

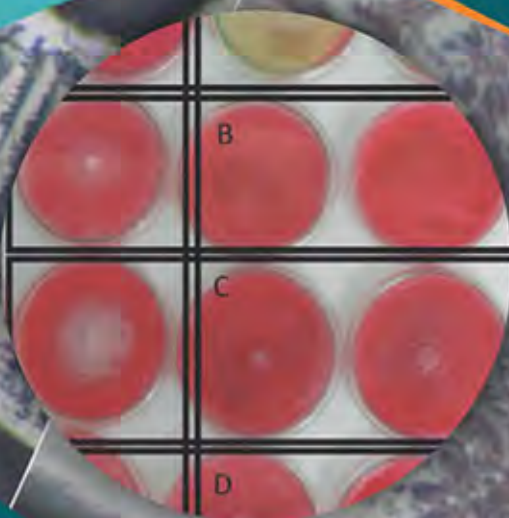


INFORMADOR TÉCNICO



Volumen 81 Número 2 Julio - Diciembre 2017 • ISSN 0122-056X • e- ISSN 2256 - 5035

ASTIN
CENTRO NACIONAL DE ASISTENCIA
TÉCNICA A LA INDUSTRIA



ISSN 0122-056X

e-ISSN 2256 - 5035

DOI: <https://dx.doi.org/10.23850/issn.2256-5035>

Tarifa Postal Reducida No. 2017 - 179 4-72,

vence 31 de Dic. 2017



INFORMADOR TÉCNICO

Informador Técnico
Título Abreviado: Inf. Téc.
ISSN 0122 - 056X
e-ISSN 2256 - 5035
Periodicidad: semestral
Julio - Diciembre 2017

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://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec
Cali, Valle del Cauca, Colombia

DOI: <https://doi.org/10.23850/issn.2256-5035>

Comité Editor

Director general (E)

José Antonio Lizarazo Sarmiento, MSc.
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Director Regional Valle

Cesar Alveiro Trujillo Solarte, MSc.
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Coordinador Sennova

Emilio Eliecer Navia Zúñiga
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Subdirectora Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria –ASTIN

Directora Informador Técnico
Aura Elvira Narváez Agudelo, MSc.
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Editora

Carolina Caicedo, PhD.
Investigadora
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Editor Asociado

Miguel Angel Solís Molina, PhD.
Coordinador del Servicio de Información y
Divulgación Tecnológica –SIDT
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Asistentes Editoriales

Andrés Felipe Torres, MSc. Investigador SENNOVA.
Jaime Alberto Gálvez, PhD. Investigador SENNOVA.
Lina Marcela Crespo, MSc. Investigador SENNOVA.
Helen Bustamante Montaña, MSc. Investigador SENNOVA.
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Traductor

David Rojas Velásquez, MSc. Traducción Científica
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Coordinadora Editorial

Julia Emma Zúñiga Rivera, Esp.
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Diagramación Editorial

Elizabeth Enriquez Quintero
Diseñadora Gráfica
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Auxiliar de Edición

Ana María Cortés Rosero
Profesional en Comercio Exterior
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Impresión

Ingeniería Gráfica S.A.S
Tiraje: 100 ejemplares
Julio - Diciembre de 2017

Comité Científico/Editorial

Eric Campos Cantón

PhD. en Matemáticas Aplicada, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.
San Luis Potosí, S.L.P., México

Gilberto Bejarano Gaitán

PhD. en Ingeniería con énfasis en Materiales.
Docente investigador Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Henry A. Colorado Lopera

PhD. en Ingeniería de Materiales.
University of California, Los Ángeles, EE.UU.

Héctor Fabio Zuluaga Corrales

PhD. en Química. Jefe Departamento de Química,
Universidad del Valle, Cali, Colombia

José Luis Munuera Alemán

PhD. en Ciencias Económicas y Empresariales
Universidad de Murcia, España

José Ignacio Huertas

PhD. en Ciencias, M.Sc. en Ingeniería Mecánica.
Director del CIMA, Instituto Tecnológico y Estudios Superiores de Monterrey, México

Juan Muñoz Saldaña

PhD. Profesor Investigador, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional - Cinvestav - Unidad Querétaro - México

Pedro José Arango Arango

PhD. en Ingeniería y Tecnología de Materiales.
Director Laboratorio de Física de Plasma, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Colombia

Roberto Briones Gallardo

PhD. en Ciencias Fisicoquímicas del Medio Ambiente,
Universidad Autónoma de San Luis Potosí – México

Ruby Mejía de Gutiérrez

PhD. 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

Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA
ISSN: 0122-056X (impresa)
e-ISSN: 2256-5035 (on line)
DOI: <https://dx.doi.org/10.23850/issn.2256-5035>

Comité Evaluador Volumen 81

El INFORMADOR TÉCNICO agradece a los investigadores que actuaron como evaluadores del Volumen 81, Números 1 y 2:

Alejandro Vásquez Hernández
Colombiano. MSc. Universidad EAFIT, Colombia.

Alvaro Jr. Caicedo Rolón
Colombiano. MSc. Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia.

Ángela María López Vinasco
Colombiana. PhD. Ingénieur de Recherche Post-doctorant, Francia.

Carlos Mauricio Moreno Téllez
Colombiano. PhD. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia.

Danny Alejandro Arteaga Fuertes
Colombiano. PhD. Universidad del Cauca, Colombia.

Esteban Rosero
Colombiano. MSc. Universidad del Valle, Colombia.

Esteban López Zapata
Colombiano. PhD. Universidad de Antioquia, Colombia.

Gerardo Zaragoza Galán
Mexicano. PhD. Universidad Autónoma de Chihuahua, México.

Héctor Enrique Jaramillo Suárez
Colombiano. PhD. Universidad Autónoma de Occidente, Colombia.

Héctor Samuel Villada Castillo
Colombiano. PhD. Universidad del Cauca, Colombia.

Janneth Torres Agredo
Colombiana. PhD. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Javier Fontalvo Alzate
Colombiano. PhD. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Jherson Eveiro Diaz Rosero
Colombiano. PhD. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Colombia.

Jhon Fredy Castañeda Gómez
Colombiano. PhD. Universidad Surcolombiana, Colombia.

Johans Steeven Restrepo Paruma
Colombiano. PhD. Universidad Nacional Autónoma De México, México.

John Paul Reyes Vásquez
Ecuatoriano. MSc. Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

José Norberto Farfán García
Mexicano. PhD. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Juan Manuel González
Colombiano. PhD. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Colombia.

Leonardo Solarte Pazos
Colombiano. PhD. Universidad del Valle, Colombia.

Luis Anderson Trejos Vidal
Colombiano. MSc. Universidad del Valle, Colombia.

Luz Amalia Ríos Vásquez
Colombiana. PhD. Universidad de Caldas, Colombia.

Mariana Peñuela Vásquez
Colombiana. PhD. Universidad de Antioquia, Colombia.

Martha Lucía Malagón Micán
Colombiana. MSc. Universidad de América, Colombia.

Martha Lucia Orozco Gutiérrez
Colombiana. PhD. Universidad del Valle, Colombia.

Mónica Alejandra Villaquirán Caicedo
Colombiana. PhD. Universidad del Valle, Colombia.

Nelly Cecilia Alba de Sánchez
Colombiana. PhD. Universidad Autónoma de Occidente, Colombia.

Octavio Manero-Brito
Mexicano. PhD. Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Paula Alejandra Osorio Vargas
Colombiana. PhD. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

Paola Andrea Acosta Guzmán
Colombiana. PhD. Universidad de los Andes, Colombia.

Raúl Omar Di Marco Morales
Colombiano. Candidato a Doctor. Universidad de Santander UDES, Colombia.

Saida Miriam Charre Ibarra
Mexicana. MSc. Universidad de Colima, México.

Revista Informador Técnico

Misión: El 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: El 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 ó a través de la plataforma OJS. http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec

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/editorialPolicies#custom-3 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

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: Publindex (Colciencias), DOAJ (Directory of Open Journal Access), EBSCO Fuente Académica Plus, ProQuest Metadex, Latindex, Actualidad Iberoamericana, REBIUN (Red de Bibliotecas Universitarias Españolas), Dialnet, Periódica, Road, Informe Académico, REDIB (Red Iberoamericana), Biblat, Sapiens Research.

Informador Técnico Journal

Mission: The Informador Tecnico, 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 Informador Tecnico 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://sena.metarevistas.org/index.php/inf_tec/about/editorialPolicies#custom-0

Document reception and mail: The full papers can be send trough the follow e-mail address: revistaitastin@sena.edu.co or the full papers will be submitted through the OJS-platform: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec

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/editorialPolicies#custom-3

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

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: Publindex (Colciencias), DOAJ (Directory of Open Journal Access), EBSCO Fuente Académica Plus, ProQuest Metadex, Latindex, Actualidad Iberoamericana, REBIUN (Red de Bibliotecas Universitarias Españolas), Dialnet, Periódica, Road, Informe Académico, REDIB (Red Iberoamericana), Biblat, Sapiens Research.

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 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 81 • Número 2 • Julio-Diciembre 2017 • ISSN 0122-056X • e-ISSN 2256-5035

TABLA DE CONTENIDO

EDITORIAL	105
------------------------	-----

ARTICULOS DE INVESTIGACIÓN

Efecto de la modificación superficial por Fricción Agitación (PFA) en la dureza y el desgaste de la aleación de aluminio de la serie 6000	106
--	-----

Effect of surface modification by Agitation Friction (FSA) on the hardness and wear of the aluminum alloy of the 6000 series

Vanessa Gil Ledesma, Andrés Torres, Nelly Alba de Sánchez

Descripción Metalográfica de implantes de Titanio calcinados y su aplicación como descriptor forense	113
---	-----

Metallographic description of calcined titanium implants and its application as a forensic descriptor

Carlos H. Valencia LL., Patricia Rodríguez S., Herney Garzón R., María Alejandra Barragán, Irvin J. Castro N.

Características físico-químicas de humus obtenido de biosólidos provenientes de procesos de tratamiento de aguas residuales	122
--	-----

Humus physical-chemical features obtained from biosolids from wastewater treatment processes

Álvaro Chávez Porras, Yessica Liceth Velásquez Castiblanco, Nicolás David Casallas Ortega

Bagazo de sorgo dulce: una alternativa para la producción de etanol de segunda generación en Colombia (Parte I)	131
--	-----

Sweet sorghum bagasse: an alternative for the production of second generation Ethanol in Colombia (Parte I)

John Fredy Holguín Múnera, Juan David Peña, Luis Alberto Ríos, Mariana Peñuela Vásquez

Remoción de colorantes reactivos empleando el hongo <i>Bjerkandera adusta</i>¹	142
--	-----

Removing reactive dyes using fungus Bjerkandera adusta¹

John Fredy Holguín Múnera, Andrey Esneider Escobar Oquendo, Rocío del Pilar Monroy Rodríguez, Gloria Margely Muñoz Marín

ARTICULOS DE REVISIÓN

Aprovechamiento de subproductos de origen carbonatado en la industria del cemento y el concreto: Una revisión para evaluar su aplicación en el departamento del Huila	151
--	-----

Use of carbonate rock mining by-products in the cement and concrete industry to assess its application in the Department of Huila: A review

Karen Viviana Fabara Hernández, Carlos Alberto Flórez Arias, Hanny Juliet Callejas Reyes, Paola Cristina Cajas Daza

Current overview of the state of disabled population, regarding the use of transtibial prosthesis	160
--	-----

Una mirada actual al estado de la población en condición de discapacidad frente al uso de prótesis de miembro inferior a nivel transtibial

Jhon Hernández Martín, Luis Alberto Parra

Editorial

El **Informador Técnico** ha logrado posicionarse como la revista científica por excelencia del SENA; entre los retos enfrentados durante este periodo se menciona el hecho de permanecer indexada por Publindex en categoría C, el fortalecimiento con la visibilidad a través de traducciones al idioma inglés del contenido en los volúmenes 78 y 79, asimismo, la publicación retrospectiva de artículos desde 1982 hasta 2009 y la proyección a otros índices como SciELO. Para alcanzar esta meta, el equipo editorial de la revista se apalanca en nuevos investigadores que tienen como función dinamizar las diferentes secciones para la consecución de artículos y para agilizar el proceso de revisión por pares.

El equipo editorial del **Informador Técnico** se enorgullece en presentar los siguientes trabajos de investigación para este nuevo número, donde se abordan resultados en el campo de la ingeniería de superficies con la modificación de una aleación de aluminio mediante la técnica de procesamiento por fricción agitación (PFA), que provoca aumento de dureza y resistencia al desgaste con una reducción significativa de masa. Así mismo, se reporta el diseño y la caracterización estructural de un implante dental marcado con un código de identificación individual implantado en mandíbulas de cerdo postmortem que conduce a aplicaciones forenses. Desde las áreas ingeniería ambiental y microbiología, se plantean alternativas de solución para el aprovechamiento de biosólidos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales con el desarrollo de un sistema de vermicompostaje. De igual forma, tratamientos químicos en el bagazo de sorgo dulce que permiten un mayor aprovechamiento de la celulosa para su posterior fermentabilidad, con el propósito de obtener etanol de segunda generación. En otro trabajo experimental, se reporta el potencial que tiene el hongo *Bjerkandera* adusta para la remoción de colorantes, este hongo muestra eficiencia para degradar sustratos complejos. Por otra parte, en la sección de trabajos de revisión se resaltan los usos potenciales para el sector de la construcción con el aprovechamiento de subproductos de origen calcáreo de la industria minera en el sureste de

Colombia. Finalmente, en un estudio de la literatura en el área de diseño se discuten características de funcionalidad y ergonomía para pacientes con discapacidad de miembros inferiores, lo anterior, con el fin de proponer soluciones para la recuperación y mejores adaptaciones de ortesis y prótesis. Para esta edición colaboraron las siguientes instituciones: Universidad Autónoma de Occidente, Universidad del Valle, Universidad Militar Nueva Granada, Universidad de Antioquia, Universidad de Brasilia, Empresas Públicas de Medellín E.S.P.; y del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, participaron: el Centro Textil y de Gestión Industrial, el Centro de Diseño y Metrología, Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria y Tecnoparque nodo Neiva.

Queremos aprovechar para invitar a nuestra audiencia a que consulte el suplemento I de este número (V81n2) que presenta artículos cortos derivados de las memorias del III Simposio de Materiales Poliméricos donde se abordaron los siguientes sub-temas: Polímeros compuestos y nanocompuestos; Ingeniería de polímeros, procesamiento y reología; Métodos de síntesis novedosos para polímeros; Biopolímeros y Energías renovables y medio ambiente. Este evento de divulgación científica se constituyó en un lugar de encuentro para más de 300 profesionales (aprendices, instructores, investigadores y empresarios nacionales y latinoamericanos), adscritos a Universidades (28%), SENA (55%) y Sector Productivo (17%).

Esperamos que este número y su correspondiente suplemento se conviertan en un puente que logre conectar equipos de trabajo a través de proyectos de investigación e innovación. El comité editorial agradece a los autores que una vez más son protagonistas de los trabajos de investigación y revisión aquí presentados, sus resultados nos permiten informar con veracidad a la sociedad sobre los avances y desarrollos tecnológicos que modifican nuestra realidad. Gracias a SENNOVA y al sistema de bibliotecas SENA-SBS por ser soporte y permitir proyectar al **Informador Técnico** con calidad.

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

Efecto de la modificación superficial por Fricción Agitación (PFA) en la dureza y el desgaste de la aleación de aluminio de la serie 6000

Effect of surface modification by Agitation Friction (FSA) on the hardness and wear of the aluminum alloy of the 6000 series

Recibido: 29- 12 - 2015 Aceptado: 14-11-2017

Vanessa Gil Ledesma¹
Andrés Torres²
Nelly Alba de Sánchez³

¹ Colombiana. Estudiante Ingeniería. Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Valle del Cauca, Colombia. e-mail: vanne182_9@hotmail.com.

² Colombiano. MSc. Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA - ASTIN - Tecnoparque. Grupo de Investigación en Desarrollo de Materiales y Productos GIDEMP. Cali, Valle del Cauca, Colombia. e-mail: torresrecalde84@gmail.com.

³ Colombiana. PhD. Universidad Autónoma de Occidente. Grupo Ciencia Ingeniería de Materiales GCIM. Cali, Valle del Cauca, Colombia. e-mail: nalba@uao.edu.co.

Resumen

En el presente artículo se reportan los efectos de la modificación superficial mediante la técnica de procesamiento por fricción agitación (PFA) o Fricción Stir Processing (FSP) sobre una aleación de aluminio de uso arquitectónico de la serie 6063. Se evaluó el comportamiento del material en estado de suministro y del material modificado por PFA, se realizó análisis de microdureza, análisis metalográfico en niveles macro y micro, análisis de desgaste y coeficiente de fricción utilizando la técnica de Pin on Disk. Se encontró que en general la modificación superficial produce un mejoramiento sustancial de las propiedades mecánicas como la dureza, al pasar de 42 HV A 62 HV en las muestras modificadas por (FSP) y la resistencia al desgaste en términos de pérdida de masa se redujo en un 39 %. Ofreciendo una alternativa tecnológica importante para mejorar el desempeño en servicio de estos materiales sometidos a condiciones de operación similares.

Palabras clave: Pin on disk; metalografía; fricción agitación.

Abstract

This article presents the results obtained from the evaluation of the effects of the surface modification by Friction Stir processing (FSP) on an aluminum alloy of architectural use of the series 6063 are reported. The behavior of the material in the state of supply and of the modified material by FSP, microhardness analysis, metallographic analysis at macro and micro levels, wear analysis and coefficient of friction were performed using the Pin on Disk dynamic test. It was found that in general the surface modification produces a substantial improvement of the mechanical properties such as hardness when passing from 42 HV to 62 HV in the samples modified by (FSP) and the

wear resistance in terms of mass loss was reduced in a 39% offering an important technological alternative to improve the in-service performance of these materials subjected to similar operating conditions.

Keywords: Pin on disk; metallographic; friction.

Introducción

La alta demanda de componentes en el área automotriz y aeronáutica impulsa el desarrollo de componentes más livianos (Cavaliere, 2005). Las aleaciones de aluminio incluida la serie 6000 tienen una gran demanda debido a su baja densidad y alta resistencia a la corrosión (Charit y Mishra, 2003). Para ciertas aplicaciones se requiere que los componentes tengan condiciones superficiales especiales tales como alta resistencia al desgaste (Karthikeyan, Senthilkumar, Balasubramanian y Natarajan, 2009; Nascimento, Santos, Vilaça, Miranda y Quintino, 2009), la modificación superficial por fricción agitación PFA se ha convertido en una técnica de procesamiento en estado sólido para la modificación superficial de materiales con base a los principios de la soldadura por fricción agitación (SFA) (Darras, Khraisheh, Abu-Farha, y Omar, 2007; Wang y Mishra, 2007). La modificación superficial por fricción agitación (PFA) tiene la capacidad de mejorar diversas propiedades del material como la resistencia al desgaste, la corrosión, la fatiga y la dureza (Mahoney, Rhodes, Flintoff, Bingel, y Spurling, 1998) lo que le da una ventaja sobre procesos tradicionales de modificación superficial como algunos tratamientos térmicos donde al mejorar una propiedad se pierde otra (Poggie y Wert, 1992).

El coeficiente de fricción y el comportamiento al desgaste de los diferentes tipos de aluminio en condiciones de no lubricación están asociados a las propiedades mecánicas, así como a la reactividad de la superficie, una primera aproximación supone que un aumento en la dureza se traducirá en un aumento en la resistencia al desgaste (Elangovan, y Balasubramanian, 2007).

Desarrollo experimental

La modificación superficial de la aleación de la serie 6063, se realizó sobre láminas de 60mm*200*mm*4,7mm, extraídas de una platina obtenida por extrusión de 25,4 cm de ancho por 6 metros de longitud y 4,7 milímetros de espesor. La caracterización tribológica se realizó sobre la superficie del cordón; mientras que se efectuaron

mediciones de microdureza y el análisis metalográfico sobre la sección transversal de los cordones.

Procedimiento de soldadura

La modificación superficial de las láminas se realizó generando un cordón sobre una de las caras de la lámina con la ayuda de una fresadora convencional marca JHONFORD de 4HP, con los parámetros que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de PFA y relación de velocidad

Muestra No.	Velocidad de rotación (RPM)W	Velocidad de avance (mm/min)V	Relación de velocidad (rev/mm)
			W/V
1186	1120	86	13
1163	1120	63	17,7
1686	1600	86	18,6
1663	1600	63	25,3

Fuente: Los autores

Se utilizó una herramienta fabricada con acero H13 templado y revenido para una dureza mínima de 50HRC, con hombro plano de 18 mm de diámetro, con pin cilíndrico roscado de 6 mm de diámetro y 3,3 mm de altura. Los cordones se hicieron con rotación de la herramienta en el sentido anti-horario. Figura 1.

