.
- Rieker, J. (04 de febrero de 2015). *Creo Shoe Concept*. Recuperado de: <http://www.jennifer-rieker.de/index.php?/project/creo-shoe-concept>.
- Roul, C. (2009). *The international jute commodity system*. Northern Book Centre.
- Satyanarayana, K. G., Guimarães, J. L., and Wypych, F. (2007). Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(7), 1694-1709.
- Satyanarayana, K. G., Arizaga, G. G., and Wypych, F. (2009). Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers—an overview. *Progress in Polymer Science*, 34(9), 982-1021.
- Sen, T., and Reddy, H. J. (2011). Application of sisal, bamboo, coir and jute natural composites in structural upgradation. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 2(3).
- Shih, Y. F. (2007). Mechanical and thermal properties of waste water bamboo husk fiber reinforced epoxy composites. *Materials Science and Engineering: A*, 445, 289-295.

- Shih, Y., Chang, W., Liu, W., Lee, C., Kuan, C., and Yu, Y. (2014). Pineapple leaf/recycled disposable chopstick hybrid fiber-reinforced biodegradable composites. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(4), 2039-2046.
- Small, E., and Marcus, D. (2002). Hemp: A new crop with new uses for North America. *Trends in new crops and new uses*, 284-326.
- Summerscales, J., Dissanayake, N. P., Virk, A. S., and Hall, W. (2010). A review of bast fibres and their composites. Part 1-Fibres as reinforcements. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(10), 1329-1335.
- Taj, S., Munawar, M.A., and Khan, S. (2007). Natural fiber-reinforced polymer composites. *Proceedings-Pakistan Academy of Sciences*, 44(2), 129.
- Tapia, C., Paredes, C., Simbaña, A., and Bermúdez, J. (2013). Aplicación de las Fibras Naturales en el Desarrollo de Materiales Compuestos y como Biomasa. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 19(1).
- Thakur, V.K. (Ed.). (2013). *Green composites from natural resources*. CRC Press.
- Wong, K.J., Yousif, B.F., and Low, K.O. (2010). The effects of alkali treatment on the interfacial adhesion of bamboo fibres. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, 224(3), 139-148.
- Xie, Y., Hill, C.A., Xiao, Z., Militz, H., and Mai, C. (2010). Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(7), 806-819.
- Yousif, B.F., and El-Tayeb, N.S.M. (2009). Mechanical and wear properties of oil palm and glass fibres reinforced polyester composites. *International Journal of Precision Technology*, 1(2), 213-222.
- Yousif, B. F., Shalwan, A., Chin, C. W., and Ming, K. C. (2012). Flexural properties of treated and untreated kenaf/epoxy composites. *Materials and Design*, 40, 378-385.
- Zulkifh, R., Nor, M. M., Tahir, M. M., Ismail, A. R., and Nuawi, M. Z. (2008). Acoustic properties of multi-layer coir fibres sound absorption panel. *Journal of Applied Sciences*, 8(20), 3709-3714.
- Zulkifh, R., Nor, M. M., Tahir, M. M., Ismail, A. R., and Nuawi, M. Z. (2009). Effect of perforated size and air gap thickness on acoustic properties of coir fibre sound absorption panels. *Eur J Sci Res* 28, 242-52.

Revisión sistemática de la integración de modelos de desarrollo de software dirigido por modelos y metodologías ágiles

Systematic review about the integration of model-driven software development and agile methodologies

Recibido: 30-04-2016 Aceptado: 26-05-2016

Juan José Morales Arias¹
César Jesús Pardo Calvache²

¹ Colombiano. Ingeniero de Sistemas. Especialista en desarrollo de software por la Universidad EAFIT, con experiencia en el desarrollo de software y metodologías ágiles soportadas sobre SCRUM, experiencia en tecnologías como J2EE, Oracle PL/SQL, entornos LAMP, WEB con AngularJS, GWT y Struts. Correo electrónico: jmorales24@eafit.edu.co

² Colombiano. PhD y MSc. en Ingeniería Informática por la Universidad de Castilla-La Mancha. Profesor Asistente del Departamento de Sistemas, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. Correo electrónico: cpardo@unicauca.edu.co

Resumen

Actualmente, en algunas instancias, la industria de desarrollo de software se lleva a cabo por medio de actividades manuales y/o metodologías robustas que pueden llegar a ser en muchos casos pesadas e ineficientes. Esta situación trae consigo algunos problemas relacionados con la dificultad para producir software de manera oportuna, ágil, a bajo costo y con un alto nivel de calidad. Una manera de mejorar esta situación está en añadir al proceso de desarrollo de software el formalismo y la abstracción necesaria que permita automatizar y optimizar las tareas más críticas definidas, a partir de las metodologías utilizadas en las empresas de software, y desde una perspectiva ágil. Esto añadiría valor agregado a los negocios y mejoraría el proceso de software considerablemente. En este sentido, con el objetivo de conocer las bondades de los enfoques ágiles y los entornos de programación dirigidos por modelos, se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura en relación con los proyectos donde se integran estos enfoques a nivel mundial, así como la identificación de los beneficios declarados por diferentes estudios.

Palabras clave: desarrollo de software dirigido por modelos, arquitectura dirigida por modelos, ágil, proceso software, desarrollo.

Abstract

Currently, in some instances of the software development industry are carried out by means of manual activities and/or robust methodologies which can be often heavy and inefficient. This

situation brings several issues related to the difficulty to produce software in a timely manner, agile, at low cost and with a high quality level. A way to improve this situation is to incorporate in the software development process the formalism and abstraction needed to automate and optimize the most critical tasks defined from methodologies used in software companies and starting from an agile approach. This would add value to the business and would improve significantly the process of software. In this sense, in order to publicize the benefits of agile approaches and programming environments driven models, a systematic review of the literature has been conducted so as to the projects where these approaches have been integrated globally. Besides, it has been possible to identify some benefits, which have been reported by different studies.

Keywords: Model driven software development (MDSD), model driven architecture (MDA), agile, software process, development.

Introducción

Los primeros lenguajes de programación como *Assembler* (Batson et al., 2015), permitían escribir programas en los cuales se pueden mover datos a direcciones de memoria específicas y ejecutar operaciones propias del procesador; sin embargo, en este punto el nivel de abstracción estuvo más cercano a la máquina y lo distanció del lenguaje en el que se desarrollan normalmente los problemas humanos. Después de los lenguajes de bajo nivel, surgieron lenguajes procedimentales más estructurados, por ejemplo: *FORTAN* (Chivers & Sleightholme, 2016) y el lenguaje *C* (Kernighan & Ritchie, 1988) donde era posible definir conjuntos de instrucciones con nombres cercanos a la realidad, que se trataban de representar y llamarlos en un orden lógico dentro de la estructura de un programa. A finales de los 80, aparecieron los lenguajes orientados a objetos que permitieron distanciarse un poco de los conceptos relacionados estrechamente con el computador (hardware), para programar pensando más en las características, acciones y relaciones de los objetos que estaban siendo analizados (Terren, Moreno, & Jimenez, 2007). En este punto, el nivel de abstracción y el lenguaje con el cual representamos la realidad en un programa de computadora había evolucionado considerablemente en comparación a su comienzo.

A principios del siglo XXI se desarrolló el Lenguaje Unificado de Modelado (UML), lenguaje de modelamiento que aumentó el nivel de abstracción utilizado para representar la realidad de los sistemas informáticos que eran desarrollados (Object Management Group, 2015). Este lenguaje fue integrado a los procesos de desarrollo de software que habían logrado niveles de aceptación en la industria del software, por ejemplo, Rational Unified Process (RUP) o su variante ágil Agile Unified Process (AUP), utilizan este lenguaje de modelado en sus etapas para representar aspectos diferentes del sistema que son relevantes en las disciplinas definidas en cada una de las fases. En esa época, incluso se desarrollaron herramientas que permitían generar código de software a partir de los modelos construidos (Objects by Design, 2016). Sin embargo, el código generado era demasiado básico, y por lo tanto, los modelos solo eran considerados útiles en las etapas tempranas del desarrollo de software, es decir, en las etapas de análisis y diseño, y el código generado era desechado o simplemente no se utilizaba dado que su adaptación y modificación, en algunos casos, era más costoso que desarrollar una aplicación desde cero (Andrade, Ferreira, & Sinderen, 2004).

En este sentido, algunos investigadores empezaron a interesarse por la implementación de metodologías enfocadas a la utilización de modelos y a su transformación, de acuerdo a ciertos criterios definidos a través de un lenguaje específico de dominio (Domain Specific Language - DSL) en software ejecutable (Haase et al., 2007; The eclipse Foundation, 2016 ; Völter et al., 2006). Con este objetivo se pretendió mejorar la productividad en la industria del desarrollo de software, y aumentar el nivel de abstracción a niveles donde el software y los modelos que lo representan estén acoplados y se puedan cambiar a la misma velocidad que lo hacen los negocios.

Sin embargo, aún no hay un uso lo suficientemente extendido del desarrollo de software dirigido por modelos (Model Driven Software Development - MDSD) y no se logró identificar directrices claras sobre su implementación a nivel general, ya que los esfuerzos que se han realizado en este sentido son aislados y denotan un nivel de inmadurez que ha impedido su industrialización (Bernardo-Quintero & Duitama-Muñoz, 2011).

Por otro lado, la industria del software está tendiendo a integrar e institucionalizar procesos ágiles y menos complejos que le permitan adaptarse a los cambios del negocio en forma oportuna, y que además permitan agregar valor a los usuarios en el menor tiempo posible (Fallas, 2012; Zhang & Patel, 2011). Teniendo en cuenta que

lo anterior es afín a los objetivos de MDSD, en el sentido en que se enfatiza en la capacidad de cambio de los sistemas con respecto a la realidad que pretenden representar y a la entrega temprana de productos de valor, se han planteado algunas propuestas desde diferentes ópticas, cuyo fin es tomar ventajas de estas dos metodologías y formular un proceso de desarrollo donde se aplique lo mejor de estos dos enfoques.

La revisión sistemática ofrece una perspectiva de las iniciativas desarrolladas en torno al desarrollo de software, dirigido por modelos dentro del contexto de las metodologías ágiles, analizando qué aplicaciones prácticas se han llevado a cabo y cuáles han sido sus resultados.

El documento se organizó de la siguiente manera: la primera parte muestra una descripción detallada del proceso utilizado para realizar la revisión sistemática incluyendo

la formulación de la pregunta, selección de las fuentes y estudios, y la extracción de la información. Segundo; muestra los resultados obtenidos en el estudio con base en el análisis de los resultados. Finalmente, se presentan las conclusiones y trabajo futuro.

Diseño de la revisión sistemática

Para la realización de la revisión sistemática del desarrollo de software dirigido por modelos y las metodologías ágiles, se siguió la plantilla de protocolo utilizada en (Biolchini, et al., 2005) y el protocolo para la revisión presentado en (Brereton et al., 2008), el cual se enfocó principalmente en: (i) la formulación de la pregunta, (ii) selección de las fuentes, (iii) selección de los estudios, (iv) extracción de la información, y (v) resumen de los resultados. La Figura 1 muestra el diagrama de flujo de las actividades realizadas en el proceso de revisión.

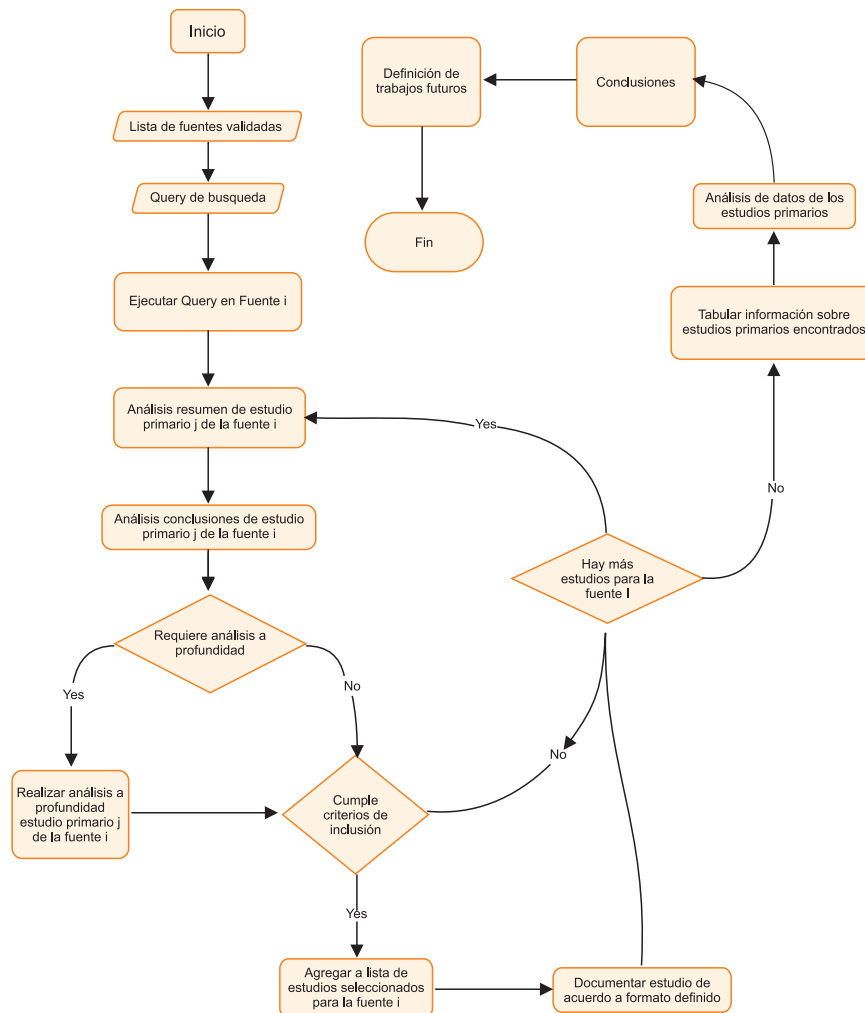


Figura 1. Protocolo de la revisión sistemática
Fuente: los autores.

Formulación de la pregunta de investigación

La pregunta de investigación que se definió para la realización de esta revisión sistemática fue: ¿Qué trabajos e iniciativas relacionadas con el Proceso de desarrollo de software dirigido por modelos y su aplicación en metodologías ágiles se han llevado a cabo? La Tabla I muestra el listado de términos utilizados para diseñar la pregunta de investigación.