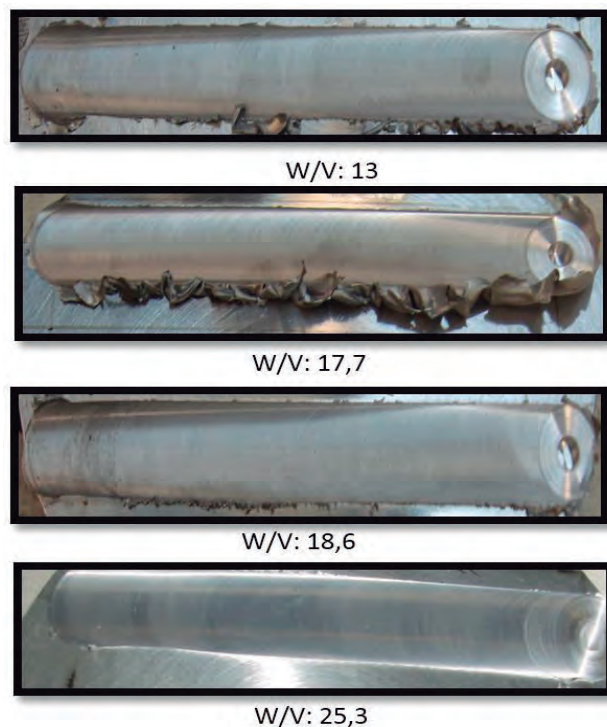


Figura 1. Cordones de aluminio procesados por FSP.

Fuente: Los autores

Ensayo de caracterización

Las láminas modificadas mediante procesamiento por fricción-agitación, se caracterizaron mediante los ensayos mecánicos de microdureza, ensayos de desgaste y el análisis metalográfico para determinar el tamaño de grano y los cambios micro estructurales generados.

El análisis metalográfico se realizó sobre la sección transversal de la cara modificada por PFA; las muestras fueron desbastadas con lijas hasta el número 2000, luego pulidas en paños utilizando alúmina de 0,05 micras y finalmente se atacaron con reactivo Poulton para revelar y analizar la microestructura de las diferentes zonas del material modificado en un microscopio óptico Olympus.

Al igual que las muestras para metalografía los perfiles de microdureza se realizaron sobre la sección transversal de cada cordón de las superficies modificadas por PFA, se hizo un barrido longitudinal y transversal sobre las muestras para determinar la microdureza en un Microdurómetro Zwick/Roell Indentec ZHV1-m con carga de 100g y tiempo de sostenimiento de 15 s.

La resistencia al desgaste y el coeficiente de fricción se evaluó mediante el ensayo de Pin-on-Disk sobre las superficies modificadas por PFA, así como para el material base.

El ensayo se realizó bajo los siguientes parámetros: recorrido de 1000 m, carga aplicada 10N, diámetro de la huella 1 cm y un pin de acero al cromo duro con un diámetro de 6 mm.

Resultados

Caracterización

En la Figura 2 se muestra la microestructura de la aleación de aluminio modificada superficialmente por FSP. La Figura 2a corresponde al corte transversal de la superficie modificada por PFA, se puede apreciar las zonas típicas: una zona agitada (ZA), la zona afectada térmicamente (ZAT), la zona afectada termo-mecánicamente (ZATM), y el material base, MB. En la Figura 2b se presenta la microestructura gruesa del material base MB, característica de las fundiciones de aluminio con una formación dendrítica con inclusiones y segregación en los bordes de grano. La zona agitada ZA, se presenta en la Figura 2c, compuesta por granos finos y equiaxiales con un tamaño de grano promedio de 6,7µm, resultantes de la recrystalización dinámica en comparación

con el material base. A medida que nos acercamos a la zona de transición ZATM, ver Figura 2d, se observa la presencia de granos alargados orientados en la dirección de flujo del material, producto de la alta deformación que se produce en esta zona y el insuficiente aporte de calor que trae como resultado una recrystalización parcial de los granos (Elangovan y Balasubramanian, 2007).

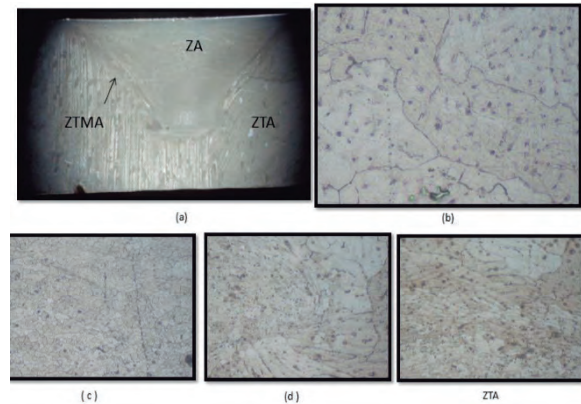


Figura 2. (2a) Micrografías de la sección transversal de la superficie modificada por FSP, (2b) zona agitada a 50X (2c) zona de transición a 50X (2d) Microestructura del Metal base 50X.

Fuente: Los autores

Microdureza

La evolución en la microdureza del material base (MB) con y sin modificación superficial se presenta en la Figura 3. Se aprecia que al disminuir la relación de velocidad durante el PFA se produce un incremento en la microdureza del material modificado, como resultado del refinamiento del tamaño de grano por fenómenos de recrystalización que tienen lugar durante el proceso PFA. Las muestras modificadas por PFA alcanzan valores de microdureza máxima de 62 HV, muy por encima de los valores del material base que oscilaron en 42 HV.

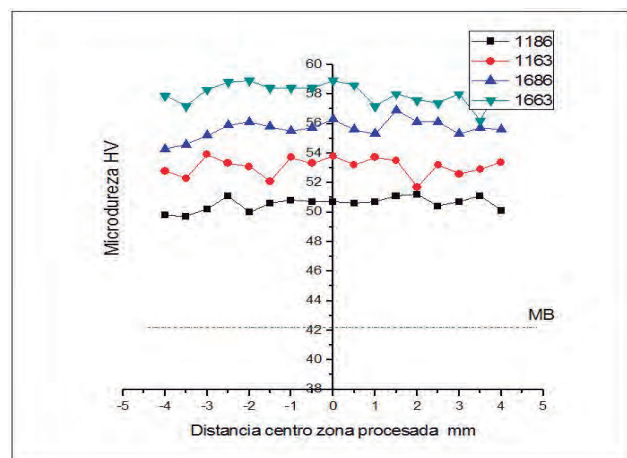


Figura 3. Perfil de microdureza en la sección transversal de superficies modificadas por PFA.

Fuente: Los autores

El efecto de la modificación superficial PFA sobre la microdureza en aleaciones de aluminio ha sido estudiada ampliamente. Rajakumar, Muralidharan y Balasubramanian (2011), examinaron los perfiles de microdureza asociados a la microestructura en la zona agitada (ZA) de aleaciones de Al 6063-T5. Y han reportado que el perfil de microdureza se vio fuertemente afectado por la distribución de precipitados en regiones con tamaño de grano pequeño en la soldadura.

Recientemente, (Zahmatkesh, Enayati, y Karimzadeh, 2011) investigaron el efecto de la PFA en la microestructura de la aleación de aluminio 7050-T7451. Reportando que el proceso SFA tiene un efecto directo sobre el tamaño de la sub granos en la frontera de la zona afectada térmicamente (ZAT), provocando un engrosamiento de los precipitados y endurecimientos, causando la variación de la microdureza en esta zona de frontera. Observaciones similares fueron hechas también por Siddiqui, Abdullah, y Al-Belushi (2000) en un examen detallado con TEM de las SFA en la aleación de Al 7050 -T651. El engrosamiento de los precipitados y la ampliación de (FSP) son evidentes (Morgado, Branco, e Infante, 2007).

Desgaste

En la Tabla 2 se muestra el comportamiento del material base y modificado por PFA en la prueba de pin on disk; se observa una ligera disminución del coeficiente de fricción en las muestras modificadas superficialmente en relación con las muestras del material base (MB). Las muestras modificadas por PFA mostraron una pendiente inicial de coeficiente de fricción más pronunciada, que la presenta el material sin tratamiento alguno o material base, el coeficiente de fricción promedio de las muestras con PFA fue de 0,7, menor que las muestras de MB que presentaron un coeficiente de fricción de 1,2.

Tabla 2. Comportamiento del Coeficiente de fricción en función de la relación de velocidad para cada muestra.

Muestra	Velocidad de rotación (RPM)/W	Relación de velocidad (rev/mm)	Coeficiente de fricción
1186	1120	13	0,58
1163	1120	17,7	0,68
1686	1600	18,6	0,64
1663	1600	25,3	0,7
MB	N/A	N/A	1,2

Fuente: Los autores

El aumento inicial en el coeficiente de fricción del MB puede deberse al aumento de la fuerza de fricción necesaria para superar el contacto altamente adhesivo entre el Pin y la superficie de prueba (Padmanaban y Balasubramanian, 2010). Las diferencias en la amplitud de la deformación plástica localizada en áreas reales de contacto que pueden llevar a la diferencia en el coeficiente de fricción, dado que las superficies son más difíciles de separar (Chowdhury, Chen, Bhole, y Cao, 2010; Pérez, Ortiz Albuixech, Moglioni y de Vedia, 2003).

Esta disminución en el coeficiente de fricción fue más notoria para las relaciones de velocidad relacionadas con un mayor aporte de calor, que obtuvieron los valores de microdureza más altos. El endurecimiento de la superficie fortalece y reacomoda las áreas reales de contacto entre el par tribológico favoreciendo así no solo el coeficiente de fricción sino también el desgaste de la superficie como lo reportan Zahmatkesh, Enayati, y Karimzadeh (2010).

En las imágenes de microscopía electrónica de barrido SEM, se observaron fenómenos de desgaste Figura 4, como de laminación y surcos de abrasión en el material base o sin modificación superficial (Figura 4a y Figura 4c) mientras que las muestras modificadas superficialmente por PFA presentaron grietas y delaminación (Figura 4b y Figura 4d).

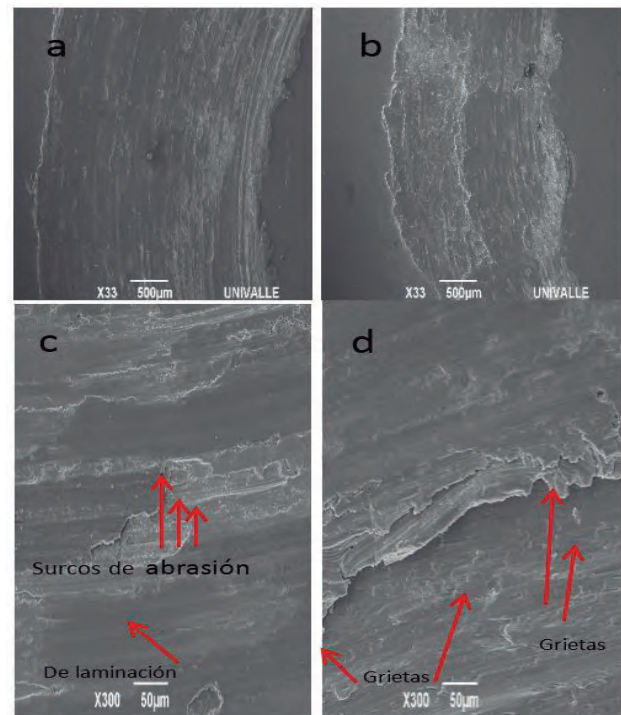


Figura 4. Microscopía electrónica de barrido, huella de desgaste, (a y c material base) (c y d) relación de velocidad (25,3)

Fuente: Los autores

La presencia de grietas y delaminación en las muestras modificadas superficialmente por PFA obedece principalmente a la diferencia de dureza entre el par tribológico, si bien el proceso de modificación superficial por PFA mejora la dureza superficial del material en relación con el material base, la dureza del pin es superior y durante la dinámica de desgaste el desprendimiento progresivo de material y la deformación continua del mismo produce la generación de grietas por fatiga (Alidokht, Abdollah-zadeh, Soleymani, Saeid, y Assadi, 2012).

En la Figura 5 se muestra cómo varía la pérdida de masa con respecto a la relación de velocidad, se aprecia una disminución notable en la pérdida de masa en las muestras modificadas superficialmente por PFA a medida que aumenta la relación de velocidad, alcanzando una reducción en la pérdida de masa de un 39 % en las muestras con relaciones de velocidad de (25,3) en comparación al MB; esto se debe a que presenta mayor microdureza la cual disminuye el desgaste. Se observa que para una velocidad de rotación del pin constante el aumento en la velocidad de avance provoca un aumento en la pérdida de masa. Un comportamiento similar se ha reportado por Ren, Ma y Chen (2007), en aluminio A 390 reforzado con grafito por (FSP).

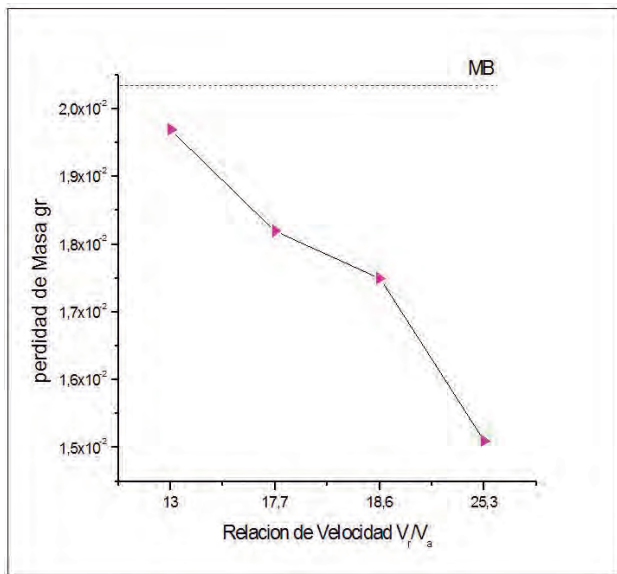


Figura 5. Pérdida de masa con respecto a la relación de velocidades para MB y muestras con (FSP)
Fuente: Los autores

El menor tiempo de exposición del material con el pin, se traduce en menos aporte de calor. Esto afecta el refinamiento de grano que tiene un efecto preponderante en la resistencia al desgaste del material.

Discusión

Se concluye que la modificación superficial tiene un efecto benéfico sobre la microdureza de aleaciones de aluminio 6063 en estado de fundición, al pasar de 42 HV a 62 HV, asociado principalmente al refinamiento del tamaño de grano por la modificación superficial del material por PFA.

Conclusiones

La pérdida de masa y el coeficiente de desgaste disminuyeron para las muestras modificadas superficialmente por PFA con respecto al material base. lo que permite pensar que la disolución de precipitados y el refinamiento de las partículas de Si que se produce durante el proceso de PFA tiene un mayor efecto sobre el comportamiento tribológico del material que la microdureza al conferirle un comportamiento más ductal a la matriz de aluminio.

Referencias

- Alidokht, S. A., Abdollah-zadeh, A., Soleymani, S., Saeid, T., y Assadi, H. (2012). Evaluation of microstructure and wear behavior of friction stir processed cast aluminum alloy. *Materials Characterization*, 63, 90-97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.11.007>
- Cavaliere, P. (2005). Mechanical properties of friction stir processed 2618/Al 2 O 3/20p metal matrix composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(12), 1657-1665. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.03.016>
- Charit, I., y Mishra, R. S. (2003). High strain rate superplasticity in a commercial 2024 Al alloy via friction stir processing. *Materials Science and Engineering: A*, 359(1), 290-296. doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00367-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00367-8)
- Chowdhury, S. M., Chen, D. L., Bhole, S. D., y Cao, X. (2010). Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch. *Materials Science and Engineering: A*, 527(21), 6064-

6075. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.06.012>
- Darras, B. M., Khraisheh, M. K., Abu-Farha, F. K., y Omar, M. A. (2007). Friction stir processing of commercial AZ31 magnesium alloy. *Journal of materials processing technology*, 191(1), 77-81. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.045>
- Elangovan, K., y Balasubramanian, V. (2007). Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 459(1), 7-18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.124>
- Karthikeyan, L., Senthilkumar, V. S., Balasubramanian, V., y Natarajan, S. (2009). Mechanical property and microstructural changes during friction stir processing of cast aluminum 2285 alloy. *Materials & Design*, 30(6), 2237-2242. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.006>
- Mahoney, M. W., Rhodes, C. G., Flintoff, J. G., Bingel, W. H., y Spurling, R. A. (1998). Properties of friction-stir-welded 7075 T651 aluminum. *Metallurgical and materials transactions A*, 29(7), 1955-1964. doi: <https://doi.org/10.1007/s11661-998-0021-5>
- Morgado, T. L. M., Branco, C. M., e Infante, V. (2007). Previsão de vida à fadiga dos engates (rabetas) dos vagões de transporte de carvão. *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões ISSN*, 1646, 7078, 14, 35-43
- Nascimento, F., Santos, T., Vilaça, P., Miranda, R. M., y Quintino, L. (2009). Microstructural modification and ductility enhancement of surfaces modified by FSP in aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 506(1), 16-22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.01.008>
- Padmanaban, G., y Balasubramanian, V. (2010). Fatigue performance of pulsed current gas tungsten arc, friction stir and laser beam welded AZ31B magnesium alloy joints. *Materials & Design*, 31(8), 3724-3732. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.03.013>
- Pérez, C. R., Ortiz Albuixech, M., Moglioni, A., y de Vedia, L. A. (2003). Evaluación de tensiones residuales en soldadura de aluminio AA6061-T6 obtenida por el método de fricción-agitación (FSW). *Simposio Materia 2003*. Red Latinoamericana de Materiales. Bariloche, Argentina.
- Poggie, R. A., y Wert, J. J. (1992). The role of oxidation in the friction and wear behavior of solid solution Cu-Al alloys in reciprocating sliding contact with sapphire and D2 tool steel. *Wear*, 156(2), 315-326. doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(92\)90225-W](https://doi.org/10.1016/0043-1648(92)90225-W)
- Rajakumar, S., Muralidharan, C., y Balasubramanian, V. (2011). Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T 6 aluminium alloy joints. *Materials & Design*, 32(2), 535-549. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.025>
- Ren, S. R., Ma, Z. Y., y Chen, L. Q. (2007). Effect of welding parameters on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al-Mg-Si alloy. *Scripta Materialia*, 56(1), 69-72. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.08.054>
- Siddiqui, R. A., Abdullah, H. A., y Al-Belushi, K. R. (2000). Influence of aging parameters on the mechanical properties of 6063 aluminium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 102(1), 234-240. doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00476-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00476-8)
- Urbano Bedoya, L., y Arnaldo Ávila, J. (2011). Evaluación de la resistencia a la tensión de las juntas soldadas de la aleación de aluminio 6261-T5 por el proceso de soldadura por fricción-agitación. *Informador Técnico*, 75, 1517 – 22. doi: <https://doi.org/10.23850/22565035.15>
- Wang, Y., y Mishra, R. S. (2007). Finite element simulation of selective superplastic forming of friction stir processed 7075 Al alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 463(1), 245-248. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.118>

Zahmatkesh, B., Enayati, M. H., y Karimzadeh, F. (2010). Tribological and microstructural evaluation of friction stir processed Al2024

alloy. *Materials & Design*, 31(10), 4891-4896. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.054>

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



Descripción Metalográfica de implantes de Titanio calcinados y su aplicación como descriptor forense

Metallographic description of calcined titanium implants and its application as a forensic descriptor

Recibido: 25-09-2017 Aceptado: 23-11-2017

Carlos H. Valencia LL.^{1*}
Patricia Rodríguez S²
Herney Garzón R³
María Alejandra Barragán⁴
Irvin J. Castro N.⁵

Resumen

Introducción: La ciencia forense desarrolla diversas tecnologías para la identificación de cadáveres, pero en algunas ocasiones estos procedimientos pueden ser muy costosos y poco fiables en el caso de cuerpos incinerados. Esta investigación tuvo como objetivos la descripción de los cambios microestructurales presentes en un implante de titanio sometido a diferentes temperaturas, y la evaluación de su utilización potencial como descriptor forense. **Materiales y método:** Se elaboraron 15 minimplantes de titanio, con un código de identificación, se insertaron en mandíbulas de cerdo y se sometieron a temperaturas de 200°C, 800°C y 1000°C, se recuperaron las muestras y se realizaron análisis metalográficos mediante microscopía óptica y electrónica de barrido. **Resultados:** Se logró caracterizar la microestructura para cada temperatura, se observó un incremento en la capa de óxido con el aumento de la temperatura. **Conclusión:** Es posible utilizar implantes dentales como identificador forense.

Palabras clave: Odontología forense; implantes dentales; metalografía; capa de óxido.

Abstract

Introduction: Forensic science develops diverse technologies for the identification of corpses, but in some cases these procedures can be very expensive and unreliable in the case of cremated bodies. This research aimed to describe the metallographic changes in a titanium implant subjected to different temperatures and the evaluation of its potential use as a forensic descriptor. **Materials**

¹ Colombiano. PhD. Universidad del Valle, Escuela de Odontología, Cali, Colombia. *Autor de correspondencia. e-mail carlos.humberto.valencia@correounivalle.edu.co.

² Colombiana. Esp. Universidad del Valle, Escuela de Odontología, Cali, Colombia. e-mail prodriguezsanchez@hotmail.com.