En el contexto de la revisión sistemática planeada se observaron y analizaron las propuestas y trabajos existentes relacionados con el Proceso de desarrollo de software dirigido por modelos y su aplicación en entornos de desarrollo ágiles. Como mecanismo de control, se revisaron los trabajos relacionados, entre ellos algunos libros que profundizan en la aplicación práctica y algunas actividades que se llevan a cabo en forma genérica. De estos trabajos se han obtenido las palabras clave, y a pesar de que no se hayan encontrado la mayoría de estas publicaciones en las fuentes de búsqueda seleccionadas al momento de la revisión sistemática, se ha considerado importante tenerlos como referencia dentro del conjunto de los estudios primarios como literatura gris por su relevancia y relación a la revisión sistemática.

La población objetivo que se estudió en la revisión sistemática se representó en las publicaciones de las fuentes de datos seleccionadas y se relacionaron con el objetivo de la revisión sistemática. En la Tabla 1 se presentan los términos utilizados.

Tabla 1. Términos utilizados

Palabras clave	Términos Sinónimo
Process	Procedure, developed, technique
Driven	Guided,based,oriented
Model	pattern, type, archetype
Software	System
Agile	Rapid
Activities	Action, steps
Architecture	Design, definition, structure

Fuente: los autores.

Selección de las fuentes

Con el listado de palabras clave y la utilización de los conectores lógicos “AND”, “OR” y “NOT”, se realizaron las siguientes estrategias de búsqueda:

(process OR procedure OR techniques OR development) AND (model OR patterns OR template) AND (architecture OR design OR structure) AND (driven OR guided OR based OR oriented).

AND (software OR system) AND development AND (activities OR actions OR steps) AND (agile OR scrum OR xp).

En la revisión sistemática se emplearon las siguientes fuentes: Wiley Online Library en el tema de Computer Science, ACM Digital Library, ProQuest y la IEEE Computer Society, los sitios oficiales del Manifiesto Ágil, SCRUM, eXtreme Programming (XP), y otros artículos relacionados con el tema se revisaron como literatura gris. En el momento de realizar la búsqueda estratégica, se adaptó a las características de cada uno de los motores de búsqueda de las fuentes escogidas.

Selección de los estudios

Definidas las fuentes de información primaria, se describió el proceso de selección y análisis de los estudios primarios resultados de la búsqueda, para así determinar su pertinencia y aporte relevante a la revisión sistemática.

La selección de estudios se basó en un proceso iterativo incremental, que permitió llevar a cabo la búsqueda y extracción de los resultados en cada una de las fuentes. El proceso incremental se desarrolló debido a que el proceso de búsqueda y análisis se realizó de forma sucesiva o iteradamente en cada una de las fuentes de búsqueda, de esta forma la información se incrementó a medida que se agregaron datos resultantes del análisis de los estudios seleccionados.

Extracción de la información

Los criterios de inclusión de estudios primarios se enfocaron principalmente en el análisis de los siguientes atributos: (i) título, (ii) resumen, y (iii) las conclusiones de cada estudio. Se buscó identificar en qué medida se proponían o evaluaban los modelos para la implementación de procesos de desarrollo dirigidos por modelos orientados a metodologías de desarrollo ágil. Para determinar la pertinencia de los artículos, se hizo necesario hacer un análisis de su contenido en profundidad, teniendo en cuenta variables como el nivel de descripción del modelo propuesto, su relación con el dominio de metodologías ágiles, y su pragmatismo.

Cómo criterio de exclusión se tuvo en cuenta, luego de una revisión a profundidad, los artículos que hacían un

estudio o diagnóstico general de la metodología, pero que no definían o proponían un modelo para su aplicación en forma concreta.

La documentación de los estudios primarios seleccionados se estructuró en una tabla con el fin de definir las variables concretas de interés y en la cual se tuvo

en cuenta la siguiente información: código, título, subtítulo, fuente, país, año, autores, palabras clave, referencias (estudios secundarios), ideas principales, tipo de proceso propuesto y aplicaciones. La Tabla 2 muestra un resumen del formato usado para representar la información relevante.

Tabla 2. Ejemplo de la plantilla utilizada para organizar la información de un estudio primario

Título	Towards Patterns for MDE-Related Processes to Detect and Handle Changeability Risks
Subtítulo	No hay información.
Fuente	ACM
País	ALEMANIA
Año	2012
Autores	Regina Hebig, Gregor Gabrysiak, and Holger Giese
Palabras clave	Proceso de desarrollo de software, análisis, control de cambios, patrones

Ideas Principales

En el presente artículo se hace un estudio detallado sobre los patrones que pueden aplicarse en casos donde sistemas desarrollados bajo la metodología MDSD tienen repetidos cambios a través del tiempo. Se plantean las diferentes formas en las que se puede afectar la integridad del sistema y se propone una notación para representar los diferentes casos en los que se puede presentar estos riesgos, además de 4 posibles aplicaciones que permiten mitigarlos.

El proceso de desarrollo de software tiene un impacto directo en la productividad y en la calidad de los productos de software. De igual forma, las mejoras en la productividad y la calidad logradas a través de Model Driven-Engineering (MDE) tienen que ser el reflejo de un buen modelo que soporte la dinámica del desarrollo de software en contextos de negocio que cambian fácilmente en el tiempo.

Se descubrieron tres escenarios en los que un proceso de MDE debe controlar la capacidad de cambio del sistema:

- ☐ Pérdida o preservación del contenido del artefacto.
- ☐ Pérdida de relaciones explícitas entre los diferentes artefactos.
- ☐ Actividades automáticas que pueden resultar enganchadas de forma que dos cambios no puedan darse uno independiente del otro.

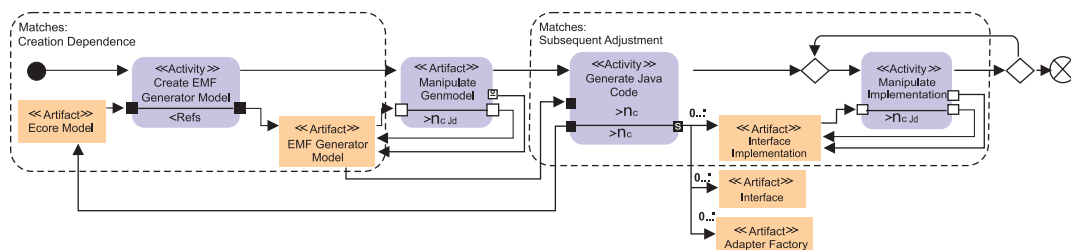


Figura 3. Exemplary process of the EMF case study with initially perceived SwMaMo activities

Se plantea además el siguiente conjunto de patrones para manejar cada situación:

1. Process Proto Pattern Subsequent Adjustment: Se usa en el contexto en que se presenta pérdida inesperada de contenido. La creación actividad inicial de forma automática crea artefacto ajustado y lo llena de contenido en la base de artefacto base (es decir, tanto los artefactos solapan en contenido después de la ejecución). De este modo, ya no existente versión que se considera artefacto ajustado. El ajuste de la actividad agrega aún más el contenido de artefacto ajustado manualmente.
2. Process Proto Pattern Creation Dependence: Este es un antipatrón que hace referencia a la dependencia de referencias entre artefactos. Donde un artefacto de entrada es a la vez un artefacto de salida, creando así una dependencia cíclica.

continúa en la página siguiente

3. Process Proto Pattern Split Manufacture: Este patrón hace referencia al caso de pérdida inesperada de contenido en un artefacto. Aquí se propone conservar el detalle de artefacto antes y después de ser regenerado, y ajustar manualmente los detalles de este.
4. Process Proto Pattern Anchor: Abarca en el caso de pérdida de relaciones explícitas entre artefactos. Aquí cada referencia tiene un ancla en el artefacto que guarda la referencia correspondiente a este en cada regeneración o cambio manual.

Tipo de proceso propuesto
Se propone un conjunto de actividades, patrones y antipatrones para abarcar riesgos que se dan, debido a la capacidad de cambio del sistema en un contexto MDE.
Aplicaciones
Se hace un caso de estudio con un equipo de desarrollo de SAP utilizando EMF y hacen una comparación con las actividades y patrones propuestos.

Fuente: los autores.

Resultados y discusión

Con la información extraída se realizó un análisis de los datos obtenidos, teniendo en cuenta los resultados generales y específicos después de haber sido aplicados los criterios de inclusión y exclusión.

Tendencias de las publicaciones

Luego de aplicar el protocolo para obtener los estudios primarios, se encontraron 42 estudios relevantes relacionados con desarrollo dirigido por modelos, de los cuales 22 tenían relación específicamente con procesos MDSD, orientados a las metodologías ágiles. Luego de un análisis detallado, se seleccionaron 10 estudios primarios

que fueron evaluados bajo criterios de inclusión y exclusión, donde se evaluó en qué medida proponían un proceso específicamente para la aplicación de MDSD en entornos de desarrollo ágil. La Figura 2 muestra la tendencia de las publicaciones desde el año 2000 al 2014. Como se puede observar, hay un creciente interés en el área de MDSD en la última década, concentrándose un mayor interés entre los años 2006 y 2012, donde se concentran el 50% de los estudios encontrados relacionados en relación con este tema. Este indicador nos permite establecer que hay un interés marcado de la industria y la academia por este enfoque de desarrollo de software, y que se están adelantando trabajos a nivel teórico y práctico. Por su parte, no hemos encontrado estudios relevantes para el 2015, quizá, porque aún no se termina el primer semestre del año.



Figura 2. Tendencia de las publicaciones por año
Fuente: los autores.

Distribución por país

La Figura 3 muestra la distribución en orden descendente de los países que reportan más estudios realizados en relación a MDSD, estos son: Estados Unidos, Brasil, España, Alemania, Brasil y China. Con relación a Brasil, China y Kenia muestran interés en la formalización de la industria del software, además, han realizado estudios significativos que abordan el tema específico de MDSD, por ejemplo, en Kenia se desarrolló un modelo Adaptable de MDA (Arquitectura dirigida por modelos) para métodos formales y su integración con metodologías ágiles (Rigworo, 2013), en Brasil se realizó un proceso de desarrollo dirigido por modelo orientado a las pruebas (Almeida & Oliveira, 2014), y en China se diseñó un enfoque conceptual para modelar el proceso de desarrollo de software dirigido por modelos (Duan & Fu, 2006).

Lo anterior permitió observar los diferentes puntos de vista relacionados a las propuestas y soluciones desarrolladas, esto trae consigo un amplio abanico de posibilidades que se pueden implementar en diferentes tipos de empresas relacionadas con desarrollo de software, donde se aplicó una arquitectura de software genérica para diferentes dominios de negocio, y donde se tenga un enfoque orientado a la entrega continua de productos. Asimismo, permite observar que incluso industrias emergentes están viendo el MDSD como una opción aplicable en sus contextos. Por otro lado, la diversidad

en la procedencia de los estudios primarios muestra que este enfoque está adquiriendo interés cada vez más en la industria del software, y que no es una tendencia aislada en ciertos sectores de investigación y desarrollo privilegiados, por ejemplo:

Existen herramientas para la generación de aplicaciones web dirigida por modelos que se vinculan con procesos de negocio y que se han implementado con éxito en entornos empresariales (Kraus, Knapp, & Koch, 2007; Kroiss, Koch, & Knapp, 2009).

Se han implementado generadores de ETL (Procesos de extracción, transformación y carga para análisis de datos) dentro de procesos de inteligencia de negocios que permiten, a partir de un modelo de base de datos, generar extracciones de datos de interés para crear y poblar un modelo intermedio con base en el cual generar consultas que aporten información valiosa para la toma de decisiones (Oracle, 2015; El Akkaoui, Zimanyi, Mazón, & Trujillo, 2011).

Existen herramientas que generan interfaces gráficas Web a partir de modelos, y permiten a su vez administrar modelos de datos que son generados a través de modelos de negocio. En este caso tenemos, por ejemplo, a Open Xava (Paniza, 2011), Moskitt (Hernández, León, & Ferrara, 2015), Spring Roo (Sarin, 2011), entre otros.

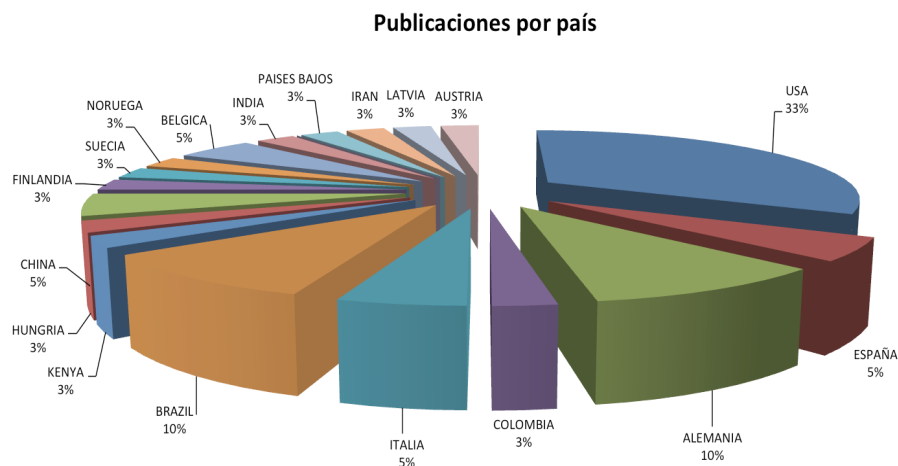


Figura 3. Publicaciones por país.
Fuente: los autores.

Es importante resaltar que el fortalecimiento de la industria de software depende directamente de la ayuda del Estado, universidades y empresas. En Colombia, el Ministerio de Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) (MinTIC, 2016), y otros organismos a nivel nacional y departamental como el SENA (SENA, 2016), INNPULSA (INNPULSA, 2016), RED CLUSTER Colombia (RED CLUSTER COLOMBIA, 2016), (Ruta N, 2016), Parquesoft (Parquesoft, 2016), Bancoldex (Bancoldex, 2016), Fedesoft (Fedesoft, 2016) (Market, 2012), Intersoftware (Intersoftware, 2016), clusters, entre los que se destacan PacifiTIC (PacifiTIC, 2016), CaribeTIC (CaribeTIC, 2016), SinerTIC (SinerTIC, 2016), ClusterTIC Antioquia (ClusterTIC, 2016), Apps.co (Apps.co, 2016), Vive Digital,

cámaras de comercio, entre otros, han impulsado iniciativas que han permitido fortalecer el sector TIC en Colombia. Sin embargo, los temas en materia del desarrollo dirigido por modelos en Colombia son aún bastante lejanos, quizá, porque se desconocen los beneficios asociados a este.