³ Colombiano. Esp. Universidad del Valle, Escuela de Odontología, Cali, Colombia. e-mail herneygarzon@hotmail.com.

⁴ Colombiana. Odontóloga. Universidad del Valle, Escuela de Odontología, Cali, Colombia. e-mail mabpr@hotmail.com.

⁵ Colombiano. MSc. Universidad del Valle, Escuela de Odontología, Cali, Colombia. e-mail irvin.castro@correounivalle.edu.co.

and methods: Fifteen titanium mini implants with an identification code were made, inserted into pork jaws and subjected to temperatures of 200 ° C, 800 ° C and 1000 ° C, samples were recovered and analyzed were performed by optical microscopy and electron scanning microscopy. **Results:** It was possible to characterize the microstructure for each temperature, an increase in the oxide layer was observed with the increase of each temperature. **Conclusion:** It is possible to use dental implants as a forensic identifier.

Keywords: Forensic dentistry; dental implants; metallography; Oxide Layer.

Introducción

En Colombia el recrudecimiento de la violencia en las dos últimas décadas, la degradación del conflicto armado y la aparición de las bandas criminales del narcotráfico (BACRIM), han llevado a fenómenos como el desplazamiento forzado, la proliferación de fosas comunes y el descuartizamiento e incineración de cadáveres como método para dificultar la identificación de las víctimas, lo que hace que los métodos normales de identificación forense sean prácticamente inútiles.

Rivas (2000), a partir de las estadísticas oficiales planteaba “la violencia” como el principal problema de salud pública en Colombia y para el año 2008 las muertes violentas llegan a ser la segunda causa de muerte.

La identificación positiva de una persona requiere la coincidencia fehaciente de las características físicas del fallecido con los registros de esas mismas características antes de la muerte. En caso de cadáveres incinerados, la odontología forense ha sido de gran ayuda en la identificación de las víctimas, ya que a menudo permanece material genético en los dientes.

Von Wurmb-Schwark, Simeoni, Ringleb y Oehmichen (2004) lograron aislar ADN pero no tuvieron éxito en conseguir una identificación positiva; en un estudio totalmente *in vitro* con dientes aislados, Adserias, Ubelaker, y Zapico (2016) reportaron dificultad en procesos de amplificación y en la obtención de perfiles de ADN a partir de 300 °C.

La cavidad oral ofrece cierta protección a las estructuras dentales, sin embargo a 500 °C los componentes inorgánicos comienzan a deteriorarse y entre los 660 °C y los 825 °C se presenta deshidratación y pérdida de

la materia orgánica, lo que lleva a fisuras, fracturas y desprendimiento de tejido (Sandholzer, 2014).

En un incendio el pico de temperatura puede alcanzar niveles por encima de 1200 °C y permanecer entre 600°C y 800 °C por varias horas (Taylor, Wilson y Lyons, 2002), según Holk (1996) (citado por Taylor *et al*; 2002), entre los 800 y 1000 °C la dentina y el esmalte pierden estructura y entre 1100 °C y 1200 °C hay completa descomposición de estos tejidos.

La buena conservación de las piezas dentales después de la exposición de un cuerpo al fuego ha sido explicada porque al calentarse el cadáver, los gases procedentes del intestino y el estómago producen protrusión de lengua lo que, sumado a la presencia de otros músculos, protege a los dientes de la exposición directa a la temperatura (Rubio, Sioli, Suárez, Gaitán y Martin-de-las-Heras, 2015).

Aunque a temperaturas superiores a los 1000 °C los dientes todavía son macroscópicamente identificables, en situaciones donde la temperatura es mayor la simple manipulación puede llevar a su fragmentación, lo que obliga a disponer protocolos muy cuidadosos para su manejo (6- 7) y estabilización física temprana (Reesu, Augustine y Urs, 2015).

Merlati, Savio, Danesino, Fassina, y Menghini (2004) encontraron que los daños en la estructura dental pueden aparecer más temprano si los dientes presentan restauraciones.

Diferentes autores como Moreno, León, Marín y Moreno (2008); Marin y Moreno (2004) y Vázquez, Rodríguez y Moreno (2012), reportan cambios específicos en las estructuras dentales, de acuerdo con el rango de temperatura: fisuras longitudinales en el esmalte y cemento a 400 °C, grietas en dentina y esmalte a 800 °C y exposición de cámara pulpar a 1000 °C; de igual forma los materiales dentales como las resinas entre los 500 °C y 700 °C.

Debido al gran número de implantes intraóseos que se colocan, se ha propuesto la necesidad de caracterizarlos y evaluar la posibilidad de usarlos como un identificador.

Autores como Sahiwal, Woody, Benson y Guillen (2002) identifican parámetros “morfológicos” de implantes por medio de rayos X y Nuzzolese, Lusito, Solarino y Vella (2008) ante el auge de los implantes dentales llamaron la atención de disponer de bibliotecas que recojan la información de las casas comerciales acerca de diseños macroscópicos de estos dispositivos.

Los implantes dentales al ser elaborados en aleación de titanio tienen un punto de fusión superior a 1650 °C lo que aumenta las posibilidades de soportar las altas temperaturas que se generan en un evento que involucre fuego como una cremación (950 - 1000 °C), incendio de vehículo (1000 °C), incendio y explosión (1093 °C) como el evento del World Trade Center (Berketa, James y Marino, 2011a) y aun un experimento en túnel de fuego (1365 °C) (Berketa, James, y Marino, 2011b).

Un ejemplo de aplicación de la odontología forense se tuvo en los incendios forestales del 2009 en Victoria, Australia, donde fue necesaria la combinación de numerosas técnicas dentales forenses para lograr identificar los restos calcinados (Cordner, Woodford, y Bassed, 2011).

En un intento por estudiar el potencial de los implantes como identificador forense después de una incineración, Berketa, James y Marino (2010) describieron la persistencia de un código genérico de identificación en un tipo comercial de implantes a una temperatura de 1125 °C, lo que se explica porque la temperatura de fusión del titanio es superior a los 1650 °C (Berketa *et al.*, 2011a).

Al ser los implantes dentales producidos en masa, no incluyen un mecanismo que facilite su identificación individual, sin embargo para un odontólogo o un perito la combinación de marcas y geometrías (longitudes, diámetros, pasos de rosca, entre otros) lo convierten en un dispositivo único y fiable para identificar a un paciente si se tienen los registros dentales previos (Berketa *et al.*, 2011b), lo que se podría combinar también con un software de identificación radiológica (Depalakshmi y Prabhakar, 2014), (De Marco, 2013).

El incremento en el número de implantes colocados aumenta la posibilidad de encontrar implantes dentales en víctimas de desastres o crímenes (Reesu *et al.*, 2015) Un ejemplo de utilización de un implante dental como identificador forense ocurrió en el año 2004, con una víctima de un tsunami, al comparar radiografías de la historia clínica con radiografías post mortem, la comparación de la imagen radiográfica de la zona del implante permitió la identificación certera (Dostalova, Eliasova, Seydlova, Broucek, y Vavrickova, 2012).

En esta investigación se diseñó un implante dental marcado con un código de identificación individual, que fue implantado en mandíbulas de cerdo *post mortem* buscando tener una mejor aproximación a las condiciones que se esperarían en un cadáver incinerado; como objetivo general se propuso describir los cambios macroscópicos

y microestructurales que sufre un implante dental que ha sido colocado en mandíbulas de cerdo y sometido a altas temperaturas y su uso potencial como descriptor forense.

Materiales y metodos

Se fabricaron 15 microimplantes cónicos, auto roscantes, en titanio tipo IV, de 5 mm de largo, 1,8 mm de diámetro en el ápice y una plataforma de 5 mm de diámetro, con un código de identificación grabado a 0,7 mm de profundidad (Figura 1).



Figura 1. Microimplante con número de identificación en plataforma
Fuente: Los autores

Los implantes fueron insertados *post mortem* en mandíbulas de cerdo de tres meses de edad sobre la zona retromolar del hueso mandibular derecho, a nivel crestal del reborde. (Figura 2).



Figura 2. Mandíbula de cerdo con implante insertado
Fuente: Los autores

Las mandíbulas con los implantes incluidos fueron incineradas en un horno eléctrico a diferentes temperaturas (200 °C, 800 °C, y 1000 °C) por un tiempo de sostenimiento de una hora y posteriormente se permitió su enfriamiento dentro del horno.

Los implantes fueron recuperados y preparados para análisis metalográfico en microscopio electrónico de barrido, para lo cual se encapsularon en lucita (polimetacrilato de metilo), a una temperatura de curado de 140 °C por un tiempo de 15 minutos y una presión de 92 MP.

A continuación, se realizaron cortes longitudinales que dividieron el implante en dos partes iguales, utilizando un disco diamantado de 0,38 mm, a 2300 rpm y con una velocidad de avance de 1,2 mm/minuto, con flujo de agua constante.

La superficie para estudiar fue preparada a través de un lijado metódico, por medio de lijas de grano grueso y grano fino (lijas No. 240, 320, 400, 600, 800, 1000 y 1200).

Luego del pulido grueso se realizó el pulido fino, por medio de una pulidora de paños, teniendo como agente abrasivo alúmina de 1 y 0,3 micras, para las etapas inicial y final, respectivamente. La eficiencia de este proceso se verificó mediante un microscopio óptico.

Finalmente, la muestra se trató con el reactivo de kroll para revelar su microestructura y permitir la observación ante los microscopios ópticos y de barrido electrónico.

Resultados

Al examen macroscópico, todos los implantes calcinados conservaron la misma apariencia, la única diferencia entre grupos se halló en la conservación del código de marcaje (Figura 1) el cual se conservó visible a simple, en los grupos de 200°C y 800 °C pero desapareció en el de 1000 °C.

A nivel microscópico, las diferentes muestras conservaron iguales características microestructurales dentro de cada grupo (es decir, a una temperatura específica), pero exhiben cambios significativos con el aumento de temperatura (200 °C, 800 °C y 1000 °C).

Análisis metalográfico a 200 °C

El análisis metalográfico para estas muestras mostró que la microestructura estaba constituida por granos de fase α con pequeñas partículas de TiH (de color negro) y pequeñas secciones de fase β (de color negro), como se puede apreciar en las Figura 3 (A) y 3 (B), tomadas a 100 y 500 aumentos, respectivamente. Es de notar que los bordes de los implantes para esta temperatura se conservaron intactos y sin cambios.

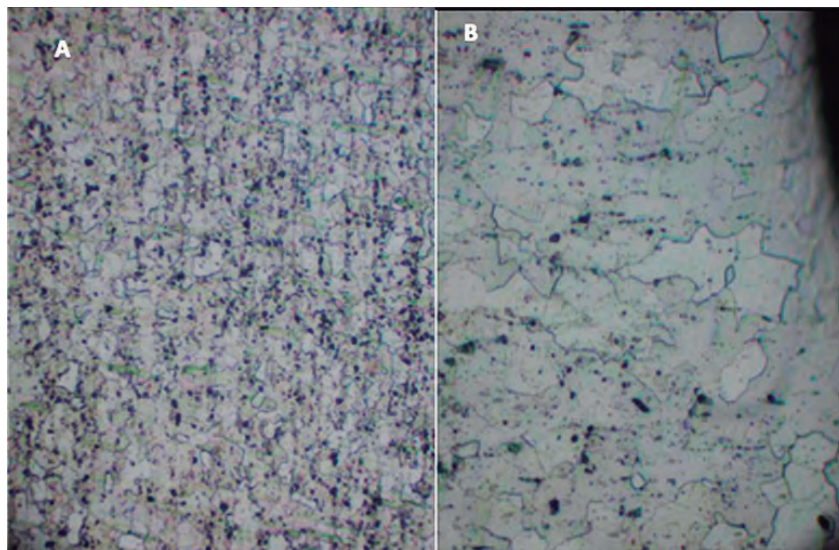


Figura 3. Implante calcinado a 200 °C. Sección longitudinal. A) A 100X (centro del implante). B) A 500 X (borde del implante).

Fuente: Los autores

Análisis metalográfico a 800 °C

La inspección metalográfica de estas muestras reveló que la microestructura está constituida de placas (zonas alargadas claras) de fase α con fase β ubicada en posiciones intermedias (fase oscura), ver Figura 4 (A). Adicionalmente, se evidenció cierto deterioro en los bordes de los implantes (irregularidades en su forma) y la presencia de una capa de óxido (de color gris) que los delimita, ver Figura 4 (B).

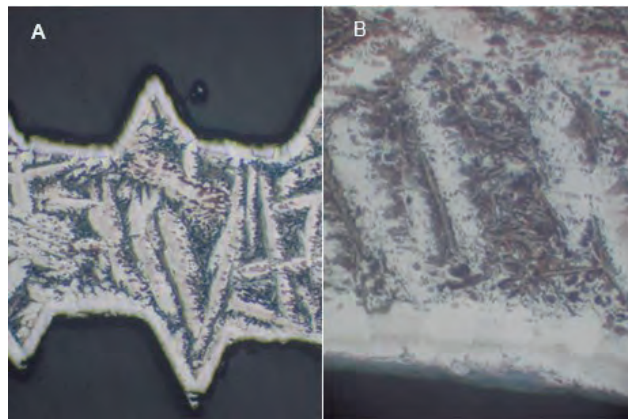


Figura 4. Implante calcinado a 800 °C. Sección longitudinal. A) A 50X (centro del implante, zona roscada). B) A 500 X (Borde del implante).

Fuente: Los autores

La inspección de las muestras a través del microscopio electrónico de barrido (JEOL JSM 6490LV) bajo el modo de electrones retro dispersados, puso en evidencia el crecimiento de una capa de óxido presente en las muestras

Análisis metalográfico a 1000 °C

Las microestructuras de las muestras sometidas a 1000°C mostraron un aumento de tamaño de grano, con respecto a las que se habían tratado a 200°C. Por otra parte, la matriz estaba constituida de granos de fase α (de color claro) con pequeñas cantidades de fase β (agujas de color negro) dispersas en el interior de los granos α , ver Figura 5.

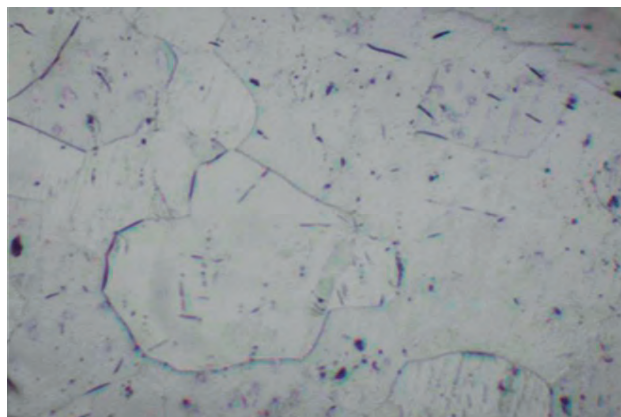


Figura 5. Implante calcinado a 1000 °C. Sección longitudinal (centro del implante). Imagen a 500X.

Fuente: Los autores

sometidas a 800 °C, (Figura 4), este fenómeno está ligado con la temperatura y el tiempo de exposición del implante en estas condiciones, ver (Figura 6).

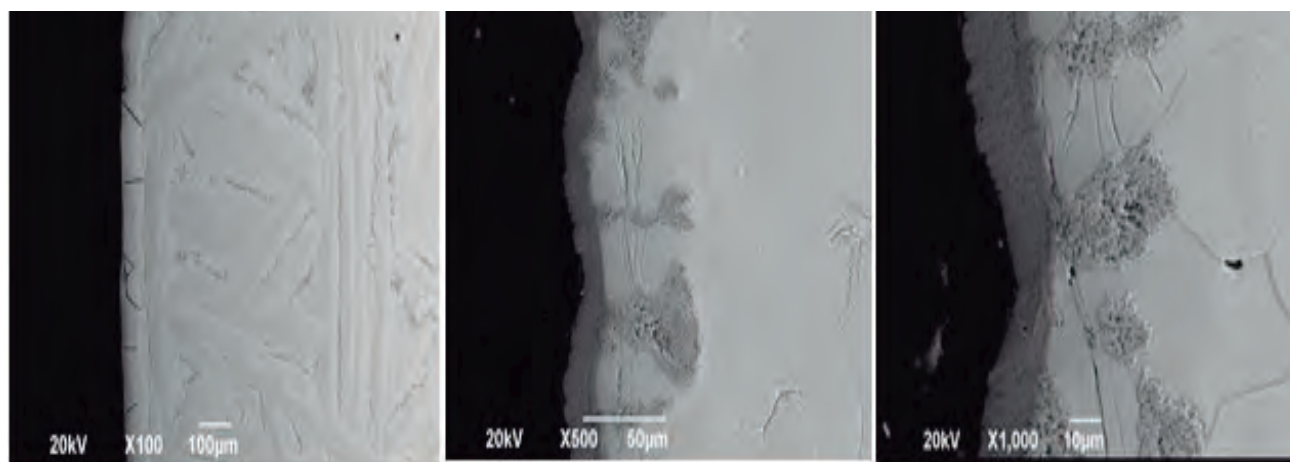


Figura 6. Estructura sometida a 1000 °C (capa de óxido)

Fuente: Los autores

Mediante análisis con espectroscopia por energía dispersiva (EDS) se encontró que la composición química

del implante no se alteró en el paso por las diferentes temperaturas, como se puede observar en las Figuras 7, 8 y 9.

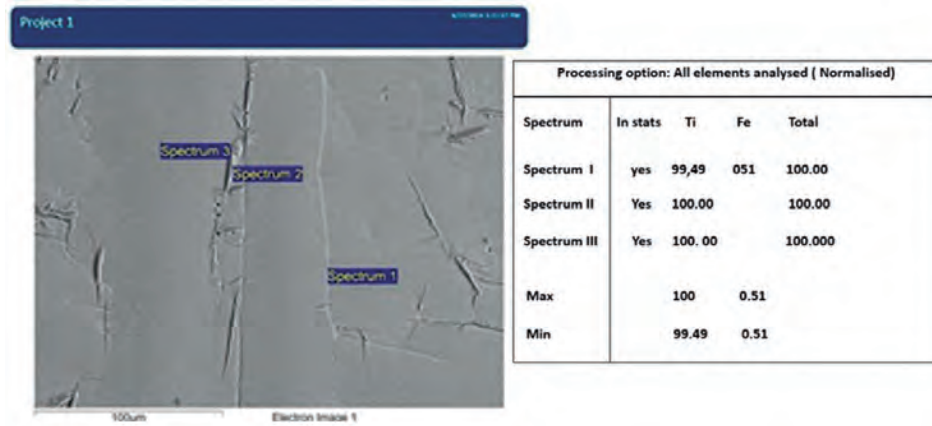


Figura 7. Análisis espectral de implante sometido a 200°C. Se observa presencia de Titanio y de Hierro, análisis por EDS.
Fuente: Los autores

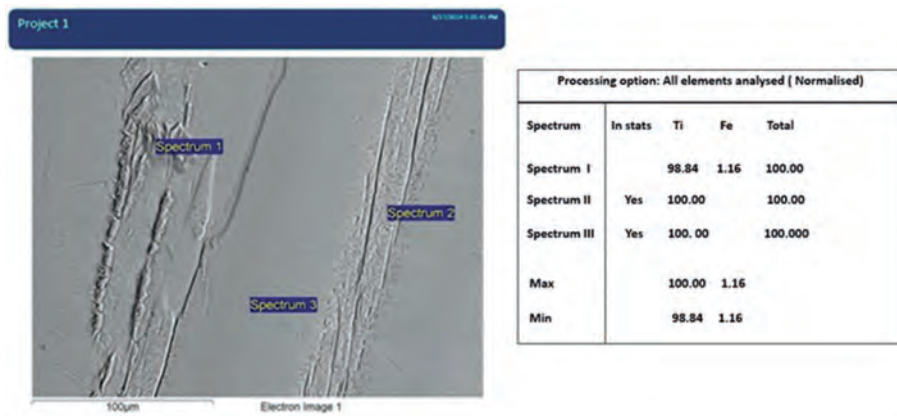


Figura 8. Análisis espectral de implante sometido a 800 °C. Se observa presencia de Titanio y de Hierro, análisis por EDS.
Fuente: Los autores

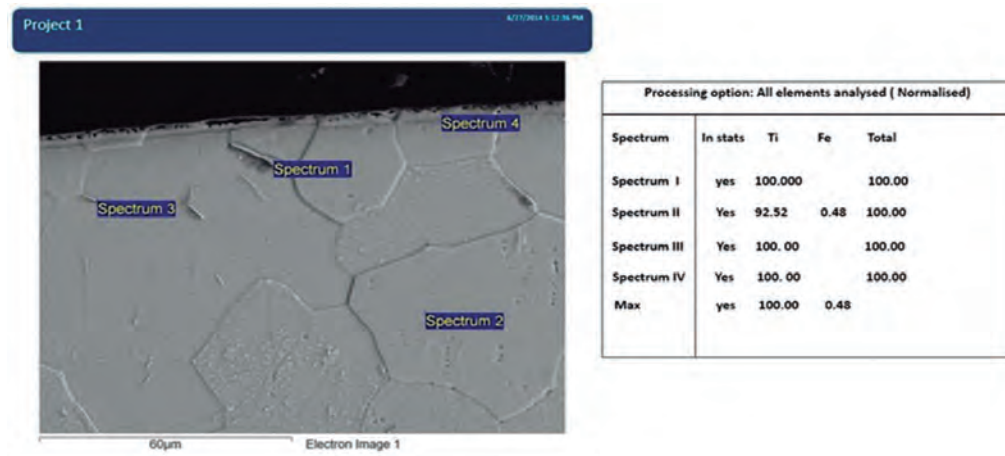


Figura 9. Análisis espectral de implante sometido a 1000 °C. Se observa presencia de Titanio y de Hierro, análisis por EDS.
Fuente: Los autores

Discussion

El gran número de implantes que se coloca actualmente en el mundo y la alta resistencia de los implantes a la temperatura los convierte en un candidato atractivo para ser considerado un identificador forense, especialmente cuando la temperatura de exposición es tan alta que los dientes se tornan muy frágiles, o cuando solo hay implantes como pilares de las prótesis (Byraki, Costea, Curca y Hostiuc, 2010).