Beneficios identificados de la implementación de MDSD en empresas

A partir del análisis de los estudios primarios, ha sido posible identificar algunos beneficios de la implementación de prácticas de desarrollo de software dirigida por modelos. La Tabla 3 presenta un conjunto de los beneficios identificados.

Tabla 3. Beneficios de la aplicación de MDSD dentro de procesos de desarrollo de software

Beneficio		Descripción
1	Calidad	El software generado bajo el mismo lenguaje específico de dominio (DSL) tendrá la misma arquitectura de referencia y no estará expuesto a errores humanos inherentes a la complejidad del código que tendría que ser escrito a mano, en caso de que el proceso se hiciera en forma manual.
2	Migración y generación de código en múltiples lenguajes - Portabilidad	Se puede migrar un producto fácilmente a la versión más reciente de la tecnología en la que fue implementado o a otra tecnología diferente. Esto es posible, ya que en este caso solo es necesario cambiar los mecanismos de transformación modelo a texto (Model to Text - M2T) sin afectar el modelo. De esta manera, un producto que actualmente está implementado en lenguaje PHP podría ser migrado fácilmente a otros lenguajes, por ejemplo, Ruby o Python cambiando solamente las reglas de transformación para cada lenguaje específico.
3	Integración	A partir del modelo de implementación se puede generar automáticamente un modelo de pruebas que a su vez genere automáticamente un conjunto de pruebas unitarias ejecutables. De igual manera, se puede modelar también procesos de integración continua, en los que se definan los procedimientos para desplegar la aplicación en un ambiente específico.
4	Productividad	Aunque los esfuerzos iniciales se concentrarán en tener un lenguaje específico, lo suficientemente robusto para soportar la necesidades del negocio, este enfoque permite aumentar la productividad del equipo de desarrollo paulatinamente, mejorando el tiempo de entrega de los diferentes entregables definidos. Esto, debido a que lo que antes requería mayor cantidad de tiempo en ser codificado será autogenerado a través de las generaciones modelo a texto (M2T).
5		A través de la automatización se puede generar código ejecutable a partir de modelos formales, usando uno o varias fases de transformación.
6	Separación de ámbitos	Los aspectos del sistema que no pueden ser tratados fácilmente en un solo módulo, pueden variar y afectar los módulos que dependen de este. A través de este enfoque se garantiza la mantenibilidad y disminución de la redundancia del código generado incluyendo sus dependencias.
7	Reutilización	Una vez definidos los DSL (Lenguajes Específicos de Dominio) correspondientes a la arquitectura y al negocio, se pueden reutilizar en diferentes aplicaciones que usen la misma arquitectura o estén relacionadas con el mismo ámbito de negocio.
8	Control de la complejidad a través de la abstracción	Los DSL permiten llevar los problemas a niveles de complejidad más básicos y cercanos al mundo real, encapsulando su complejidad técnica a los procesos de transformación que tendrían que hacerse solo una vez.
9		MDSD sigue los mismos lineamientos de OMG (Object Management Group) [46], donde se establece la independencia y estandarización de los modelos. Esto permite que se pueda inter operar con otras tecnologías que sigan los mismos estándares.

Fuente: los autores.

Soluciones propuestas

La Tabla 4 muestra una clasificación de los procesos propuestos, de acuerdo a su enfoque y relación con metodologías de desarrollo de software convencionales. Asimismo, se pudo observar que un 50% de los estudios primarios proponen o aplican procesos en los cuales se lleva a cabo la integración de enfoques y prácticas de ingeniería dirigida por modelos o MDE y metodologías ágiles (Cockburn, 2006 ; Canós, Letelier, & Penadés, 2003). También se observa que MDSD ha sido integrado al RUP (Kroll, Kruchten, & Booch, 2003), donde el objetivo ha sido integrar las actividades de MDE a las etapas de diseño y elaboración del RUP (Kroll et al., 2003). Otras soluciones están dirigidas a integrar metodologías como Model Driven Testing (MDT) dentro de un proceso en espiral e incremental (Almeida & Oliveira, 2014), o en buscar formas de controlar de manera eficiente y a través de patrones, los cambios en los modelos que pueden afectar el código generado en diferentes escenarios (Hebig, Gabrysiak, & Giese, 2012) y en metodologías para la transformación modelo a modelo (M2M) (The Eclipse Foundation, 2012), o en generación de diferentes capas y niveles de abstracción de código a partir del mismo modelo (El Akkaoui et al., 2011).

En la Tabla 5 se muestra un análisis a nivel general de las propuestas encontradas en los estudios analizados, su relación con otros enfoques y metodologías, y una pequeña descripción de sus ventajas. A partir del análisis

se identificaron algunas tendencias y enfoques en los procesos propuestos. En primer lugar, existe una tendencia marcada a comparar las prácticas de MDE, incluyendo sus actividades y principios a procesos formales como RUP, Scrum y XP. En esta tendencia se destacan procesos como MDD-SLAP (Zhang & Patel, 2011), que al igual que en la metodología de gestión ágil Scrum, también está conformado por *sprints*, con un conjunto de iteraciones que describen actividades propias tanto de MDE como de otras áreas de la ingeniería del software, como el aseguramiento de la calidad e integración continua. Por otro lado, se encuentran procesos como SAGE (Matinnejad, 2011), cuyo principal objetivo es aplicar los principios del enfoque ágil, soportando la entrega de código ejecutable a partir de modelos conflictivos. Este proceso se vale de un conjunto de modelos desde diferentes enfoques que definen diferentes aspectos del sistema, como el comportamiento, el alcance y las interacciones, y a partir de transformaciones entre estos modelos, generar un código ejecutable.

Como se pudo observar en la Tabla 3, hay una disminución de los métodos de desarrollo de software tradicionales, los cuales requieren una gran cantidad de documentación (incluyendo el código) creado a mano. Aunque, como se observa en la Tabla 4, al organizar los estudios por tipo de proceso propuesto, es posible encontrar que algunas propuestas se basan en procesos como RUP y otros en métodos formales, estos se enfocan en mapear las fases que corresponden a la implementación con las actividades propias de MDSD.

Tabla 4. Porcentaje por tipo de proceso propuesto

Cat.	Enfoque	Publicaciones	%
1	MDA - MDT en espiral	1	10%
2	Patrones MDE Manejo de cambios	1	10%
3	Transformaciones multicapa	1	10%
4	Unificación con metodologías ágiles	5	50%
5	Unificación con RUP	1	10%
6	Aplicación de DSL a métodos formales	1	10%

Fuente: los autores.