Los diferentes trabajos realizados por Berketa *et al.* (2010), (2011a), (2011b) y (Berketa, James, y Marino, 2011c) muestran que implantes sometidos directamente a temperaturas superiores a 1600 °C no solo conservaron la forma general sino incluso el número de identificación incluido en su conexión interna, en este trabajo a temperaturas de 1000 °C se observa que la macroestructura del implante (diseño de crestas y valles) y el paso de rosca se conservan, lo que permitiría su identificación mediante rayos X.

En cuanto al código de identificación grabado en la plataforma del implante, este se borró al ser sometido a 1000 °C, lo que se explica porque en el trabajo de Berketa *et al.* (2010), (2011a), (2011b) y (2011c) el código estaba en la cavidad interna del implante mientras que en el implante diseñado fue ubicado en la plataforma y quedó protegido solo por tejido blando.

La capa de óxido de titanio se forma de manera pasiva cuando el implante es expuesto a temperatura ambiente. Esta capa inicialmente es amorfa y delgada (5-10 nanómetros), pero se torna más gruesa y cambia su composición química al someter el implante a temperaturas más elevadas (Gemelli y Camargo, 2007).

Aunque los implantes conservaron sus características macroscópicas a 200 °C, 800 °C y 1000 °C, se pudieron evidenciar cambios microestructurales para cada implante (Figuras 3 a 5), lo que podría convertirse en un indicador de la temperatura a la que estuvo sometido.

En esta investigación también se observó un aumento en el espesor de la capa de óxido de titanio con el incremento de la temperatura. De acuerdo con Berketa *et al.* (2011a) y (2011c) la exposición de los implantes a la alta temperatura generó cambios de color atribuibles al aumento en la capa de óxido (aproximadamente 0,1 mm).

Los cambios en el tamaño de la capa de óxido también podrían convertirse en un indicio de la temperatura a la

que se incineró el cadáver, ya que esta capa es susceptible de ser medida y/o caracterizada por diferentes técnicas, tales como: microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopia por energía dispersiva de rayos X (EDS o EDX), difracción de rayos X (DRX), entre otros (Gemelli y Camargo, 2007).

Conclusiones

Los ensayos realizados mostraron que los implantes elaborados en titanio tipo IV no presentaron cambios macroscópicos apreciables.

También se observó que a cada temperatura evaluada (200 °C, 800 °C y 1000 °C), existía una microestructura característica y una variación en el espesor de la capa de óxido de titanio (presente en el borde), lo que podría permitir identificar la temperatura a la que fue expuesto cada implante.

En relación con el código de identificación incorporado, se recomienda grabarlo a una profundidad superior a 1mm, debido a que el código utilizado en esta investigación desapareció al llegar a los 1000 °C.

De acuerdo con lo anterior, los implantes dentales de titanio pueden ser utilizados como elementos de identificación forense aun en caso de incineraciones.

Referencias

- Adserias, J., Ubelaker, D. H., y Zapico, S. C. (2016). Evaluation of macroscopic changes and the efficiency of DNA profiling from burnt teeth. *Science & Justice*, 56(6), 437–442. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2016.06.006>
- Berketa, J., James, H., y Marino, V. (2010). Survival of batch numbers within dental implants following incineration as an aid to identification. *Journal of Forensic Odontostomatology*, 28(1), 1–4.
- Berketa, J., James, H., y Marino, V. (2011a). A pilot study in the recovery and recognition of non-osseointegrated dental implants following cremation. *Journal of Forensic Odontostomatology*, 29(2), 38–44.
- Berketa, J., James, H., y Marino, V. (2011b). Dental implant changes following incineration.

- Forensic Science International*, 207(1–3), 50–54. doi: <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.08.025>
- Berketa, J., James, H., y Marino, V. (2011c). Dental implant changes following incineration. *Forensic Science International*, 207(1–3), 50–54. doi: <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.08.025>
- Byraki, A., Costea, A. V., Curca, G. C., y Hostiuc, S. (2010). Morphological analysis of dental implants – forensic significance. *Romanian Journal of Legal Medicine*, 18(3), 207–212. doi: <https://doi.org/10.4323/rjlm.2010.207>
- Cordner, S. M., Woodford, N., y Bassed, R. (2011). Forensic aspects of the 2009 Victorian Bushfires Disaster. *Forensic Science International*, 205(1), 2–7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.08.008>
- De Marco, F. (2013). A software for cataloging and identification of dental implants: a powerful tool for recognition and forensic identification purposes. *Journal of Forensic Odonto-Stomatology*, 31(1), 62.
- Depalakshmi, T., y Prabhakar, M. (2014). Role of dental implants in forensic identification. *Journal of Forensic Dental Sciences*, 6(2), 2014–2016. doi: <https://doi.org/10.4103/0975-1475.132546>
- Dostalova, T., Eliasova, H., Seydlova, M., Broucek, J., y Vavrickova, L. (2012). The application of CamScan 2 in forensic dentistry. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 19(7), 373–380. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2012.04.015>
- Gemelli, E., y Camargo, N. H. a. (2007). Oxidation kinetics of commercially pure titanium. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 12(3), 525–531. doi: <https://doi.org/10.1590/S1517-70762007000300014>
- Holk, P. (1996) *Cremated Bones*, Second Revised Edition, Oslo: Anatomical Institute, University of Oslo.
- Marin, L., y Moreno, F. (2004). Odontología forense : identificación odontológica de cadáveres quemados . Reporte de dos casos. *Revista Estomatología*, 12(2), 57–70.
- Merlati, G., Savio, C., Danesino, P., Fassina, G., y Menghini, P. (2004). Further study of restored and un-restored teeth subjected to high temperatures. *Journal of Forensic Odonto-Stomatology*, 22(2), 34–39.
- Moreno, S., León, M., Marín, L., y Moreno, F. (2008). Comportamiento in vitro de los tejidos dentales y de algunos materiales de obturación dental sometidos a altas temperaturas con fines forenses. *Colombia Medica*, 39(1 SUPPL. 1), 28–46.
- Nuzzolese, E., Lusito, S., Solarino, B., y Vella, G. Di. (2008). Radiographic dental implants recognition for geographic evaluation in human identification. *Journal of Forensic Odonto*, 27(1), 8–11.
- Reesu, G. V., Augustine, J., y Urs, A. B. (2015). Forensic considerations when dealing with incinerated human dental remains. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 29, 13–17. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2014.10.006>
- Rivas M, F. (2000). la violencia como problema de salud pública en Colombia: otro campo para la bioética. *Acta Bioethica*, 6(2), 335–346. doi: <https://doi.org/10.4067/S1726-569X2000000200011>
- Rubio, L., Sioli, J. M., Suárez, J., Gaitan, M. J., y Martinde-las-Heras, S. (2015). Spectrophotometric analysis of color changes in teeth incinerated at increasing temperatures. *Forensic Science International*, 252, 193.e1-193.e6. doi: <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2015.04.033>
- Sahiwal, I. G., Woody, R. D., Benson, B. W., y Guillen, G. E. (2002). Radiographic identification of nonthreaded endosseous dental implants. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 87(5). doi: <https://doi.org/10.1067/mpr.2002.124431>
- Sandholzer, M. (2014). *Heat-induced alterations of dental tissues* (Tesis doctoral). University of Birmingham. Recuperado de <http://etheses.bham.ac.uk/5049/>

- Taylor, P. T. G., Wilson, M. E., y Lyons, T. J. (2002). Forensic odontology lessons: Multishooting incident at Port Arthur, Tasmania. *Forensic Science International*, 130(2–3), 174–182. doi: [https://doi.org/10.1016/S0379-0738\(02\)00372-9](https://doi.org/10.1016/S0379-0738(02)00372-9)
- Vázquez, L., Rodríguez, P., y Moreno, F. (2012). Análisis macroscópico in vitro de los tejidos dentales y de algunos materiales dentales de uso en endodoncia, sometidos a altas temperaturas con fines forenses In vitro behavior of dental tissues and some dental materials of endodontics use. *Revista Odontológica Mexicana*, 16, 171–181.
- Von Wurmb-Schwark, N., Simeoni, E., Ringleb, A., & Oehmichen, M. (2004). Genetic investigation of modern burned corpses. *International Congress Series*, 1261, 50–52. doi: [https://doi.org/10.1016/S0531-5131\(03\)01830-2](https://doi.org/10.1016/S0531-5131(03)01830-2)

Características físico-químicas de humus obtenido de biosólidos provenientes de procesos de tratamiento de aguas residuales

Humus physical-chemical features obtained from biosolids from wastewater treatment processes

Recibido: 22- 09 - 2016 Aceptado: 15-11-2017

Álvaro Chávez Porras*¹
Yessica Liceth Velásquez Castiblanco²
Nicolás David Casallas Ortega³

¹ Colombiano. PhD. Universidad Militar Nueva Granada - UMNG. Bogotá, Colombia.
*autor de correspondencia: alvaro.chavez@unimilitar.edu.co

² Colombiana. Esp. Universidad Militar Nueva Granada - UMNG. Bogotá, Colombia.
e-mail: tmp.yessica.velasquez@unimilitar.edu.co

³ Colombiano. Esp. Universidad Militar Nueva Granada - UMNG. Bogotá, Colombia,
e-mail: tmp.nicolas.casallas@unimilitar.edu.co

Resumen

A nivel mundial las prácticas de manipulación, almacenamiento, transporte y disposición final de los residuos orgánicos constituyen uno de los retos de complejidad y relevancia; debido a que éstos son considerados como foco potencial de contaminación de recursos naturales disponibles. Uno de los factores, de mayor incidencia, se relaciona con el tratamiento de aguas residuales domésticas, el cual tiene como subproductos los biosólidos; éstos son definidos como elementos sólidos, semisólidos o líquidos que poseen elevado contenido de Materia Orgánica (MO) y macronutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K); y se considera la posibilidad de procesarlos y aprovecharlos, empleando diferentes alternativas orientadas al reúso. Una de ellas, la técnica de vermicompostaje, está basada en la estabilización de la MO por la acción de lombrices de diferentes especies, que son capaces de alimentarse de esos sustratos, generando humus que pueda ser usado como corrector de suelos o abono. Esta investigación muestra el caso donde se desarrolló un sistema de reactores, con lombrices de la especie roja californiana *Eisenia foetida*; usando como materia prima los biosólidos provenientes del tratamiento de aguas residuales del Campus Nueva Granada, UMNG, Cajicá, Cundinamarca. Se tuvo como objetivo el generar y medir un proceso biológico de estabilización que mejore las condiciones del biosólidos, donde el humus obtenido pueda ser usado como enmienda para la recuperación de suelos; estableciendo las características físico-químicas del producto final, bajo el marco de la NTC 5167. Pudiendo concluir se encuentra entre los límites establecidos por la norma, para ser utilizado como acondicionador de suelos, degradados o descompensados por procesos antrópicos o naturales.

Palabras clave: Humus; vermicompostaje; biosólidos; abono comercial.

Abstract

Global practices of handling, storage, transportation and disposal of organic waste constitute one of the challenges of complexity and relevance; Since these are considered as a potential focus of pollution of natural resources. One of the factors, increased incidence, relates to the treatment of domestic wastewater, which has as a by-product the biosolids; These defined as elements, solid, semi-solid or liquid possessing high content of organic matter (MO) and nutrients like nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K); and is considered the possibility of process and take advantage of them, using different alternatives to reuse. One of them, the technique of vermicomposting, is based on OM stabilize it by the action of worms of different species, which are able to feed on these substrates, generating humus, which can be used as soil or manure. This research shows the case where developed a system of reactors, with worms of the Californian red species, *Eisenia foetida*; using as raw material from biosolids from the treatment of wastewater of the New Granada Campus, UMNG, Cajicá, Cundinamarca. Is aimed at generating and measuring a biological process of stabilization that the conditions of the biosolids, where retrieved humus can be used as amendment to the recovery of soils; establishing the physicochemical characteristics of the final product, under the framework of the NTC 5167. And can conclude that it is within the limits established by the regulation, to be used as a soil conditioner, degraded or Decompensated by anthropogenic or natural processes.

Keywords: Humus; vermicomposting; biosolids; commercial fertilizer.

Introducción

La manipulación, almacenamiento, transporte y disposición final de los residuos orgánicos requiere pronta atención por su impacto al ambiente, ya que son considerados como fuente potencial de afectación de los recursos naturales aprovechables.

Entre ellos están los residuos generados en el tratamiento de aguas residuales domésticas, el cual tiene como subproductos los biosólidos.

Éstos están definidos como elementos sólidos, semisólidos o líquidos que poseen elevado contenido de Materia Orgánica (MO) y macronutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Se considera la alternativa de procesarlos y aprovecharlos, empleando diferentes opciones orientadas al reúso.

Una de ellas es la práctica de vermicompostaje, la cual está basada en la estabilización de la MO, por la operación de lombrices de diferentes especies, que son capaces de nutrirse de esos sustratos residuales, produciendo humus, que pueda utilizarse como acondicionador de suelos o abono orgánico.

El caso de estudio planteado se desarrolló en el Campus Universitario de la Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, ubicado en el municipio de Cajicá, departamento de Cundinamarca; donde se desarrolló un sistema de vermicompostaje, con la especie *Eisenia foetida*.

Se usó como materia prima los biosólidos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – (PTAR) de la UMNG; planta que opera un caudal máximo de 2,5 L/s de agua residual y genera en promedio 40 kg/semanales de biosólido (Aguacol, 2008).

Se tuvo como fin, establecer variaciones en el biosólido inicial y el humus resultante (en el proceso de vermicompostaje planteado), se evaluaron las mejoras en las condiciones del sustrato, en sus características físico-químicas de las concentraciones de MO, macro y micro elementos, según lo establecido por la norma NTC 5167 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC, 2004).

Residuos orgánicos de plantas de tratamiento de aguas residuales

La gestión integral de residuos orgánicos, representa uno de los desafíos de mayor relevancia a nivel mundial, debido a que son considerados como foco potencial de contaminación de los recursos naturales aprovechables para el ser humano; lo cual ha llevado a plantear alternativas biotecnológicas que permitan su estabilización y aprovechamiento, en beneficio del planeta (Martínez, 2015).

Uno de los factores de mayor incidencia en procesos contaminantes se relaciona con el procesamiento de aguas servidas y efluentes industriales en las Plantas

de Tratamiento de Aguas Residuales – (PTAR). En los subproductos provenientes de estas metodologías se destacan los lodos residuales o biosólidos, los cuales son generados en altos niveles (Hernández-Rodríguez, Ojeda-Barrios, López-Díaz y Arras-Vota, 2010).

Entre las principales características físico-químicas, de este sustrato, encuentran:

- pH en valores cercanos al neutro; como lo reportado por Peñarete, Silva, Daza, Torres y Urrutia (2013), mostrando un valor de 7,6 para biosólidos de la PTAR Cañaveralejo de Cali (V).
- Densidad valorada en 1,24 g/cm³ en un ciclo de cultivo de cuatro meses (Peñarete Murcia *et al.*, 2013).
- Elevado contenido de Materia Orgánica (MO), entre el 60 y 70%; así como de valores elevados en contenido de macronutrientes tales como, nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), catalogados como esenciales para el desarrollo vegetal (Castro, Henríquez y Bertsch, 2008).

Sistemas de tratamiento para residuos orgánicos

Como alternativas de tratamiento de los sustratos orgánicos se plantea el compostaje y la producción de abonos. Y su opción, el vermicompostaje, como una técnica aplicada que presenta un proceso biotecnológico de degradación y estabilización de MO, por medio de la acción de lombrices, las cuales se alimentan de los residuos, acelerando su descomposición (Fernández, 2011; Hernández-Rodríguez, *et al.*, 2010).

A este nivel, el abono presenta una serie de propiedades y características que contribuyen a aumentar la fertilidad del suelo. Dentro de las propiedades físicas se destaca el mejoramiento en la estructura, textura y permeabilidad del suelo, aumentando el nivel de retención hídrica (Fondo para la protección del agua – FONAG, 2010).

Cabe anotar, también, que el uso e incorporación de fertilizantes químicos y abonos, se plantea como una práctica asociada a suplir las necesidades referentes al crecimiento de las distintas especies vegetales en un cultivo, así como la recuperación de los suelos, teniendo en cuenta que su aplicación permite incrementar los niveles de MO (Acosta y Peralta, 2015).

Estudios realizados en investigaciones preliminares, muestran que los abonos orgánicos pueden ser

implementados en tierras en las cuales se realizan cultivos intensos; brindando como beneficio la mejora en la estructura del suelo, por medio del aumento de la capacidad de retención de agua (Fernández, 2011).

En el mercado es fácil encontrar abonos y fertilizantes químicos comerciales de carácter sólido descritos como simples, compuestos y de *blending*, así como líquidos y fertilizantes órgano-minerales; que se diferencian de los orgánicos debido a que generan efectos nocivos con un uso extendido en el tiempo (Motta y Pinzón, 2011).

Según la NTC 5167 (ICONTEC, 2004), la clasificación de abonos orgánicos minerales sólidos está definida como una mezcla o combinación de abonos minerales y orgánicos de origen animal, vegetal, pedogenético (geológico) o provenientes de lodos de tratamiento de aguas residuales (biosólidos), que contiene porcentajes mínimos de MO (expresada como carbono orgánico oxidable total); determinando su uso en procesos de recuperación de suelos (ICONTEC, 2004).

Metodología aplicada en los reactores biológicos

Este trabajo se realizó en las instalaciones del Campus Universitario, UMNG, Cajicá, Cundinamarca, ubicado a una longitud de 74°00.552' O, latitud de 4°56.543' N y altura de 2580 msnm; con una temperatura media de 13°C y con humedad relativa promedio de 82 % (como características físicas del terreno).

Se tomaron muestras de biosólidos, provenientes de la PTAR UMNG (Figura 1A y 1B), debidamente preservadas, etiquetadas y empacadas en neveras con temperatura aproximada a 4°C. Registradas para el análisis, siguiendo las metodologías del “Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater”.





Figura 1. Instalaciones de la PTAR UMNG, Cajicá, Cundinamarca
Fuente: Los autores

El proyecto se llevó a cabo con la implementación de un reactor biológico (sistema de vermicompostaje); permitiendo evaluar el comportamiento de individuos de la especie *Eisenia foetida* (Figura 2A), obtenidos de un cultivo previo del proveedor - "Lombricultura de Tenjo", adaptado al consumo de biosólido.

El sustrato utilizado como materia prima para la alimentación de las lombrices fue el biosólido, el cual se muestra en la Figura 2B.



Figura 2. Especie de cultivo *Eisenia foetida* en Biosólido PTAR-UMNG
Fuente: Los autores

El diseño del reactor, en camas modulares (Figura 3) permitió el control de las condiciones necesarias para el desarrollo del proceso, utilizando para ello un contenedor de 2,00 m de largo, 1,00 m de ancho y 0,30 m de altura, recubierto de plástico en su interior, con divisores, según la figura mostrada.

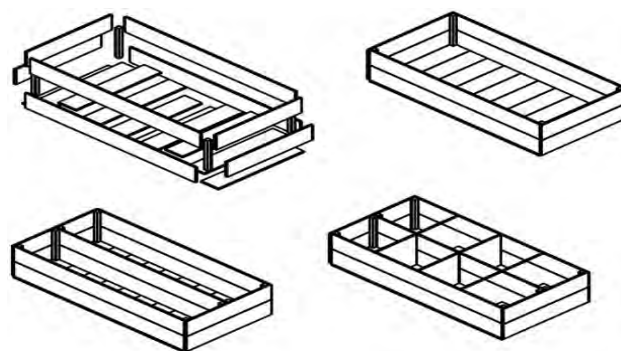


Figura 3. Camas modulares de vermicompostaje.
Fuente: Los autores

El interior del reactor se adecuó con una capa de grava de 0,15 m de altura; seguida de una capa de sustrato (biosólido) de 0,05 m de espesor, correspondiente a aproximadamente 60 kg; adicionando los individuos (lombrices) en la parte superior, acorde con un estudio poblacional y de consumo, previamente realizado. Recubierto con polisombra, con el fin de mitigar los efectos ambientales de pérdida de humedad, variaciones climáticas, proliferación de vectores y por la condición de fotofobia de las lombrices; todo dentro de un invernadero.