Tabla 5. Principales procesos propuestos

Nombre del proceso	Orientación	Objetivo Principal	Ventajas	Año
SAGE (Kirby, 2006)	Basado en MDD.	Aplica orientación ágil para software altamente asegurado.	Soporta generación de ejecutables de modelos parcialmente conflictivos.	2006
Hybrid MDD (Guta, Schreiner, & Draheim, 2009)	Basado en Assembly.	Aplica orientación ágil para proyectos medianos y pequeños.	Aplicación parcial de actividades de MDD en colaboración con prácticas tradicionales de programación.	2009
MDD –SLAP (Zhang & Patel, 2011)	Basado en Agile.	Se beneficia de las ventajas de metodologías ágiles y MDD para desarrollar sistemas de comunicación en tiempo real.	Establece una correspondencia entre MDD y las prácticas ágiles.	2011
High Level Lifecycle (Ambler, 2004)(Ambler, 2002)	Basado en Agile.	Escala el desarrollo ágil.	Aplicación a gran nivel de MDD ágil.	2004

Fuente: los autores.

Conclusiones y trabajo futuro

La revisión sistemática realizada en el presente trabajo, reúne los resultados de los estudios primarios relacionados con procesos ágiles para el desarrollo de software dirigido por modelos. La revisión ha seguido un formalismo que ha permitido obtener una perspectiva completa del tema objeto de estudio. Asimismo, de validar los resultados obtenidos a partir del protocolo definido para llevar a cabo la revisión sistemática.

Los estudios seleccionados a través de los procesos definidos de inclusión y exclusión, permitieron obtener estudios relacionados con el tema de estudio. A través de dichos resultados, se logró identificar un significativo interés tanto por el enfoque de desarrollo de software orientado por modelos como por la adaptación de esta al enfoque y/o procesos de desarrollo con enfoque ágil. Con la identificación del crecimiento interés por integrar metodologías ágiles junto a enfoques dirigidos por modelos, es posible pensar que el impacto de estos dos enfoques en las micro, pequeñas y medianas empresas (mipymes) no está lejos del beneficio obtenido por grandes empresas que implementan el MDSD.

Con relación a las propuestas analizadas, es necesario destacar que cada uno de estos aborda un aspecto específico tanto del proceso de desarrollo como de su acercamiento al

manifiesto ágil y aplicabilidad en la industria del software a gran escala. Sin embargo, existen algunos aspectos que no quedan claros, por ejemplo:

- ¿Se pueden integrar etapas del desarrollo de software como los requisitos, las pruebas y el despliegue dentro del marco de MDA?
- ¿Se puede mapear de la misma forma los procesos propuestos con modelos de madurez y capacidad para el desarrollo de software como CMMI?
- ¿Qué roles intervienen dentro de un proceso en el cual se pueda integrar una metodología MDE con metodologías ágiles? ¿Debe integrarse nuevos roles? ¿Cuáles y en qué etapas?
- ¿Existen herramientas que soporten la integración de estas metodologías y en todas las etapas del proceso?
- ¿Es posible aplicar este tipo de metodologías en pequeñas y medianas empresas en forma práctica y a bajo costo?

Este conjunto de incógnitas que surgen, permiten concluir que si bien hay un gran interés y desarrollos significativos para formular y aplicar procesos ágiles de desarrollo de software orientado por modelos, estos aún

se encuentran en una etapa inmadura, y que es necesario proponer soluciones con el fin de abordar un conjunto más amplio de aspectos del desarrollo de software a nivel industrial, que permitan aumentar el nivel de productividad y calidad en el desarrollo de software haciendo uso conjunto y síncrono de las metodologías MDD en el contexto de los procesos ágiles de desarrollo. Como se mencionó al comienzo del análisis de los resultados, no se han encontrado estudios relevantes para el 2015, quizá, porque aún no se termina el primer semestre del año 2016 y podría suponerse que trabajos relacionados aún no han sido indexados por las fuentes consultadas.

La industrialización de los procesos de desarrollo de software es necesaria, y se espera que no esté lejos de convertirse en un escenario posible al igual que en otro tipo de industrias. Es importante reconocer tanto los beneficios del MDSD, así como el esfuerzo que se debe realizar en la definición, adaptación e implementación de soluciones y estrategias que permitan mejorar los procesos productivos en la industria de software, más allá que hacerlo solamente a nivel de gestión como se realiza actualmente a través de la certificación de modelos mundialmente reconocidos como CMMI. El MDSD puede usarse como una solución para dar soporte al cumplimiento de buenas prácticas definidas por otros modelos, así como CMMI, metodologías ágiles, entre otros. Queda trabajo por hacer para llegar a niveles superiores de madurez que permitan tener un proceso refinado y productivo, y a su vez abordar los diferentes aspectos críticos del desarrollo de software, como la calidad, la resistencia al cambio y la escalabilidad. Del trabajo que se haga en este sentido, depende que tanto se aleje la industria de procesos artesanales que afectan su efectividad, oportunidad y eficiencia.

A partir de los resultados obtenidos con la realización de esta revisión sistemática, como trabajo futuro se espera abordar dos líneas de trabajo. En primer lugar, se espera llevar a cabo una segunda ejecución del protocolo en nuevas fuentes de información, esto con el objetivo de identificar un mayor número de trabajos que no fueron encontrados en las fuentes tratadas en esta revisión. En segundo lugar, diseñar una propuesta que permita conducir el desarrollo de software en mipymes a través de la integración de los dos enfoques analizados: (i) MDSD y (ii) enfoques ágiles. Con esta solución se espera poder facilitar el desarrollo de software basado en modelos y a través de un enfoque ágil en mipymes desarrolladoras de software.

Agradecimientos

César Pardo agradece la contribución de la Universidad del Cauca donde trabaja como profesor Asistente.

Referencias bibliográficas

- Almeida, C. C. de J., & Oliveira, A. A. de. (2014). Qualitas: A Proposal of Process Model Development Software Driven Models. In *Proceedings of the 7th Euro American Conference on Telematics and Information Systems* (pp. 28:1–28:4). New York, NY, USA: ACM. doi:10.1145/2590651.2590678
- Ambler, S. (2002). *Agile Modeling: Effective Practices for Extreme Programming and the Unified Process*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Ambler, S. (2004). *The Object Primer: Agile Model-Driven Development with UML 2.0*. Cambridge University Press.
- Andrade Almeida, J. P., Ferreira Pires, L., & Sinderen, M. J. van. (2004). Costs and benefits of multiple levels of models in MDA development. In *Second European Workshop on Model Driven Architecture with an Emphasis on Methodologies and Transformations* (pp. 12–20). Canterbury, UK.
- Apps.co. (2016). *Impulso al desarrollo de aplicaciones móviles*. Recuperado Mayo 5, 2016, from <https://apps.co/>
- Bancoldex. (2016). *Banco de desarrollo empresarial colombiano*. Recuperado Mayo 5, 2016, from <https://goo.gl/FDHOJY>
- Batson, A., Lack, M., & Jones, A. (2015). *x86 Assembly Guide*. Recuperado de <http://goo.gl/LMU44>
- Bernardo-Quintero, J., & Duitama-Muñoz, J. F. (2011). Reflexiones acerca de la adopción de enfoques centrados en modelos en el desarrollo de software. *Ingeniería Y Universidad*, 15(1), 219–243.
- Biolchini, J., Gomes, P., Cruz, A., & Travassos, G. (2005). *Systematic Review in Software Engineering*. Rio de Janeiro, Brazil: Systems

- Engineering and Computer Science Department, UFRJ. Recuperado de <http://goo.gl/ymUlwP>
- Brereton, P., Kitchenham, B., Budgen, D., & Li, Z. (2008). Using a Protocol Template for Case Study Planning. In *12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE 2008)* (pp. 1–8). Bari, Italy.
- Canós, J. H., Letelier, P., & Penadés, M. C. (2003). Metodologías Ágiles en el Desarrollo de Software. In *VIII Jornadas de Ingeniería del Software y Bases de Datos (JISBD 2003)* (pp. 1–8). Alicante, España.
- CaribeTIC. (2016). *Caribe en el mapa TIC global, las TIC en el mapa económico de la región*. Recuperado Mayo 5, 2016, from <http://www.caribetic.com/>
- Chivers, I., & Sleightholme, J. (2016). *Introduction to Programming with Fortran*. London, UK: Springer London. doi:10.1007/978-0-85729-233-9
- ClusterTIC. (2016). *Cluster tecnología, Información y Comunicación*. Recuperado de <http://goo.gl/CzPrIC>
- Cockburn, A. (2006). *Cockburn: Agile Software Development: The cooperative Game*. Addison-Wesley Professional.
- Duan, Y., & Fu, X. (2006). A Conceptual Approach to Modeling Model Driven Development Processes. In *International Conference on Networking, International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies (ICNICONSMCL'06)* (pp. 179–198). Morne, Mauritius.
- El Akkaoui, Z., Zimanyi, E., Mazón, J.-N., & Trujillo, J. (2011). A Model-driven Framework for ETL Process Development. In *Proceedings of the ACM 14th International Workshop on Data Warehousing and OLAP* (pp. 45–52). New York, NY, USA: ACM.
- Fallas, J. M. M. (2012). *Metodologías ágiles aplicadas a la Administración de Proyectos de Desarrollo de Software*. Valencia, España. Recuperado de <http://goo.gl/EfQF4x>
- Fedesoft. (2016). *Federación Colombiana de la Industria de Software*. Recuperado de <http://fedesoft.org/>
- Guta, G., Schreiner, W., & Draheim, D. (2009). A Lightweight MDSD Process Applied in Small Projects. In *35th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA 2009)* (pp. 255–258). Petras, Greece. doi:10.1109/SEAA.2009.63
- Haase, A., Völter, M., Efftinge, S., & Kolb, B. (2007). Introduction to open Architecture Ware 4.1.2. In *Model-driven development tool implementers forum (MDD-TIF'07)*. Zurich, Switzerland.
- Hebig, R., Gabrysiak, G., & Giese, H. (2012). Towards patterns for MDE-related processes to detect and handle changeability risks. In *International Conference on Software and System Process (ICSSP 2012)* (pp. 38–47). Zurich, Switzerland.
- Hernández, M. G., León, B. B. P. de, & Ferrara, J. M. (2015). *MOSKITT, una herramienta libre que da soporte a la aplicación de metodologías de desarrollo*. Valencia. Recuperado de <http://goo.gl/JF8SaI>
- INNPULSA. (2016). *Organismo para apoyar y promover el crecimiento empresarial extraordinario*. Recuperado de <https://www.innpulsacolombia.com/>
- Intersoftware. (2016). *Federación Nacional de Software y Tecnologías de la Información*. Recuperado de <http://goo.gl/UFrNHQ>
- Kernighan, B. W., & Ritchie, D. M. (1988). *The C Programming Language (2nd edition)*. Prentice Hall.
- Kirby, J. (2006). Model-Driven Agile Development of Reactive Multi-Agent Systems. In *30th Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC'06)* (Vol. 2, pp. 297–302).
- Kraus, A., Knapp, A., & Koch, N. (2007). Model-Driven Generation of Web Applications in

- UWE. In *3rd International Workshop on Model-Driven Web Engineering (MDWE 2007)*. Como, Italy.
- Kroiss, C., Koch, N., & Knapp, A. (2009). WE4JSF - A Model-Driven Generation Approach for Web Applications. In M. Gaedke, M. Grossniklaus, & O. Díaz (Eds.), *LNCSE: Web Engineering: 9th International Conference, ICWE 2009 San Sebastián, Spain, June 24-26, 2009 Proceedings* (pp. 493–496). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kroll, P., Kruchten, P., & Booch, G. (2003). *The Rational Unified Process Made Easy: A Practitioner's Guide to the RUP: A Practitioner's Guide to the RUP*. Addison-Wesley Professional.
- Market, D. (2012). *Fedesoft impulsa la productividad en el sector del software y TI*. Recuperado de <http://bit.ly/PnxtRo>
- Matinnejad, R. (2011). Agile Model Driven Development: An Intelligent Compromise. In *9th International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications (SERA 2011)* (pp. 197–202). Baltimore, USA.
- MinTIC. (2016). *Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Sector TIC*. Recuperado de <http://www.mintic.gov.co/>
- Object Management Group. (2015). *Unified Modeling Language - UML 2.5*. Recuperado de <http://www.omg.org/spec/UML/>
- Objects by Design. (2016). *UML products by product*. Recuperado de http://www.objectsbydesign.com/tools/umltools_byProduct.html
- Oracle. (2015). *Oracle Data Warehousing Guide: Overview of Extraction, Transformation, and Loading*. Recuperado de <http://goo.gl/brp9zB>
- PacifiTIC. (2016). *El Cluster TIC del Pacífico Colombiano*. Recuperado de <http://goo.gl/EYKZCm>
- Paniza, J. (2011). *Aprende OpenXava con ejemplos*. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Parquesoft. (2016). *Página oficial*. Recuperado de <http://parquesoft.com/>
- RED CLUSTER COLOMBIA. (2016). *Red de clusters en Colombia*. Recuperado de <http://redclustercolombia.com/>
- Rigworo, V. K. (2013). Adaptable model-driven engineering for formal methods integration with agile techniques for design of software systems. *Academic Research International*, 4(1), 446–456.
- Ruta N. (2016). *Página oficial*. Recuperado de <http://www.rutanmedellin.org/>
- Sarin, A. (2011). *Spring Roo 1.1 Cookbook*. Packt Publishing.
- SENA. (2016). *Servicio Nacional de Aprendizaje. Portal de oferta educativa*. Recuperado de <http://oferta.senasofiaplus.edu.co/sofia-oferta/inicio-sofia-plus.html>
- SinerTIC. (2016). *Asociación Alianza Sinertic*. Recuperado de <http://sinertic.org/>
- Terren, J. R., Moreno, D. A., & Jiménez, J. B. (2007). *Programación Orientada a Objetos*. Marcombo S.A.
- The Eclipse Foundation. (2012). *Model to Model Transformation – MMT*. Recuperado de <https://goo.gl/s8H5Xk>
- The Eclipse Foundation. (2016). *Eclipse Modeling Framework (EMF)*. Recuperado de <http://www.eclipse.org/modeling/emf/>
- Völter, M., Stahl, T., Bettin, J., Haase, A., Helsen, S., & Czarnecki, K. (2006). *Model-Driven Software Development: Technology, Engineering, Management*. John Wiley & Sons.
- Zhang, Y., & Patel, S. (2011). Agile Model-Driven Development in Practice. *IEEE Software*, 28(2), 84–91.

Indice de Autores

Authors

Adriana Esguerra Arce. Colombiana, PhD@ Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de Materiales, TPMR.

Adrian F. Chavarro. Colombiano. Master en Ingeniería de control industrial. Líder línea de E. y T. Tecnoparque Sena Neiva. Correo electrónico: achavarroc@sena.edu.co

Adrian Luis Ernesto Will. Argentino, Dr. Matemáticas, Profesor Adjunto, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, y Grupo de Investigación en Tecnologías Informáticas Avanzadas – GITIA, Tucumán – Argentina.