Técnicas de evaluación

El reactor funcionó durante 90 días; donde mensualmente se aplicó, adicionalmente, una capa de 0,075 m de biosólidos, correspondiente a un total de 95 kg, finalizando el mes 1 y finalizando el mes 2. Pasados los tres meses, se realizó el análisis final (caracterización) del humus resultante.

Se hicieron análisis al biosólido sin ningún tipo de tratamiento (sustrato inicial), al humus resultante (vermicompostaje) y a una muestra de control.

Las técnicas utilizadas para la determinación de los parámetros evaluados fueron: nitrógeno según Kjeldahl; fósforo por colorimetría; plomo, cromo, cadmio y potasio por absorción atómica (metales pesados por digestión ácida); contenido de carbono orgánico por calcinación; pH en extracto de saturación; y densidad por método de picnómetro.

Resultados obtenidos

En la Tabla 1 se presenta la caracterización físico-química obtenida del biosólido, humus y sustrato control,

en los parámetros anteriormente descritos; con su respectivo valor límite máximo de la NTC 5167 (ICONTEC, 2004).

Tabla 1. Caracterización del biosólido inicial, humus final, experimento control y su respectivo valor en la NTC 5167 (ICONTEC, 2004).

Parámetro	Biosólido inicial	Humus final	Control	NTC 5167
pH	6,30	6,80	6,30	Reportar
Contenido de humedad (%)	75,27	69,30	56,40	Max 15%
Densidad (g/cm ³)	0,89	1,20	1,10	Reportar
Relación carbono: nitrógeno (C/N%)	13,26	18,40	9,11	Reportar
Contenido de cenizas (%)	48,20	68,85	62,43	Reportar
Contenido de carbono orgánico Oxidable (%)	23,87	14,35	17,31	5-15%
Nitrógeno total (%)	4,50	4,90	8,30	Min 2 %
Fosforo total (%)	1,10	2,70	2,00	Min 2%
Potasio total (%)	0,30	1,40	1,10	Min 2%
Cadmio (mg/kg)	0,90	0,60	0,9	Max 39
Cromo (mg /kg)	20,50	11,80	20,50	Max 1200
Plomo (mg/kg)	19,00	7,70	19,00	Max 300

Fuente: Los autores.

Discusión y análisis

De los resultados obtenidos, en las propiedades físicas, el pH no tuvo una variación significativa (C.V=0,04), aunque se observa un aumento en el humus final.

Esto puede originarse en el proceso de mineralización de los compuestos nitrogenados en nitratos, compuestos NO_x y otros compuestos ácidos orgánicos. Considerando que en valores de pH cercanos a 7 se espera un crecimiento favorable de las lombrices en el lodo (Ndegwa y Thompson, 2000).

Por su parte, la humedad, que es un factor de gran importancia en el proceso de compostaje, por ser el medio por el cual se transportan las sustancias y nutrientes, permite la asimilación para la gran variedad de organismos presentes. Ésta debe de ir disminuyendo a medida que pasa el tiempo de compostaje, ya que valores inferiores a 35% muestran un sistema de compostaje inestable (Román, Martínez y Pantoja, 2013).

Aunque el valor final obtenido del proceso propuesto no cumplió con los requerimientos de la norma colombiana, se evidencia que la muestra analizada fue tomada después del trapeo; y generalmente, el humus conseguido es extraído, molido y secado con procesos unitarios que pueden modificar la humedad del producto final.

En la transformación del material grueso en material fino, característico del humus, se explica el aumento de la densidad en el sistema; teniendo en cuenta que densidades por encima de 1,4 g/cm³ se consideran altas para suelos de texturas finas (Peñarete *et al.*, 2013).

El contenido de carbono orgánico, es un indicador de la concentración de MO y un índice de la calidad del humus; según la NTC 5167 (ICONTEC, 2004) este porcentaje debe de estar entre 5 - 15%. En la Figura 4 se presenta la variación de este parámetro en el sistema de vermicompostaje propuesto.

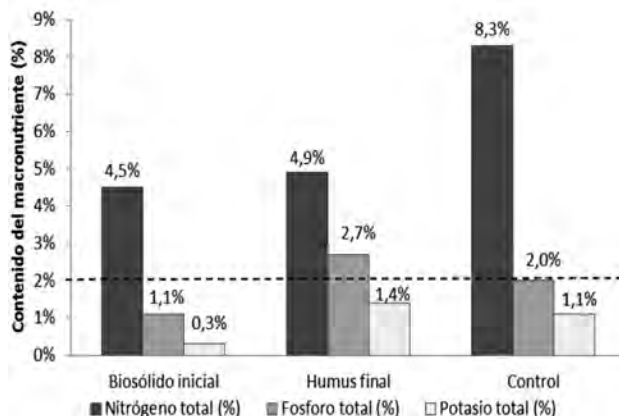


Figura 4. Comportamiento de los macronutrientes en el tratamiento.

Fuente: Los autores

Se observa una disminución del porcentaje (C.V=0,25), debido a que durante los 90 días de tratamiento, la MO fue el alimento de los organismos presentes en el sistema (Figura 5). Lo que influye favorablemente en la reducción de la relación C/N, ya que existirá una mayor biodisponibilidad del nitrógeno para las plantas cuando es usado como abono (Sinha, Herat, Bharambe, y Brahambhatt, 2010).

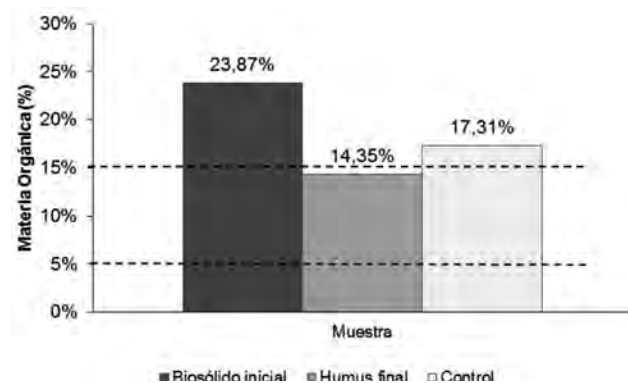


Figura 5. Contenido de materia orgánica de las muestras inicial y final del sistema de vermicompostaje.

Fuente: Los autores

El contenido de MO y de nutrientes como N y K son de importancia para el aprovechamiento agrícola; sin embargo se debe tener precaución cuando éstos se presentan en sustratos de pH altos, pues crean restricciones para el uso en suelos básicos (Peñarete *et al.*, 2013).

Además, la digestión directa y el consumo de lodos por las lombrices, también podrían ser útiles para la estabilización de la MO (Jian, Baoyi, Jie, & Meiyan, 2014). El humus final contiene un porcentaje de 14,4% en MO, el cual se encuentra en los límites establecidos por la norma.

A continuación se presenta el comportamiento de los macronutrientes N-P-K, entre el biosólido y el humus final (Figura 4), donde se evidencia un aumento de los componentes, favoreciendo el producto final.

El contenido de N total es directamente proporcional a los materiales iniciales, del proceso de vermicompostaje y de las condiciones de maduración (Acosta y Peralta, 2015).

Con respecto a los analitos N y P, los porcentajes de contenido aumentaron significativamente (C.V: N=0,04, P=0,42), cumpliendo con lo establecido por la NTC 5167 (ICONTEC, 2004). El N, en la utilización de residuos orgánicos aporta ventajas en cuanto a proporcionar un suministro regulado y su potencial en la reducción de la contaminación nitrogenada (Román *et al.*, 2013).

El aumento en el porcentaje se puede explicar, como se había mencionado anteriormente, en la mineralización de los compuestos nitrogenados en nitratos, NO_x y compuestos ácidos orgánicos, que permiten incrementar el contenido del N, tanto en el lodo sin tratar (control) como en el producto final o humus (Ndegwa y Thompson, 2000).

Consecuentemente, la relación C/N es un indicador de madurez y estabilidad de la MO en el compost; y con valores cercanos a 25,00, considera un vermicompostaje óptimo para la estabilización de los lodos y la reducción de sólidos volátiles.

Valores bajos indican inestabilidad en el material (Gaiand, 2014), con un contenido alto de N; recomendando mezclarlo con materiales ricos en C, tales como pajas y hojas en descomposición (Sinha *et al.*, 2010).

Lo que se evidencia en la relación del biosólido inicial 13,26 en comparación con un humus estabilizado con valor C/N igual a 18,40.

En cuanto al P, en los residuos orgánicos se encuentra fundamentalmente en ácidos nucleicos, fosfolípidos y fitina. El aumento significativo (C.V=0,42) en el humus final, favoreció las propiedades del abono orgánico sólido final, ya que no solo aumentó los niveles en el suelo directamente, sino que también, logró mejorar la capacidad de absorción y disponibilidad en suelo. (Román *et al.*, 2013).

Por otro lado, K es un elemento móvil en el suelo, por lo que es fácilmente lixiviado (percolación) y su porcentaje disponible es muy reducido; como se observó en el humus final, el cual no logró llegar al valor exigido por la norma, aunque fue el elemento que mayor coeficiente de variación; tuvo: un CV=0,65.

Generalmente, en sistemas de compostaje diferentes se menciona que los contenidos de K encontrados son bajos (1-1,5%), teniendo en cuenta que este elemento puede disminuir en la etapa final del proceso cuando no se tiene abundante MO (Muñoz, 2005); concluyendo, que para un compost estabilizado completamente, el valor debe estar cercano a 1,5%; logrando un humus final del estudio con valores cercanos a 1,4%.

Cabe anotar que, en la muestra control, la concentración de los macronutrientes aumentó, simplemente, por procesos de descomposición. Exponiendo la importancia del papel de la lombriz, estabilizando dichos componentes y proporcionando las características deseadas para el humus final.

En cuanto al comportamiento de los metales pesados, determinados mediante espectrofotometría de absorción atómica, sus variaciones se presentan en la Figura 6; considerando que en la figura no se muestra el límite máximo denotado por la NTC 5167 (ICONTEC, 2004), ya que ningún analito se acerca a los valores exigidos.

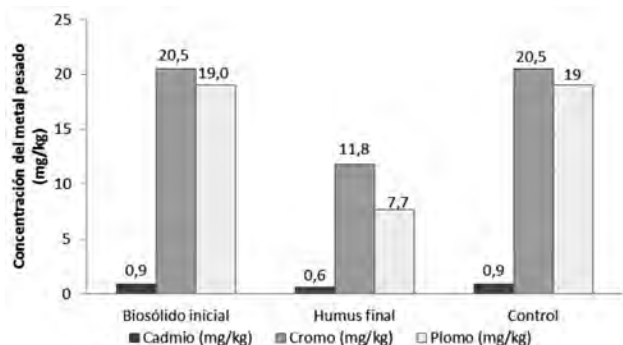


Figura 6. Concentración de metales pesados en el biosólido inicial y humus final.

Fuente: Los autores

Los resultados confirman que las lombrices reducen el nivel de estos metales en el lodo vermicompostado; donde la concentración disminuyó significativamente (C.V Cd=0,20, Cr= 0,27, Pb= 0,42) respecto al biosólido inicial y humus final.

La toxicidad de estos parámetros es un factor limitante en el uso agrícola del abono, por sus efectos nocivos a largo plazo y la bioacumulación en los organismos. Aunque, por la degradación microbiana natural, los lodos logran estabilizarse lentamente, los metales pesados siempre permanecerán en el sistema y con el transcurrir del tiempo podrán caer al suelo o unirse a moléculas orgánicas del suelo.

La actividad de las lombrices tiene un papel importante en la reducción de la concentración de estos contaminantes, si se proporcionara materiales para mejorar la actividad de los organismos vivos y su reproducción; obteniendo una mayor eliminación de los metales pesados (Sinha *et al.*, 2010).

Para terminar se realizó la comparación del humus final del caso experimental, frente a un abono orgánico de carácter comercial (Tabla 2). Se seleccionó el abono producido por la empresa colombiana "Lombricultura de Tenjo", Cundinamarca, teniendo en cuenta que dicho producto proviene de un proceso de vermicompostaje.

Tabla 2. Comparación humus final y Lombritenjo, producto comercial.

Parámetro	Humus final	Abono orgánico comercial (Lombritenjo)
Contenido de humedad (%)	69,3	25
pH	6,8	7,37
Contenido de carbono orgánico oxidable (%)	14,35	19,5
Nitrógeno Total (%)	4,9	1,19
Fósforo (%)	2,7	1,21
Potasio (%)	1,4	1,01
Calcio (%)	6	1,62
Magnesio (%)	1,1	0,67

Fuente: Los autores

En cuanto a los parámetros físicos de los dos materiales, debe tenerse en cuenta que la muestra tomada en este estudio fue sin el tratamiento de secado y molienda; por lo tanto esta puede ser controlada lográndose una disminución del contenido de humedad. En cuanto al pH ambos productos poseen valores cercanos a 7, lo que favorece al suelo productivo.

En el contenido de carbono orgánico oxidable, se ve aventajado el humus final debido a que su porcentaje es menor a 15%, lo que satisface las especificaciones de la norma (5-15%); por el contrario el producto comercial Lombritenjo no cumple con estos requerimientos.

Al igual que en su contenido de macro (N-P-K) y micro (Ca, Mg) nutrientes, los cuales se requieren en un porcentaje superior al 2%.

Las observaciones anteriores manifiestan la calidad del humus final obtenido; el cual podría ser empleado sin complicaciones normativas; sin embargo, se debe tener en cuenta la concentración de metales pesados, ya que por su toxicidad y bioacumulación en los organismos podrían afectar el suelo y los procesos que ocurren en él.

Conclusiones

Las prácticas de manipulación, almacenamiento, transporte y disposición final de los residuos orgánicos son foco potencial de contaminación de los recursos naturales disponibles, principalmente en lo relacionado con el tratamiento de aguas residuales, sean domésticas

o industriales. Estas aguas generan un subproducto, los biosólidos, los cuales son elementos que poseen elevado contenido de Materia Orgánica – MO y macronutrientes como N, P y K; teniendo la posibilidad de ser procesados y aprovechados, en su reutilización.

En el proceso propuesto, la mineralización y estabilización de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales, PTAR UMNG, a través de la técnica de vermicompostaje logró una disminución de los valores de carbono orgánico total de un 40%; lo que pudo ser debido a factores como la biodegradabilidad del residuo, su naturaleza y el tamaño de las partículas que lo componen. También, se pudo establecer, comparando los resultados antes y después del tratamiento, que se presentó un aumento de la concentración de nutrientes, esto como consecuencia de la mineralización de la MO.

De los resultados obtenidos, el pH no tuvo una variación significativa, considerando que en valores cercanos a 7 se espera un crecimiento favorable de especies animales o vegetales. Respecto a la humedad, como medio de transporte de sustancias y nutrientes, se disminuyó a medida que pasó el tiempo de compostaje, considerando la obtenida como modificable en los procesos unitarios realizados. La relación C/N indicó madurez y estabilidad de la MO en el compost resultante, revelando la calidad de la lombriz en estos procesos, estabilizando dichos componentes y proporcionando las características deseadas por el humus final.

Comparado el humus resultante con uno comercial se evidenció su calidad, el cual podría ser empleado sin complicaciones normativas; pero, debe tenerse en cuenta la concentración de metales pesados, ya que por su toxicidad y bio-acumulación en los organismos podría afectar el suelo.

Para futuros estudios se recomienda analizar los efectos fisiológicos que tiene el biosólido sobre las lombrices *Eisenia foetida*, específicamente respecto a los metales pesados, en el ciclo de vida de estos individuos, con el fin de dar un aprovechamiento.

Agradecimientos

La investigación avanzada es un producto derivado en el desarrollo del proyecto de Investigación de alto Impacto IMP ING 2289 “Procesos de lodos activados con aireación extendida para sedimentos de lixiviados del relleno sanitario Doña Juana – Bogotá; complementado con técnica

de vermicompostaje” Financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada Vigencia 2017-2018.

Referencias

- Acosta Carrión, W., y Peralta Franco M. I. (2015). *Elaboración de abonos orgánicos a partir del compostaje de residuos agrícolas en el municipio de Fusagasugá* (Tesis doctoral). Universidad de Cundinamarca, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Fusagasugá, Colombia.
- Aguacol. (2008). Diseño definitivo de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales domesticas para la Universidad Militar Nueva Granada - Sede Cajicá. Bogotá.
- Castro, A., Henríquez Henríquez, C., y Bertsch Hernández, F. (2008). Capacidad de suministro de N, P y K de cuatro abonos orgánicos. *Agronomía Costarricense*, 33(1).
- Fernández Gómez, M. J. (2011). *Aplicación de la tecnología del vermicompostaje para la valorización agronómica de residuos y desechos de cultivos de invernadero*. (Tesis doctoral). Universidad de Granada - Instituto de Biotecnología, Granada, España.
- Fondo para la Protección del Agua-FONAG. (2010). Abonos orgánicos Protegen el suelo y garantizan alimentación sana Manual para elaborar y aplicar abonos y plaguicidas orgánicos. Recuperado de http://www.fonag.org.ec/doc_pdf/abonos_organicos.pdf
- Gaind, S. (2014). Effect of fungal consortium and animal manure amendments on phosphorus fractions of paddy-straw compost. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 94, 90-97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.06.023>
- Hernández-Rodríguez, O. A., Ojeda-Barrios, D. L., López-Díaz, J. C., y Arras-Vota, A. M. (2010). Abonos orgánicos y su efecto en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. *Tecnocienc. Chihuahua*, 4, 1-6.

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC. (2004). NTC 5167: *Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo* (pág. 43).
- Jian, Y., Baoyi, L., Jie, Z., & Meiyan, X. (2014). Insight into the roles of earthworm in vermicomposting of sewage sludge by determining the water-extracts through chemical and spectroscopic methods. *Bioresource Technology*, 94-100.
- Martínez, N. M. J. (2015). La gestión integral de residuos sólidos urbanos en México: entre la intención y la realidad. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, (17), 29-56. doi: <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.17.2015.1419>
- Motta, L. A., y Pinzón, A. P. (2011). *Evaluación de la viabilidad financiera del aprovechamiento de los residuos orgánicos producidos en Centroabastos S.A. para la generación de energía y compostaje para la empresa Incom Ltda* (Tesis especialización). Universidad de la Sabana, Bucaramanga, Colombia.
- Muñoz, J. (2005). *Compostaje en Pescador, Cauca: tecnología apropiada para el manejo de residuos orgánicos y su contribución a la solución de problemas medioambientales* (Trabajo de grado para título de Ingeniero Ambiental). Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.
- Ndegwa, P. M., y Thompson, S. (2000). Effects of C-to-N ratio on vermicomposting of biosolids. *Bioresource Technology*, 75(1), 7-12. doi: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00038-9)
- Peñarete Murcia, W., Silva Leal, J., Daza Torres, M., Torres Lozada, P., y Urrutia Cobo, N. (2013). Efecto de aplicación de biosólidos sobre las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar. *Acta Agronómica*, 62(3), 251-260. Recuperado de https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/33237
- Román, P., Martínez, M., y Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Oficina Regional para América Latina y el Caribe.
- Sinha, R. K., Herat, S., Bharambe, G., y Brahambhatt, A. (2010). Vermistabilization of sewage sludge (biosolids) by earthworms: converting a potential biohazard destined for landfill disposal into a pathogen-free, nutritive and safe biofertilizer for farms. *Waste Management & Research*, 28(10), 872-881. doi: <https://doi.org/10.1177/0734242X09342147>
- Yang, J., Lv, B., Zhang, J., y Xing, M. (2014). Insight into the roles of earthworm in vermicomposting of sewage sludge by determining the water-extracts through chemical and spectroscopic methods. *Bioresource technology*, 154, 94-100. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.023>

Bagazo de sorgo dulce: una alternativa para la producción de etanol de segunda generación en Colombia (Parte I)¹

Sweet sorghum bagasse: an alternative for the production of second generation Ethanol in Colombia (Parte I)¹

Recibido: 27- 01 - 2017 Aceptado: 25-05-2017

John Fredy Holguín Múnera²

Juan David Peña³

Luis Alberto Ríos⁴

Mariana Peñuela Vásquez⁵

¹ Este artículo es producto de una investigación terminada y los resultados fueron tomados de la ejecución del Proyecto: "Evaluación Integral de la producción más eficiente de Bioetanol y Biobutanol a partir de Biomasa Lignocelulósica". El proyecto se inició el 20-01 de 2010 y finalizó 20-01 de 2013 y fue financiado por EPM.

² Colombiano MSc. Universidad de Antioquia UdeA, Calle 70 No. 52-21 Medellín, Colombia. Facultad de Ingeniería Grupo Bioprocesos. e-mail: johnfh23@gmail.com.

³ Colombiano MSc. Empresas Públicas de Medellín E.S.P. Medellín, Colombia. Innovación y Desarrollo.

⁴ Colombiano PhD, Universidad de Antioquia UdeA Medellín, Colombia. Facultad de Ingeniería. e-mail: luis.rios@udea.edu.co.