Carlos Alfredo Castellón Castro. Colombiano, Ingeniero Químico, Especialista en Gerencia de Proyectos, Universidad de Cartagena, Cartagena, Bolívar, Colombia. Correo electrónico: carcasca99@yahoo.com

Carolina Caicedo. Colombiana, *Ph.D.* Colciencias, Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA. Centro de Asistencia Técnica a la Industria, Grupo de investigación GIDEMP. Correo electrónico: ccaicedo60@misena.edu.co

Carlos David Grande T. Colombiano, Programa de Ingeniería Agroindustrial, Universidad de San Buenaventura, Cali, Colombia. Correo electrónico: cdgrantovar@usbcali.edu.co

César Jesús Pardo Calvache. Colombiano. PhD y MSc. en Ingeniería Informática por la Universidad de Castilla-La Mancha. Profesor Asistente del Departamento de Sistemas, Facultad de

Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Popayán, Colombia. Correo electrónico: cpardo@unicauca.edu.co

Diego Hernán Giraldo Vásquez. Colombiano, Profesor del Programa de Ingeniería de Materiales de la Universidad de Antioquia. Ingeniero Mecánico, Magíster en Ingeniería. Grupo de Materiales Poliméricos.

Elidier Gómez Sánchez. Colombiano. Ingeniero Sanitario, Universidad del Valle, Subdirector del Centro de Gestión Tecnológica de Servicios, SENA, CGTS, Colombia.

Eliana Marcela Ruiz. Colombiana, Tecnóloga Química, Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA. Centro de Asistencia Técnica a la Industria. Correo electrónico: emruiz31@misena.edu.co

Gabriel Jaime Pelaéz Arroyave. Colombiano, Instructor / Investigador del Centro de Diseño y Manufactura del Cuero del SENA Itagüí, Antioquia. Ingeniero de Materiales, Magíster en Ciencia e Ingeniería de Materiales. Grupo BIOMATIC - Biomecánica, Materiales, TIC, Diseño y calidad para el sector cuero, plástico, caucho y sus cadenas productivas.

Johanna Esguerra Arce. Colombiana, PhD@ Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de Materiales, TPMR e-mail johanna. Correo electrónico: esguerra@correounivalle.edu.co

Johan J. Molina. Colombiano. Master en Aplicaciones Móviles. Universidad Surcolombiana Neiva. Avenida Pastrana Carrera 1ª. Correo electrónico: julian.molina@usco.edu.co

Juan José Morales Arias. Colombiano. Ingeniero de Sistemas. Especialista en desarrollo de software por la Universidad EAFIT, con experiencia en el desarrollo de software y metodologías ágiles soportadas sobre SCRUM, experiencia en tecnologías como J2EE, Oracle PL\SQL, entornos LAMP, WEB con AngularJS, GWT y Struts. Correo electrónico: jmoral24@eafit.edu.co

Luis Neil Tejeda López. Colombiano, Ingeniero Químico, Universidad de Cartagena, Cartagena, Bolívar, Colombia. Correo electrónico: lntejedal@gmail.com

Luis Octavio González Salcedo. Colombiano, Dr. Ingeniería de Materiales, Profesor Asociado, Grupo de Energías Alternativas y Ahorro Energético – GEAL, Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira – Colombia. ⁴Autor de correspondencia: logonzalezsa@unal.edu.co

Lesly Patricia Tejeda Benítez. Colombiana, Ph.D (c) en Toxicología Ambiental, Magister en Ingeniería Ambiental, Ingeniera Química, Universidad de Cartagena, Cartagena, Bolívar, Colombia. Correo electrónico: ltejedad@unicartagena.edu.co

Marcelo Alexander Guancha Chalapud. Colombiano, Ms.C., Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA. Centro Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN). Centro de Asistencia Técnica a la Industria, Grupo de Investigación GIDEMP. Correo electrónico: marceloguancha@misena.edu.co

Maria Fernanda Valencia. Colombiana, Tecnóloga Química del, Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA. Centro de Asistencia Técnica a la Industria. Correo electrónico: mariafrnanda@misena.edu.co

Oscar Rubiano Ovalle. Colombiano. PhD en Ingeniería Industrial, profesor titular Universidad del Valle. Correo electrónico: oscar.rubiano@correounivalle.edu.co

Oscar Vanegas. Colombiano. Ingeniero Electrónico. Universidad Surcolombiana Neiva. Correo electrónico: Oscarvanegas89@hotmail. Com

Raúl Burbano Criollo. Colombiano. Ingeniero Industrial, Universidad del Valle, Instructor del Centro de Gestión Tecnológica de Servicios, SENA, CGTS, Colombia. Correo electrónico: burcr@yahoo.es

Sandra Milena Velásquez Restrepo. Colombiana, Líder y Desarrollo Tecnológico del Centro de Diseño y Manufactura del Cuero del SENA Itagüí, Antioquia. Bioingeniera, Magíster en Ingeniería, Especialista en Gerencia. Grupo BIOMATIC - Biomecánica, Materiales, TIC, Diseño y calidad para el sector cuero, plástico, caucho y sus cadenas productivas. Correo electrónico: smvelasquez@sena.edu.co

Sergio A. Dussán. Colombiano. Ingeniero Electrónico. Universidad Surcolombiana Neiva. Correo electrónico: Checho260790@gmail.com

Victor Hugo Tabarquino Muñoz. Colombiano, Ingeniero Agrícola, Grupo de Energías Alternativas y Ahorro Energético – GEAL, Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira – Colombia.

Yesid Aguilar Castro. Colombiano, PhD Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de Materiales, TPMR.



II Simposio DE MATERIALES POLIMÉRICOS



20 y 21
Octubre 2016

Inscripciones hasta
30 de Septiembre de 2016
insc.simposiopolimeros@gmail.com

I Concurso de vídeos e infografías
como Método para Divulgación de
Resultados Científicos

EVENTO GRATUITO
Cupo Limitado

Conversatorio

"HACIA UN PROGRAMA NACIONAL
DEL USO RACIONAL DE EMPAQUES
PLÁSTICOS"

Ponencias Magistrales

Cali - Colombia

Organiza



Con el apoyo de





Escuela del Empaque Plástico



Nuestra Meta
la **ALTA CALIDAD...**
el camino la **AUTOEVALUACIÓN**



Acreditación de Alta Calidad del programa:
Tecnología en Fabricación de Productos Plásticos
por Inyección y Soplado



CENTRO NACIONAL DE ASISTENCIA
TÉCNICA A LA INDUSTRIA ASTIN
Calle 52 No. 2Bis - 15
Teléfonos: 57 (2) 431 5847 Ext. 22667 - 22695
Fax: (2) 4471075 - 4467182
www.sena.edu.co
<http://centroastinsena.blogspot.com/>
E-mail: astin@sena.edu.co

INFORMADOR TÉCNICO
Calle 52 No. 2Bis - 15
Teléfonos: 57 (2) 431 5800 Ext. 22694
Email: revistaitastin@sena.edu.co
<http://informadortecnico.senaastin.com>
http://biblioteca.sena.edu.co/paginas/revistas_info.html
Cali, Valle del Cauca, Colombia