⁵ Colombiana PhD, Universidad de Antioquia UdeA Medellín, Colombia. Facultad de Ingeniería, Grupo de Bioprocesos. e-mail: mariana.penuela@udea.edu.co.

Resumen

Cada material lignocelulósico es un nuevo terreno por explorar, por tanto, la caracterización físico-química de estos materiales es un paso fundamental para el proceso de biotransformación. Se determinó la composición lignocelulósica del bagazo de sorgo dulce, encontrándose valores cercanos a los valores reportados en la literatura. Se estudiaron las tecnologías de pretratamiento, explosión con vapor, hidrólisis ácida suave, deslignificación alcalina, remojo con NH₃, pretratamiento con amoníaco AFEX, ozonólisis y peróxido alcalino; encontrándose que la deslignificación alcalina con NaOH es la mejor opción para pretratar este sustrato. Se disminuyó el contenido de lignina en un 52% y se obtuvo una productividad a etanol de 0,87 g/L h, lo cual equivale a un rendimiento de 114 L de etanol/Ton bagazo de sorgo dulce seco pretratado.

Palabras clave: Sorgo dulce; lignocelulósico; etanol; deslignificación alcalina.

Abstract

Each lignocellulosic material is a new terrain to be explored, therefore, the physical chemical characterization of these materials is a fundamental step for the biotransformation process. The lignocellulosic composition of sweet sorghum bagasse was determined, values close to values reported in the literature were found. Pretreatment technologies were explored with steam, mild acid hydrolysis, alkaline delignification, NH₃ soaking, AFEX, ozonolysis and alkaline peroxide; Being that the alkaline delignification with NaOH is the best option to pre-treat this substrate. The lignin content was decreased by 52% and ethanol productivity of 0.87 g / Lh was obtained, which equates to a yield of 114 L of ethanol / Ton bagasse of pre-treated dry sweet sorghum.

Keywords: Sweet sorghum; lignocellulosic; ethanol; alkaline delignification.

Introducción

Actualmente la preocupación mundial por la conservación del medio ambiente y la generación de alternativas energéticas distintas a las obtenidas convencionalmente a partir de la explotación del petróleo han llevado a la búsqueda de fuentes de energía renovables; es por esto que la utilización de la biomasa frente a los hidrocarburos, presenta ventajas comparativas que la hacen atractiva para su utilización en procesos de generación de energía térmica, motriz o eléctrica, bien sea en sistemas centralizados, en sistemas de generación de energía distribuida o para zonas no interconectadas (Alvira, Tomás-Pejó, Ballesteros y Negro (2010); Morales, 2007; Rincón, 2009 y Toquero y Bolado, 2014).

Colombia centra su economía en actividades de primer nivel; debido a su relieve y a los diferentes climas que posee, su territorio es apto para generar una gran variedad de productos agrícolas, dentro de los cuales se encuentran los productos de consumo interno y los de exportación (García, 2003). Las principales zonas agrícolas de Colombia se ubican en la región Andina y en las llanuras de la costa Atlántica. Según los datos reportados por el Ministerio de Agricultura, la superficie sembrada en Colombia para el año 2008 fue de 4,7 millones de hectáreas distribuidas así: los cultivos transitorios ocupan el 40% del área cultivada y los cultivos permanentes ocupan el 60% de la superficie (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2010). La producción agrícola del país conlleva a la coproducción de residuos agroindustriales de interés, tales como la cascarilla de arroz, los residuos de cosecha de la caña de azúcar, la pulpa y madera de café, cacao sobrante del proceso de beneficio, residuos de cosecha de maíz y bagazo de sorgo dulce, los cuales podrían emplearse para la generación de energía.

En trabajos anteriores se realizó un proceso de selección de materiales lignocelulósicos basado en criterios como cantidad generada de residuo, ubicación, periodicidad de las cosechas, uso, composición de la matriz sólida y rendimiento teórico a etanol (Kafarov, 2010). Este estudio arrojó el bagazo de sorgo dulce como el residuo agroindustrial con mayor potencial para la producción de etanol de segunda generación.

El sorgo dulce ha sido ampliamente utilizado para la elaboración de bebidas alcohólicas basado en procesos de fermentación de los jugos extraídos del tallo por medio de un sistema de presión similar al empleado en la extracción de jugos de la caña de azúcar. Los jugos extraídos del sorgo contienen un porcentaje de azúcares equivalentes al encontrado en las diversas variedades de caña azucarera (Chuck-Hernández, Pérez-Carrillo, Heredia-Olea, y Serna-Saldívar, 2011 y Morales, 2007). Sin embargo, la cantidad de sacarosa en relación con la glucosa y fructosa es más alta en la caña de azúcar (90 y 6% respectivamente), mientras que en el bagazo de sorgo dulce es (69,21 y 14% respectivamente). La cantidad de azúcar producida con el bagazo de sorgo dulce es de 10 ton de azúcar/hectárea sembrada contra las 19 ton de azúcar/hectárea sembrada para la caña de azúcar (Chuck-Hernández *et al.*, 2011; Reis, Damilano, Menezes, y de Moraes, 2016). El bagazo obtenido después del proceso de extracción de jugos es un material fibroso, conformado básicamente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Es posible transformar la fracción holocelulósica (celulosa y hemicelulosa) de este bagazo de sorgo dulce, mediante procesos químicos, físicos y/o biológicos, en monosacáridos, para su posterior conversión a etanol. (Tejada *et al.*, 2010). Una de las principales dificultades para la biotransformación de los materiales lignocelulósicos es su variabilidad en cuanto a su composición, lo que exige su caracterización fisicoquímica. El segundo obstáculo es la definición de una tecnología de pretratamiento que permita disgregar la fracción polisacáridica, sin generar concentraciones apreciables de sustancias inhibitorias. La correcta conjugación de estos dos elementos permite obtener la mejor cantidad de etanol posible (Sánchez, 2010). En este trabajo se presenta la caracterización fisicoquímica del bagazo de sorgo dulce, así como la selección y optimización del mejor pretratamiento para este material, a la vez que se evalúan la degradabilidad y fermentabilidad del mismo, a las condiciones de proceso encontradas.

Materiales y métodos

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó sorgo dulce *Sorghum bicolor* L. Moench, suministrado por la empresa Clayuca proveniente del Valle del Cauca, Colombia. Este material se secó hasta alcanzar una humedad de aproximadamente 10% y posteriormente su tamaño se redujo hasta obtener partículas de un tamaño entre 10-30 mm según lo reportado en la literatura por Kumar y Wyman, (2009).

Métodos analíticos

Las cantidades de celulosa, hemicelulosa, lignina y cenizas del material crudo y pretratado se determinaron según los protocolos de National Renewable Energy Laboratory NREL/TP-510-42618 (Sluiter *et al.*, 2012), NREL/TP-510-42622 (Sluiter *et al.*, 2008a), respectivamente.

Azúcares Reductores Totales:

La cuantificación de los azúcares provenientes de la celulosa se realizó por el método de ART (Azúcares Reductores Totales) utilizando como reactivo el ácido 3,5 dinitrosalicílico (DNS) (Miller, 1959).

Glucosa

Para la determinación de glucosa se usó el método enzimático basado en la enzima glucosa oxidasa, según el kit de la compañía Biosystem S.A.

Selección del pretratamiento

Para seleccionar el pretratamiento más adecuado para el sustrato bagazo de sorgo dulce se tomaron como parámetros de evaluación: cantidad de lignina removida, la degradabilidad y su fermentabilidad. Se evaluaron siete pretratamientos los cuales se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones experimentales para evaluación preliminar de pretratamientos sobre el bagazo de sorgo dulce.

Pretratamiento	Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Tiempo (min)	Relación Sólido/Líquido	Concentración agente de pretratamiento	Referencia
Explosión con vapor	210°C	1900	2 min	N/A	N/A	(Ballesteros <i>et al.</i> , 2008) (Hamelinck, Van Hooijdonk y Faaij, 2005) (Lynd, Weimer, Van Zyl, y Pretorius, 2002)
Hidrólisis ácida diluida	90	Atmosférica	90	1/10	H ₂ SO ₄ 2%	(Hamelinck <i>et al.</i> , 2005) (Lynd <i>et al.</i> , 2002) (Sun y Cheng, 2002)
Alcalina con NaOH	120	200	30	1/15	1 % NaOH	(Hamelinck <i>et al.</i> , 2005) (Saha y Cotta, 2006) (Sun y Cheng, 2002)
Remojo con amoníaco acuoso	60	Atmosférica	360	1/6	15 % NH ₃	(Lynd <i>et al.</i> , 2002)
Explosión con amoníaco (AFEX)	180	1900	5	1/7	NH ₃ 25 % (w/w)	(Lynd <i>et al.</i> , 2002) (Sun y Cheng, 2002) (Hamelinck <i>et al.</i> , 2005)
Ozonólisis	25	Atmosférica	60	1/6	5.4 mg ozono/ minuto	(Sun y Cheng, 2002)
Peróxido alcalino	35	Atmosférica	180	5% (w/w)	2% H ₂ O ₂ (v/v), pH 11.5	Sun y Cheng, 2002)

Fuente: Los autores

Inhibidores

Los inhibidores generados en el proceso de deslignificación alcalina se cuantificaron en la fracción líquida obtenida, según el procedimiento descrito en los protocolos *NREL/TP-510-42623*, se analizaron mediante HPLC utilizando una columna tipo Biorad Aminex HPX-87P (Sluiter *et al.*, 2008b).

Fermentabilidad

Se determinó a través de muestras obtenidas a partir de fermentaciones etanólicas en configuración SSF (sacarificación y fermentación simultánea) empleando la enzima Accellerase 1500 de Genencor con una actividad enzimática de 52,88 FPU/mL y la levadura comercial Ethanol Red (*S. cerevisiae*) a las siguientes condiciones de proceso: temperatura 37 °C, concentración de levadura 2 g/L y agitación 150 rpm y porcentaje biomasa pretratada / líquido 10/90.

Cromatografía gaseosa

Para el análisis de compuestos del tipo esperado en esta forma de fermentación, el análisis cromatográfico es uno de los más comunes; para este existen varias configuraciones dependiendo del tipo de cromatografía que se use: cromatografía líquida (HPLC) y cromatografía gaseosa (GC), y el método de inyección. Para el desarrollo de este proyecto se utilizó la cromatografía gaseosa, para el análisis de compuestos provenientes de una fermentación es necesario usar un método de separación o aislamiento, pues la inyección directa se hace inviable debido a que los componentes presentes en el caldo de fermentación (azúcares, sales) son nocivos para la columna en la que se efectúa la separación.

Para realizar el muestreo se utilizó un dispositivo compuesto por una jeringa y una fibra especial. La parte más importante del dispositivo es la fibra, que consistió en una aguja de metal que protege a un tubo de sílice de diámetro muy pequeño, con un recubrimiento de un polímero líquido, el cual actúa como fase estacionaria. Durante el muestreo la fibra se expuso al espacio libre sobre la muestra o la muestra líquida, permitiendo la absorción cuantitativa de los analitos de acuerdo con su afinidad al recubrimiento de la fibra. Los analitos son luego desorbidos térmicamente en el puerto de inyección del cromatógrafo y son analizados inmediatamente en el equipo.

Precipitación de la lignina

El licor negro, subproducto del pretratamiento, se sometió a un proceso de acidificación hasta pH=2. A estas condiciones se forma un precipitado, el cual fue filtrado y secado, este subproducto se analizó en el detector infrarrojo, con el fin de confirmar que era la lignina retirada del bagazo de sorgo.

Optimización de la deslignificación alcalina

Una vez seleccionado el pretratamiento más adecuado para el bagazo de sorgo dulce, se determinaron las mejores condiciones de este proceso. Para esto se estableció un diseño experimental de superficie de respuesta del tipo central, compuesto con tres puntos centrales, la variable respuesta fue la fermentabilidad (g/L). El diseño tuvo en cuenta cuatro factores: temperatura (80-120) °C, tiempo (1-2) h, relación líquido sólido (15-20) g/mL y concentración de NaOH (1-2) % w/w, la matriz de experimentos se puede ver en la Tabla 2.

Tabla 2. Diseño de experimentos para el estudio de la deslignificación alcalina.

Exp.	T °C	T(h)	% NaOH	L/S
1	100,0	2,0	2,3	17,5
2	80,0	1,0	2,0	15,0
3	100,0	2,0	0,66	17,5
4	66,4	2,0	1,5	17,5
5	120,0	1,0	2,0	20,0
6	120,0	1,0	1,0	20,0
7	80,0	3,0	1,0	20,0
8	100,0	2,0	1,5	17,5
9	80,0	1,0	1,0	15
10	80,0	3,0	2,0	20,0
11	133,6	2,0	1,5	17,5
12	100,0	0,3	1,5	17,5
14	100,0	3,6	1,5	17,5
15	100,0	2,0	1,5	17,5
16	100,0	2,0	1,5	17,5
17	100,0	2,0	1,5	13,3
18	120,0	3,0	1,0	15,0
19	120,0	3,0	2,0	15,0
20	100,0	2,0	1,5	21,7

Fuente: Los autores

Resultados y discusión

Caracterización del material

Tal cual como se mencionó en la metodología para la determinación de los polisacáridos estructurales se utilizó el protocolo (Technical Report NREL/TP-510-42618 (Sluiter *et al.*, 2012). Los resultados obtenidos en la caracterización del bagazo de sorgo dulce se reportan en la Tabla 3, en la que se presenta la composición de celulosa, hemicelulosa y lignina obtenida experimentalmente. De esta tabla se puede decir que la composición del bagazo de sorgo dulce crudo obtenida experimentalmente es similar a valores reportados en la literatura por Barcelos, Maeda, Santa Anna y Pereira (2016); Chuck-Hernández *et al.* (2011) y Fenalce (2002).

Tabla 3. Composición del bagazo de sorgo dulce crudo

Componente	Porcentaje-Experimental (%w/w)	Reportado (%w/w)
Celulosa	29	34-44
Hemicelulosa	22,68	25-27
Lignina	24,68	18-20
Cenizas	1,36	-
Humedad	8,55	-
Extractivos	13,29	-
Otros	4	2

Fuente: (Chuck-Hernández *et al.*, 2011)

Otro aspecto que se debe considerar de la Tabla 3, es la composición de celulosa del bagazo de sorgo dulce; dicha composición convierte este residuo agroindustrial en un sustrato prometedor, que podría utilizarse en la producción de etanol de segunda generación.

Selección del pretratamiento

Se puede observar, en las Tablas 4 y 5, que la degradabilidad y fermentabilidad a etanol son mejores en los pretratamientos alcalinos (deslignificación alcalina, remojo con NH_3 y peróxido alcalino, respectivamente), este comportamiento se da principalmente debido a las reacciones de saponificación y de solvatación que se presentan en el bagazo de sorgo dulce cuando se somete a este tipo de tratamientos; lo que concuerda con lo reportado

en la literatura por Lynd *et al.* (2002), el cual sugiere que para sustratos de tipo residuos agroindustriales los mejores pretratamientos son de tipo alcalino. Con base en los resultados presentados en las Tablas 4 y 5 se escogió la deslignificación alcalina por ser el proceso en el cual se obtuvieron los valores más altos de degradabilidad y fermentabilidad, además sus reactivos son de fácil acceso, económicos y en comparación con la explosión de vapor el de menor gasto energético.

Tabla 4. Degradabilidad del sorgo dulce para diferentes pretratamientos.

Pretratamiento	Degradabilidad (g/L)	tiempo (h)
Ozonólisis	11,42	33
NH_3	13,81	33
NaOH	19,11	34
Ácido diluido	13,40	30
Explosión de vapor	11,37	30
Peróxido Alcalino	15,05	32
AFEX	14,70	43

Fuente: Los autores

Tabla 5. Fermentabilidad a etanol a partir de sorgo dulce para diferentes pretratamientos

Pretratamiento	Fermentabilidad (g/L)	tiempo (h)
Ozonólisis	3,43	6
NH_3	6,82	8
NaOH	8,57	9
Ácido diluida	2,83	7
Explosión de vapor	3,91	8
Peróxido Alcalino	5,65	22,5
AFEX	3,90	8

Fuente: Los autores

Optimización de la deslignificación alcalina

Los resultados obtenidos de degradabilidad y fermentabilidad para cada uno de los pretratamientos se presentan en la Tabla 4, Figura 1. En general, podría decirse que para todas las unidades experimentales se alcanzaron concentraciones mayores a 50 g/L de ART. Las mayores fermentabilidades se obtienen con las unidades experimentales números 5 y 19, donde se emplea una temperatura de 120 °C, tiempo de 1 h, una concentración de NaOH del 2% y una relación (L/S) de 20. Vale la pena resaltar que, para estas unidades experimentales, los

valores de degradabilidad alcanzaron también los mayores valores de ART y glucosa. Se debe resaltar que el tiempo tiene una gran importancia cuando se trabaja a bajas temperaturas, sin embargo, pierde importancia cuando se evalúan altas temperaturas. De hecho, el valor más

bajo de fermentabilidad en (g/L), se obtuvo a las menores condiciones de temperatura y tiempo (80 °C y 1 h). La tabla de ANOVA del análisis estadístico para el estudio de deslignificación alcalina se puede observar en la Tabla 6.

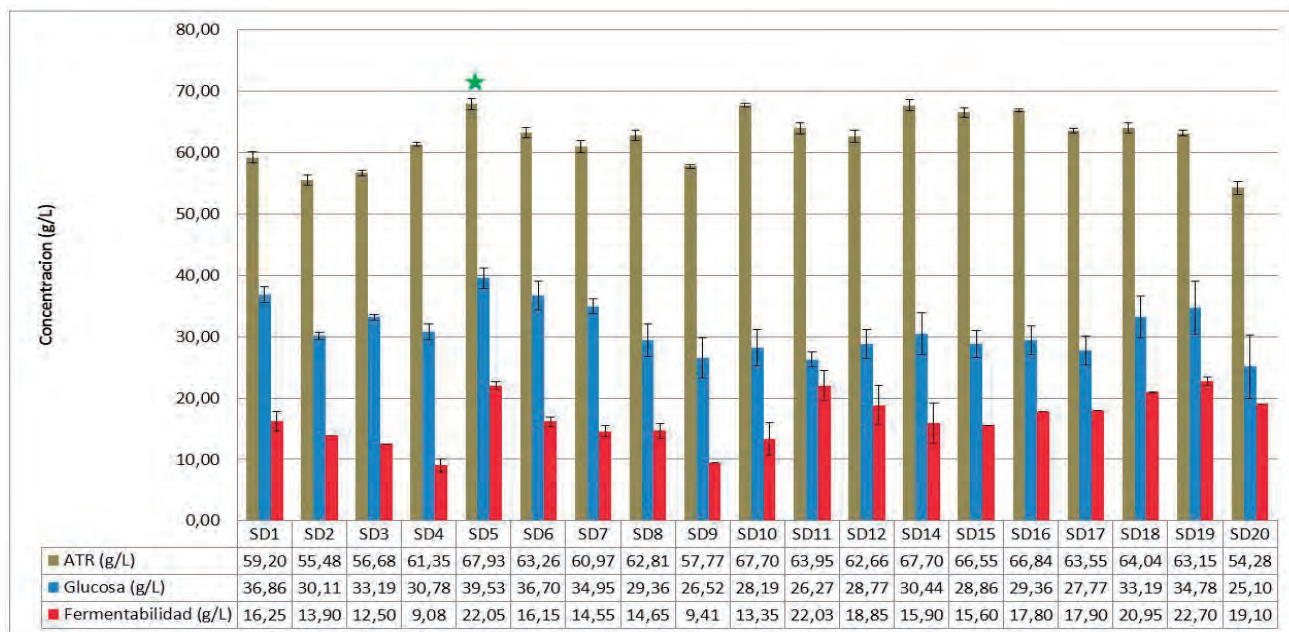


Figura 1. Estudio de deslignificación alcalina: resultados de fermentabilidad y degradabilidad del bagazo de sorgo dulce a diferentes condiciones de pretratamiento (SD: Muestra de Bagazo Sorgo Dulce)

Tabla 6. ANOVA para el proceso de deslignificación alcalina sobre el bagazo de sorgo

Source	Sum of Squares	F Value	p-value Prob > F
Model	198,40	50,73	0,0009
A-T	2,65	9,47	0,0370
B-t	4,35	15,58	0,0169
C-NaOH	21,78	77,96	0,0009
D-L/S	0,72	2,58	0,1837
AB	0,71	2,56	0,1851
AC	2,38	8,51	0,0434
AD	15,06	53,92	0,0018
BC	12,10	43,32	0,0028
BD	32,80	117,41	0,0004
CD	0,30	1,06	0,3612
A^2	2,16	7,72	0,9342
B^2	5,60	20,04	0,0110
C^2	2,23	7,99	0,0475
D^2	14,54	52,06	0,0020
Residual	1,12		
Lack of Fit	0,36	0,48	0,6756
Pure Error	0,75		

Fuente: Los autores

El análisis estadístico, para este diseño experimental, se realizó con un intervalo de confianza del 95 %. De la ANOVA se puede resaltar que el modelo cuadrático propuesto por el programa es significativo, así como que las variables temperatura, tiempo y concentración de soda caústica, mientras que la variable (L/S) no tiene una influencia estadística dentro de los rangos evaluados, esto se puede afirmar debido a que los valores del p-value son menores a 0,05. Es importante rescatar que el tiempo tiene una influencia negativa sobre la producción de etanol y es por esto por lo que se fijó el tiempo en su límite inferior del rango evaluado. Este modelo tiene un ajuste a los datos experimentales del 99,4% (R^2) y explica el 97,48% de las variaciones de los datos experimentales. Las superficies de respuesta y las condiciones de pretratamiento arrojadas por el modelo estadístico para obtener la mejor fermentabilidad dentro de los límites seleccionados son presentadas en las Figuras 2, 3 y la Tabla 7.

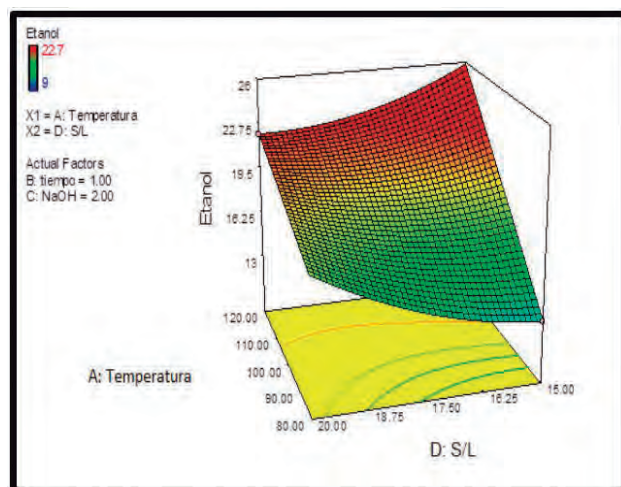


Figura 2. Superficie de respuesta fermentabilidad a etanol en función de la relación (L/S) y la temperatura

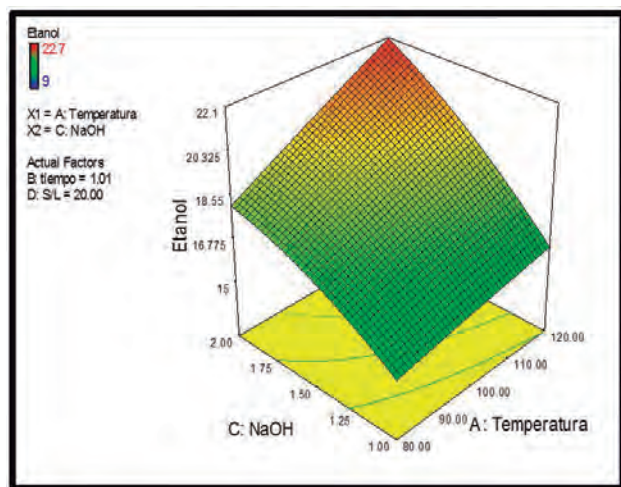


Figura 3. Superficie de respuesta fermentabilidad a etanol en función de la concentración de NaOH y la temperatura

Tabla 7. Condiciones de pretratamiento obtenidas (deslignificación alcalina) para el bagazo de sorgo dulce.

Condiciones Óptimas de Pretratamiento	
Temperatura (°C)	120
Tiempo (h)	1
% NaOH	2
Relación (S/L) (g/g)	20
Etanol (g/L)	22
Desirability	0,971

Fuente: Los autores

En la Figura 2 se puede observar, que a temperaturas bajas en el proceso de deslignificación alcalina no se favorece la producción de etanol empleando el bagazo de sorgo dulce. Esta se ve favorecida cuando se trabaja a valores altos de temperaturas y relaciones (L/S) bajas, es

decir que para una concentración fija de NaOH se tendría la mayor cantidad de etanol. Lo que coincide con la significancia de la interacción temperatura-L/S (AD) sobre el modelo.

En la Figura 3, se puede observar que a temperaturas bajas no se favorece la producción de etanol para el bagazo de sorgo dulce, la producción de etanol se favorece a valores altos de temperatura y concentraciones de soda cáustica, confirmándose nuevamente que la soda cáustica en exceso beneficia positivamente el proceso de deslignificación, como se confirma con la significancia de la interacción temperatura-concentración de soda caustica (AC). La concentración de NaOH parece ser una variable importante, pero esta no se ve afectada a altas temperaturas (120°C) debido a que las diferencias entre las diversas unidades experimentales no son significativas. De los resultados de los experimentos 5, 6, 18 y 19, se podría inferir que la temperatura es una de las variables más importantes para el proceso de deslignificación, lo que está acorde con Alvira *et al.* (2010); Asgher, Ahmad, y Iqbal (2013); Cao, Sun, Liu, Yin, y Wu (2012). Cao *et al.* (2012) reportan para el bagazo de sorgo dulce que los mejores resultados se encuentran cuando la deslignificación alcalina se realiza a 121°C y un tiempo de 60 min, Asgher *et al.* (2013) reportan condiciones de pretratamiento de 120 °C y tiempo de 30 min, por otro lado Alvira *et al.* (2010) indican que los mejores valores se obtienen en rangos de temperatura de 85 °C-150 °C y tiempos entre 3 y 13 h, que al compararse con los valores encontrados en este trabajo son similares 120 °C y 1 h. Para determinar los valores de los factores que permitan llegar a una mayor concentración de etanol, dentro de los rangos evaluados, fue empleada la función desirability del programa Design Expert. Las condiciones arrojadas por el software para la maximización de la variable respuesta se pueden observar en la Tabla 7.

La cinética de validación de las condiciones predichas por el modelo es presentada en la Figura 4. Para esta validación, los valores de la concentración de alcohol fueron determinados por cromatografía gaseosa, el último punto se tomó a las 26 h de fermentación y su concentración de etanol fue de 22,70 g/L, este resultado se acerca a los obtenidos por Asgher, Ahmad, y Iqbal, (2013) el cual trabajó con bagazo de caña de azúcar y alcanzó una concentración de etanol de 18,2 g/L a unas condiciones de temperatura de fermentación de 37 °C , pH de 5,5 y un tiempo de 72 h.

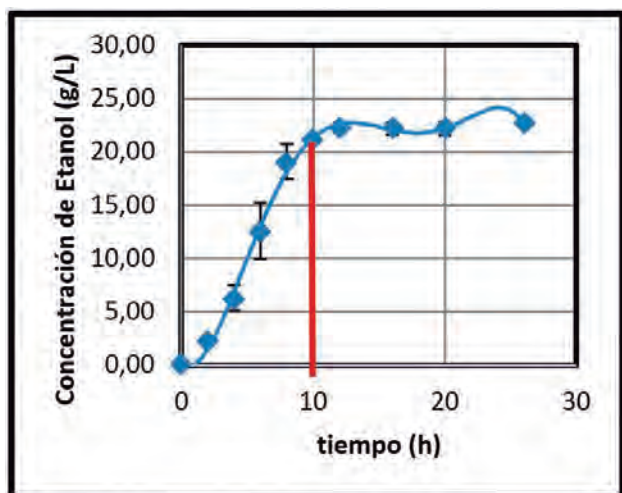


Figura 4. Cinética de validación del hidrolizado de bagazo de sorgo dulce a las condiciones predichas por el modelo estadístico (NaOH (2%), L/S (20), T (120 °C) y t (1 h))

El rendimiento obtenido en la fermentación con las condiciones predichas por el modelo fue de 0,203 g de etanol / g de biomasa pretratada seca. La productividad para esta validación fue de 0,87 g etanol/L h, pero si se observa la Figura 4 se ve claramente que el tiempo de fermentación podría disminuirse hasta las 10 h y así se aumentaría la productividad hasta 2,27 g etanol/ L h.

Efecto de la deslignificación alcalina sobre el bagazo de sorgo dulce

El bagazo de sorgo dulce pretratado se sometió de nuevo al proceso de caracterización con el fin de determinar el efecto del pretratamiento sobre el sustrato, en esta tabla también se muestran los subproductos que quedan presentes en el licor negro. Los resultados encontrados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Composición de la fracción sólida y líquida de los subproductos de pretratamiento del bagazo de sorgo dulce.

Fase Sólida	
Componente	Porcentaje (%w/w)
Celulosa	54,4
Hemicelulosa	24,8
Lignina	13,4
Humedad	7,4
Fase Líquida	
Componente	Concentración (mg/mL)
Glucosa	0,28
Pentosas	0,63
Ácido acético	1,44
Furfural	0,002

Fuente: Los autores

La formación de sustancias inhibitorias se pudo ver favorecida debido a las altas condiciones de temperatura del pretratamiento, ya que a condiciones extremas se presenta la degradación de la xilosa a furfural. Cabe resaltar que aunque hay presencia de inhibidores su concentración es baja, concordando así con Sun y Cheng (2005) los cuales reportan para pastos y paja de centeno.

Al comparar las Tablas 3 y 8 se puede decir que el contenido de lignina disminuyó en un 45,7 % y la celulosa aumentó en un 47%, debido a la acción del pretratamiento alcalino, concordando con lo reportado por Asgher Ahmad, y Iqbal, 2013, el cual obtuvo un porcentaje de deslignificación del 48,7% para el bagazo de caña de azúcar con una deslignificación alcalina empleando una concentración de NaOH al 4%. Los autores Alvira *et al.* (2010); Balat, Balat, y Öz (2008); Balat (2011); Barcelos *et al.* (2016); Cao *et al.* (2012); Khalil, Abdelhafez y Amer (2015); Mosier *et al.* (2002) y Reis *et al.* (2016) reportan valores similares de remoción de lignina con el pretratamiento alcalino sobre diferentes materiales lignocelulósicos.

La degradación de celulosa y hemicelulosa en el pretratamiento alcalino es mínima, esto se puede aseverar al observar la concentración de glucosa y pentosas en el licor negro (fracción líquida) que se obtiene después del pretratamiento alcalino.

La caracterización realizada al licor negro muestra que a las condiciones a las cuales tuvo lugar la deslignificación alcalina se presenta una baja formación de compuestos inhibidores de la actividad enzimática (ácido acético y furfural), la capacidad fermentativa del microorganismo, por lo tanto, la producción de azúcares reductores como la posterior transformación de estos azúcares a etanol durante la fermentación no se vio afectada significativamente.

Subproductos de la deslignificación

Del espectro IR de la Figura 5, se puede confirmar la presencia de los grupos funcionales como el OH⁻ (banda ancha entre 2800 y 3400 cm⁻¹) los grupos aromáticos con varias sustituciones (banda fuerte a 600 cm⁻¹ y bandas múltiples a 1600 cm⁻¹), el enlace carbono-oxígeno (aproximadamente a 1100 cm⁻¹), así como las bandas de los enlaces carbono-hidrógeno (la más fuerte a 1400 cm⁻¹). La no presencia del grupo carbonilo a 1600 cm⁻¹ indica la ausencia de azúcares provenientes de la hemicelulosa en la muestra (Martínez, Jiménez, Ramírez, y Rojo, 2007). El hombro a 2900 cm⁻¹ corresponde al grupo CH₂ guayacilo-siringilo (Raiskila, 2007).



Figura 5. Espectro IR del sólido precipitado de la fracción líquida de la deslignificación alcalina
Fuente: Los autores

La huella digital de cualquier espectro infrarrojo se analiza entre los 600 cm^{-1} y los 1800 cm^{-1} , los resultados obtenidos se compararon con los reportados por Rana, Langenfeld-Heyser, Finkeldey, y Polle (2010). Este autor realizó un estudio de IR de lignina proveniente de madera, aislada por diferentes métodos. Si se compara el IR obtenido de la muestra podemos inferir que los picos presentes a 1596, 1505 y 1270 cm^{-1} corresponden a compuestos presentes en la lignina. A 1200 cm^{-1} se presenta un pico que representa el guaracil característico de la lignina (Derkacheva, y Sukhov, 2008).

Los grupos hidroxilo característicos de la lignina, aparecen a 1338 cm^{-1} , es posible que este pico presente superposición entre los carboxilos propios de la lignina y el C=C de los aromáticos (Raikila, 2007). Los grupos aromáticos polisustituidos son característicos de 600 cm^{-1} . Sin embargo, puede solaparse con un pico a 1100 cm^{-1} correspondiente a los enlaces éter de los CH; no obstante, la ausencia del pico a 1600 cm^{-1} (grupo carbonilo) permite descartar esta posibilidad. Derkacheva y Sukhov (2008) reportan que la lignina recuperada del pretratamiento alcalino de los materiales lignocelulósicos presenta un incremento en los picos de 1490 y 1188 cm^{-1} , cuando es analizada, los cuales son muy marcados en la Figura 5.

Con base en los análisis anteriores se puede decir que el espectro generado por el material removido en el tratamiento alcalino corresponde a la fracción de lignina del material evaluado, la cual presenta una alta composición de fracciones guaráclicas de lignina. Adicionalmente, es importante resaltar que el método empleado en la recuperación de lignina permite obtenerla exenta de carbohidratos, lo que es de gran importancia si se piensa en una futura aplicación para la misma.

Los análisis realizados al agua residual de la deslignificación, confirman la remoción de lignina del bagazo de sorgo dulce. Es importante resaltar que debido a las características de la deslignificación y a las propiedades de la hemicelulosa y la celulosa, no es posible obtener la lignina pura con una simple precipitación, si se piensa en aplicaciones futuras.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en la evaluación de los diferentes tipos de pretratamientos en el sustrato bagazo de sorgo dulce, permiten decir que el alcalino con NaOH es el mejor proceso para dicho sustrato.

El proceso de deslignificación alcalina triplica la producción de etanol una vez son identificadas las mejores condiciones para esta etapa (NaOH 2%, 1 hora, 121°C y L: S de 20).

La producción de etanol se favorece a condiciones altas de temperatura y concentración de soda cáustica.

Es posible disminuir el tiempo de fermentación con las condiciones establecidas de pretratamiento. Esta disminución va de 26 horas a 10 horas, lo que permitió aumentar la productividad en un 260 %.

Con la realización de la deslignificación alcalina sobre el bagazo de sorgo dulce se disminuye el contenido de lignina en un 45,7 % y se aumenta el contenido de celulosa en un 47%, permitiendo con esto que las enzimas y la levadura tengan un mejor acceso a la celulosa y la glucosa respectivamente.

La cantidad de etanol obtenida en este trabajo permite concluir que el rendimiento del bagazo de sorgo dulce a etanol es de 114 L Etanol / Ton de Sorgo dulce seco pretratado con NaOH y fermentación en configuración SSF en 26 horas.

Referencias

- Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M. J., y Negro, M. J. (2010). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. *Bioresource technology*, 101(13), 4851-4861. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.093>

- Asgher, M., Ahmad, Z., y Iqbal, H. M. N. (2013). Alkali and enzymatic delignification of sugarcane bagasse to expose cellulose polymers for saccharification and bio-ethanol production. *Industrial Crops and Products*, 44, 488-495. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.10.005>
- Balat, M. (2011). Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: a review. *Energy conversion and management*, 52(2), 858-875. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.013>
- Balat, M., Balat, H., y Öz, C. (2008). Progress in bioethanol processing. *Progress in energy and combustion science*, 34(5), 551-573. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.11.001>
- Ballesteros, I., Ballesteros, M., Manzanares, P., Negro, M. J., Oliva, J. M., y Sáez, F. (2008). Dilute sulfuric acid pretreatment of cardoon for ethanol production. *Biochemical Engineering Journal*, 42(1), 84-91. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.06.001>
- Barcelos, C. A., Maeda, R. N., Santa Anna, L. M. M., y Pereira, N. (2016). Sweet sorghum as a whole-crop feedstock for ethanol production. *Biomass and Bioenergy*, 94, 46-56. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.08.012>
- Cao, W., Sun, C., Liu, R., Yin, R., y Wu, X. (2012). Comparison of the effects of five pretreatment methods on enhancing the enzymatic digestibility and ethanol production from sweet sorghum bagasse. *Bioresource Technology*, 111, 215-221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.034>
- Chuck-Hernández, C., Pérez-Carrillo, E., Heredia-Olea, E., y Serna-Saldívar, S. O. (2011). Sorgo como un cultivo multifacético para la producción de bioetanol en México: tecnologías, avances y áreas de oportunidad. *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(3), 529-549.
- Derkacheva, O., y Sukhov, D. (2008, May). Investigation of lignins by FTIR spectroscopy. *Macromolecular Symposia* (Vol. 265, No. 1, pp. 61-68). WILEY-VCH Verlag. doi: <https://doi.org/10.1002/masy.200850507>
- Fenalce. (2002). Matriz sector cereales – cultivo del sorgo en Colombia.
- García, A. (2003). Economía de Colombia. Retrieved from <http://pwp.supercabletv.net.co/garcru/colombia/Colombia/economia.html>
- Hamelinck, C. N., Van Hooijdonk, G., y Faaij, A. P. (2005). Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle-and long-term. *Biomass and bioenergy*, 28(4), 384-410. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.09.002>
- Kafarov, V. (2010). Memorias CIBSCOL. (A. González, Ed.) (Primera). Bucaramanga.
- Khalil, S. R. A., Abdelhafez, A. A., y Amer, E. A. M. (2015). Evaluation of bioethanol production from juice and bagasse of some sweet sorghum varieties. *Annals of Agricultural Sciences*, 2050(2), 317-324. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aos.2015.10.005>
- Kumar, R., y Wyman, C. E. (2009). Effects of cellulase and xylanase enzymes on the deconstruction of solids from pretreatment of poplar by leading technologies. *Biotechnology progress*, 25(2), 302-314. doi: <https://doi.org/10.1002/btpr.102>
- Lynd, L. R., Weimer, P. J., Van Zyl, W. H., y Pretorius, I. S. (2002). Microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology. *Microbiology and molecular biology reviews*, 66(3), 506-577. doi: <https://doi.org/10.1128/MMBR.66.3.506-577.2002>
- Martínez, J. D., Jiménez, J. V., Ramírez, W., y Rojo, P. G. (2007). Modificación de resinas fenólicas con lignina procedente del pulpeo alcalino del bagazo de caña. *Scientia et technica*, 1(36), 683-688.
- Miller, G. L. (1959). Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. *Analytical Chemistry*, 31(III), 426-428. doi: <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, C. E. N. A.-2008. (2010). Informe de rendición de cuentas. Gestión 2002 - 2010. Recuperado de <http://www.minagricultura.gov>

- [co/archivos/informe_rendicion_cuentas_2002-2010.pdf](#)
- Morales, R. (2007). Estudio del sorgo dulce como alternativa de cultivo energético en la producción de energías alternas renovables. CERTA.
- Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y. Y., Holtzapple, M., y Ladisch, M. (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*, 96(6), 673-686. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.025>
- Raiskila, S. (2007). FTIR Spectroscopic Prediction of Klason and Acid Soluble Lignin Variation in Norway Spruce Cutting Clones, 41(January).
- Rana, R., Langenfeld-Heyser, R., Finkeldey, R., y Polle, A. (2010). FTIR spectroscopy, chemical and histochemical characterisation of wood and lignin of five tropical timber wood species of the family of Dipterocarpaceae. *Wood Science and Technology*, 44(2), 225-242. doi: <https://doi.org/10.1007/s00226-009-0281-2>
- Reis, A. L. S., Damilano, E. D., Menezes, R. S. C., y de Moraes, M. A. (2016). Second-generation ethanol from sugarcane and sweet sorghum bagasses using the yeast *Dekkera bruxellensis*. *Industrial Crops and Products*, 92, 255-262. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.08.007>
- Rincón, S. (2009). Generación energética a partir de biomasa residual colombiana. Grupo de Investigación en Biomasa y Optimización Térmica de Procesos (BIOT). Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Saha, B. C., y Cotta, M. A. (2006). Ethanol production from alkaline peroxide pretreated enzymatically saccharified wheat straw. *Biotechnology Progress*, 22(2), 449-453. doi: <https://doi.org/10.1021/bp050310r>
- Sánchez Riaño, (2010). Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos. *Revista Tumbaga*, 5, 61-91.
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., y Templeton, D. (2008a). Determination of ash in biomass: Laboratory Analytical Procedure (LAP). Nrel/Tp-510-42622.
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., y Templeton, D. (2008b). Determination of Sugars, Byproducts, and Degradation Products in Liquid Fraction Process Samples.
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., y Crocker, D. (2012). Analytical procedure - Determination of structural carbohydrates and lignin in Biomass. Laboratory Analytical Procedure (LAP), [NREL/TP-510-42618](#).
- Sun, Y. y Cheng, J., 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review, *Bioresour. Technol*, 83, 11. doi: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00212-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00212-7)
- Sun, Y., y Cheng, J. J. (2005). Dilute acid pretreatment of rye straw and bermudagrass for ethanol production. *Bioresource Technology*, 96(14), 1599-1606. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.12.022>
- Tejada, L., Tejada, C., Villabona, A., Tarón, A., Alvear, M., Castillo, C., Henao, D., Marimón, W., Madariaga, N. (2010). Producción de etanol a partir de la fermentación alcohólica de jarabes glucosados derivados de cáscaras de naranja y pi-a. *Revista Educación En Ingeniería*, (10), 120-125.
- Toquero, C., y Bolado, S. (2014). Effect of four pretreatments on enzymatic hydrolysis and ethanol fermentation of wheat straw. Influence of inhibitors and washing. *Bioresource Technology*, 157, 68-76. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.090>

Remoción de colorantes reactivos empleando el hongo *Bjerkandera adusta*¹

Removing reactive dyes using fungus *Bjerkandera adusta*¹

Recibido: 23- 9 - 2016 Aceptado: 19-11-2017

John Fredy Holguín Múnera²
Andrey Esneider Escobar Oquendo³
Rocío del Pilar Monroy Rodríguez⁴
Gloria Margely Muñoz Marín⁵

¹ Este artículo es producto de una investigación terminada y los resultados fueron tomados de la ejecución del Proyecto: "Fortalecimiento del Sistema de Investigación Aplicada del CTGI. mediante el proyecto: "Tratamiento de Aguas Residuales provenientes de los procesos de teñido con colorantes reactivos y colorantes directos del sector textil". El proyecto se inició el 04-01 de 2015 y finalizó 30-12-2015 y fue financiado por SENNOVA dentro de la línea Investigación Aplicada.

² Colombiano MSc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro Textil y de Gestión Industrial, Medellín, Colombia. Grupo de Investigación Aplicada a la Industria Textil y Química (GIAITEQ), * Autor de correspondencia: johnfh23@gmail.com

³ Colombiano MSc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro Textil y de Gestión Industrial (SENA), Medellín, Colombia. Grupo de Investigación Aplicada a la Industria Textil y Química (GIAITEQ). e-mail: escobar.andrey@gmail.com.

⁴ Colombiana Ing. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro Textil y de Gestión Industrial (SENA), Medellín, Colombia. Grupo de Investigación Aplicada a la Industria Textil y Química (GIAITEQ). e-mail: rpmrodriguez@misena.edu.co.

⁵ Colombiana Tecnóloga. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro Textil y de Gestión Industrial (SENA), Medellín, Colombia. Grupo de Investigación Aplicada a la Industria Textil y Química (GIAITEQ). e-mail: geli1062008@gmail.com

Resumen

La manufactura de textiles para Colombia representa una importante actividad económica, con una participación en exportaciones del 6% y genera ventas de productos no tradicionales alrededor de un 13%. Esta industria utiliza alrededor del 15% del total del agua empleada para labores industriales, desechando alrededor de 170.000 toneladas de aguas residuales por año en Colombia. Entre los impactos ambientales que genera el sector, se destaca la contaminación sobre aguas causada en las etapas de tintura; esta se da principalmente debido a que los colorantes empleados tienen rangos de fijación entre el 65% y el 80%. En la etapa inicial de esta investigación, se determinaron los parámetros de caracterización del agua según el decreto 0631 de 2015 a los efluentes provenientes del proceso de teñido; se tuvieron en cuenta parámetros como: alcalinidad, dureza, DBO, DQO, conductividad, sólidos y oxígeno disuelto. Se realizaron revisiones bibliográficas con el fin de establecer el potencial de diferentes tipos de microorganismos, los cuales abarcan desde bacterias aerobias, anaerobias y hongos de pudrición blanca. En la ejecución de esta investigación se trabajará con el hongo de la pudrición blanca *B. adusta*, debido a que es capaz de degradar sustratos complejos a través de un sistema enzimático específico para cada familia de colorantes. Posteriormente se realizó la selección del medio de cultivo que más promoviera el proceso de degradación de los colorantes reactivos; los medios evaluados fueron el Kirk, Zouari-Mechichi y el Park-Robinson. De los tres, el que tuvo mejores resultados fue el medio Park Robinson. Por último, se evaluó la remoción de colorantes en aguas residuales sintéticas. Las remociones obtenidas para la familia de colorantes reactivos de la familia Bezaktiv (colorantes vinilsulfónicos) fueron: 30% para el Bezaktiv azul V-2B 133, para el Bezaktiv amarillo V-5 GL 91% y para el Bezaktiv rojo V-5B 74 %.

Palabras clave: Colorantes reactivos; hongos ligninolíticos; degradación.

Abstract

The manufacture of textiles in Colombia represents an important economic activity, with a participation in 6% of exports and generates sales of non-traditional products around 13%. This industry uses about 15% of the total water used for industrial work, discarding about 170,000 tons of wastewater per year in Colombia. The contamination caused in the dyeing stages is highlighted, since the dyes used have a fixing range between 68 and 80%. Initially, in the development of this project, the physicochemical and microbiological composition of the effluents from the dyeing process of the textile sector was determined, for which parameters such as alkalinity, hardness, BOD, COD, conductivity, solids and dissolved oxygen were taken into account. At the same time, the removal of dyes from synthetic wastewater was evaluated, using the white rot fungus *Bjerkandera adusta*. The removals obtained for the family of reactive dyes from the Bezaktiv family (vinylsulfonic dyes) were 30% for the blue V-2B 133 dye Bezaktiv, for the yellow dye V-5 GL was 91% for the red dye Bezaktiv V-5B was 74% using for the three media the Park-Robinson medium.

Keywords: dyeing reactive; hongos ligninolíticos; degradación.

Introducción

La manufactura de textiles para Colombia ha sido a lo largo de la historia una importante actividad económica, en el año 2014 representó el 9,2% de la industria manufacturera. Por su parte, el EBITDA (*Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation, and Amortization*), se incrementó en un 12,4% en el año 2014 frente al 2013, al pasar de \$279.322 millones a \$313.955 millones, lo cual indica una mayor eficiencia de los ingresos por ventas. (Superintendencia de Sociedades, 2015)

Dicha industria utiliza alrededor del 15% del total de agua empleada para labores industriales. La obtención del textil con sus diversas tonalidades y acabados genera aproximadamente 170.000 toneladas de agua residual por año en Colombia. Estas aguas contienen ceras, grasas, pectinas propias de la fibra, encolantes adicionados en las etapas de hilado y tejido, auxiliares y colorantes de las etapas de preparación y teñido del sustrato (De Jager, Sheldon y Edwards, 2014). En Colombia la resolución 0631 del 17 de marzo de 2015, regula la descarga de efluentes de la industria textil sobre los cuerpos de agua (Ministerio de

Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015), sin embargo, en esta no se hace mención específica a los valores exigidos de descarga de colorantes. Vale la pena mencionar que en la resolución 2016 del 26 de octubre del año 2012 expedida por el Área Metropolitana de Medellín, se hace mención y se indican las concentraciones de color permitidas (50-75 unidades Pt-Co) en los efluentes provenientes del sector textil (Área Metropolitana, 2012).

Los colorantes no fijados en la etapa de tintura, representan un factor importante en la contaminación del agua, ya que en el proceso de teñido con colorantes reactivos se fija entre el 60-80% (Kumar, Raut, Bandyopadhyay y Raut, 2016; Ruiz, 2011). La presencia de colorantes en el agua reduce el paso de la luz solar, lo que puede generar desequilibrio en los ecosistemas acuáticos y provocar desagradables efectos visuales en el paisajismo natural (Osorio, Vidal, y Quintero, 2011).

Para reducir los problemas mencionados anteriormente, se han propuesto alternativas de tratamiento que involucran procesos biológicos los cuales han mostrado un gran potencial debido a que son eficientes, amigables con el medio ambiente y atractivos económicamente (Anastasi *et al.*, 2010). Diferentes estudios muestran la capacidad que tienen los hongos de la pudrición blanca de la madera debido a que poseen un sistema oxidativo que exhibe un alto grado de especificidad, permitiéndoles degradar un amplio número de compuestos recalcitrantes además de la lignina (Anastasi *et al.*, 2010; Barrasa *et al.*, 2014). Actualmente se utilizan sistemas aerobios y anaerobios, con hongos y bacterias para la decoloración y mineralización de los colorantes presentes en dichas aguas (Kumar *et al.*, 2016; Senthilkumar, Perumalsamy y Prabhu, 2014). Al aplicarse este tipo de tratamientos bióticos los contaminantes generalmente son metabolizados por los microorganismos mediante reacciones bioquímicas de tipo oxido-reducción, aunque también pueden realizar reacciones de hidroxilación, hidrólisis, deshalogenación y desalquilación (Kumar *et al.*, 2016).

Los hongos pueden degradar compuestos orgánicos complejos por medio de la producción de enzimas de tipo ligninolíticas extracelulares, las más reportadas son: lacasas, manganoso-peroxidasas y peroxidasas (Singh, Singh, y Singh, 2015; Tuomela y Hatakka, 2011); se ha confirmado que muchas especies de hongos como *Pleurotus ostreatus*, *Pichia sp.*, *Penicillium sp.* y *Candida tropicalis*, realizan una adsorción de colorantes sobre su superficie pero no una degradación química (Kumar *et al.*, 2016; Taha, Adetutu, Shahsavari, Smith, y Ball, 2014). Entre los diferentes tipos de hongos, *Phanerochaete chrysosporium* y *Bjerkandera*

adusta son microorganismos eficaces para realizar procesos de degradación de colorantes, ambos han sido reportados ampliamente como modelos en la remediación de efluentes de textiles debido a que pueden remover más del 75% de los colorantes reactivos de los efluentes (Knapp, Newby, y Reece, 1995; Osorio *et al.*, 2011). Por otro lado *P. chrysosporium* posee la capacidad de degradar compuestos complejos como el almidón, la celulosa, la pectina, la lignina, que son sustancias que se encuentran en los efluentes de la industria textil (Podgornik, Grgić, y Perdih, 1999; Kirk *et al.*, 1990). Por lo tanto, para el sector textil sigue siendo una necesidad plantear alternativas y soluciones ambientales que propendan a controlar la carga contaminante de sus vertimientos, es por esto que en este trabajo se realizó una evaluación del potencial que tiene el hongo *Bjerkandera adusta* para remover colorantes reactivos, debido a que es capaz de degradar sustratos complejos a través de un sistema enzimático específico para cada familia de colorante, según lo reportan (Anastasi *et al.*, 2010; Eichlerova, Homolka, y Nerud, 2007; Heinfling, Martínez, Martínez, Bergbauer, y Szewzyk, 1998; Tuomela y Hatakka, 2011; Valentin *et al.*, 2007).

Esta evaluación a futuro podrá contribuir con la disminución del impacto ambiental causado sobre las fuentes hídricas de la región por los efluentes textiles.

Materiales y métodos

Colorantes

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron los colorantes reactivos Bezaktiv azul V-2B 133 ($\lambda = 600$ nm), Bezaktiv amarillo V-5 GL ($\lambda = 410$ nm), Bezaktiv rojo V-5B ($\lambda = 510$ nm), pertenecientes a la familia de colorantes vinilsulfónicos, estos fueron suministrados por la empresa CHT BEZEMA, la cual nos indicó que son empleados ampliamente por las industrias del sector textil en la ciudad de Medellín, Colombia.

Métodos analíticos

• Cuantificación de crecimiento y degradación de color en medio sólido

Se tomaron mediciones de los diámetros de halos de degradación y crecimiento cada 12 horas con una regla graduada. Este procedimiento se siguió hasta la completa colonización o decoloración de la caja, los datos se obtuvieron por triplicado para cada colorante.

• Determinación de biomasa

Se empleó la técnica de peso seco, se tomaron muestras de 4 mL las cuales se filtraron y secaron a 105°C hasta obtener peso constante.

• Determinación del grado de decoloración

Cada muestra se centrifugó a 10000 rpm durante 10 minutos, en el sobrenadante se leyó absorbancia en un espectrofotómetro, según la longitud característica de cada colorante; la concentración del colorante se obtuvo mediante una curva de calibración concentración de colorante (g/L) *vs* absorbancia elaborada previamente. Los datos se obtuvieron por triplicado para cada colorante.

• Parámetros fisicoquímicos determinados a las muestras de aguas residuales

Para realizar la elección de parámetros a determinar en los efluentes, se tuvo en cuenta lo reportado por Kumar *et al.* (2016) y la resolución 0631 del 17 de marzo de 2015, estos mencionan parámetros como: oxígeno disuelto (OD), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), sólidos totales (ST), sólidos suspendidos totales (SST), pH, temperatura, alcalinidad, conductividad y salinidad. La determinación de estos parámetros se realizó según los protocolos del IDEAM TP 0436, TP0088, TP0080, TP0211, TP0084, TP 0082.

• Microorganismos

Se realizaron revisiones bibliográficas con el fin de establecer el potencial de diferentes tipos de microorganismos, los cuales abarcan desde bacterias aerobias, anaerobias y hongos de pudrición blanca (Knapp, 1995) estos últimos presentan una gran capacidad de degradación de colorantes de tipo Azo (Ghodake, Jadhav, Dawkar, y Govindwar, 2009), trifenilmetanos, colorantes poliméricos sulfonados (Joshi, Iyengar, Singh, y Garg, 2008), antraquinonas (Kabbout y Taha, 2014). Estas propiedades y las descritas anteriormente en la introducción, fueron las que tomamos como parámetros de selección para trabajar con el hongo *Bjerkandera adusta*, este fue donado por el grupo de bioprocesos, adscrito al departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Antioquia. Para la activación de las cepas fue empleado el medio Kirk modificado (Kirk *et al.*, 1990), el cual consta (g L⁻¹): glucosa 10, peptona, tiamina 2, cloruro de calcio 0,1, trazas de sales 100 mL L⁻¹ a un pH de 4,5. El medio de mantenimiento de la cepa fue el Agar-Papa- Dextrosa (PDA) de la casa Merck®, para ambos medios la temperatura de incubación fue de 30 °C.

• Selección de medios de degradación:

Se evaluaron tres medios, los cuales han sido empleados para la degradación de colorantes por diferentes autores: medio Kirk (Cardona, Osorio, y Quintero, 2009; Kirk *et al.*, 1990; Osorio *et al.*, 2011), medio Zouari (Zouari-Mechichi *et al.*, 2006) isolated from decayed acacia wood (from Northwest of Tunisia, y el medio Park-Robinson (Robinson, McMullan, Marchant, y Nigam, 2001). El efecto que tiene el medio sobre la degradación de los tres colorantes se realizó sobre medio sólido. La evaluación consistió en evaluar cada colorante en cada medio de cultivo a una concentración de 125 ppm, según Cardona *et al.* (2009) a concentraciones mayores el hongo se puede inhibir, cada caja fue inoculada con un disco de 7 mm de micelio del hongo *B. adusta*, este micelio se ubicó en el centro de la caja Petri. También se evaluó la presencia de aserrín en el medio como agente elicitador debido a que las enzimas ligninasas no son constitutivas y requieren ser inducidas por el medio de crecimiento (Kirk *et al.*, 1990; Robinson *et al.*, 2001). Todo esto se realizó en condiciones de esterilidad, asepsia y por triplicado.

• Inóculo de degradación

El inóculo para cada Erlenmeyer consistió en 4 círculos de 7 mm de diámetro, tomados de una caja de Petri incubada a 30°C por un tiempo de 7 días.

• Evaluación de degradación en medio líquido sintético, sistema batch

Una vez seleccionado el medio de cultivo, se determinó la cinética de degradación de los tres colorantes por el hongo *B. adusta* en medio líquido. Los montajes cultivo se realizaron en un Erlenmeyer de 250 mL con un volumen de trabajo de 200 mL, a una temperatura de 30°C, una agitación de 150 rpm, un pH de 4,5 y se tomó como concentración de colorante 125 ppm; este valor ha sido reportado por diferentes autores como una concentración inhibitoria para el hongo (Cardona *et al.*, 2009; Osorio *et al.*, 2011; Senthilkumar *et al.*, 2014; Taha *et al.*, 2014); se tomaron muestras cada dos días, para cada una se determinó la concentración de colorante por medio de la técnica de grado de decoloración mencionada anteriormente.

Resultados y discusión

Parámetros fisicoquímicos determinados a las muestras de aguas residuales

La caracterización se realizó sobre muestras de efluente del proceso textil obtenido en el laboratorio de tintorería del CTGI. Los parámetros fisicoquímicos se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos del efluente que sale de los procesos de teñido Selección del medio de cultivo.

Caracterización Efluente Textil	
Alcalinidad (ppm)	744
O.D. (ppm)	3,51
pH	11,78
Temperatura (°C)	37
Conductividad	45.700
%O.D.	47
Salinidad	29,73
ST (ppm)	22.808
SST (ppm)	207
DBO (mgO ₂ /L)	574
DQO (mgO ₂ /L)	2048

Fuente: Los Autores

Selección del medio de cultivo

Se evaluaron los medios Park-Robinson, Kirk, y Zouari-Mechichi. En la Figura 1. se presentan los resultados de las evaluaciones de los medios de cultivo y su comportamiento en presencia o ausencia del elicitador (aserrín 2 gL⁻¹). Se observó que para el segundo día la degradación de colorante era aproximadamente de un 80% en el medio Park-Robinson, esto se calculó con el diámetro de degradación medido. La degradación total de color se presentó para al tercer día de cultivo en las cajas con el medio Park-Robinson más agente elicitador. Las cajas que no tenían agente elicitador se tardaron 7 días para empezar a mostrar actividad degradadora. La presencia del agente elicitador favorece la degradación del colorante al estimular, de manera natural, la producción de enzimas. Este comportamiento está de acuerdo con lo reportado por Barrasa *et al.*, 2014; Hatvani y Mécs, 2002; Osorio *et al.*, 2011, los cuales afirman que este tipo de agentes inducen la producción de enzimas extracelulares.

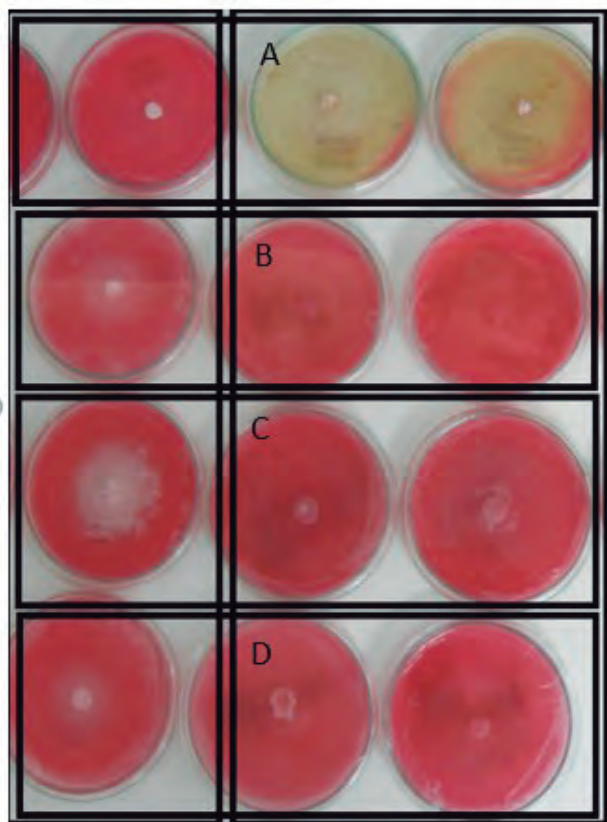


Figura 1. Degradación del colorante Bezaktiv rojo V-5B por parte del hongo *B. adusta* en el segundo día de cultivo.

A: Park- Robinson, con aserrín, B: Kirk con aserrín, C: Zouaori-Mechichi con aserrín.

De la Figura 1 se puede inferir que el medio que favorece la degradación de colorante por el hongo *B. adusta* es el medio Park-Robinson. Al analizar los componentes del medio, encontramos sustancias que juegan un papel importante en la degradación de colorantes y que han sido discutidas por algunos autores:

- **Glucosa:** Kumar *et al* (2016) recomiendan concentraciones de glucosa superiores a 5 g/L, ya que la glucosa es la fuente de carbono que sustenta el microorganismo mientras el proceso de degradación, esto debido a que el colorante no es consumido por el hongo en el proceso de degradación. Senthilkumar *et al.*(2014) reportan que un incremento en la concentración de glucosa genera aumento en el crecimiento de la biomasa y la decoloración incrementa en un 0,3%

- **Nitrógeno:** elemento esencial para el crecimiento micelial y la producción de enzimas, las cuales son las responsables de la ruptura de los enlaces azo. La velocidad de decoloración de las moléculas de colorantes depende de la velocidad de rotura de los enlaces azo (-N=N-) en la molécula de colorante. Con el aumento de la concentración

de nitrógeno de 0,01% a 0,5%, la tasa de decoloración aumenta en un 40% (Senthilkumar *et al.*, 2014). La composición del medio Park-Robinson se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Medio de cultivo Park-Robinson empleado para la suplementación del medio de degradación

Medio	Componentes	Concentración [gL ⁻¹]
Park-Robinson	Glucosa	0,7
	KH ₂ PO ₄	0,2
	NH ₄ NO ₃	0,1
	MgSO ₄ *7H ₂ O	0,5
	Agar-Agar	15
	Aserrín	2

Fuente: Los autores

Con el medio seleccionado Park-Robinson se evaluó la degradación de los colorantes Bezaktiv azul V-2B 133 y Bezaktiv amarillo V-5 GL a una concentración inicial de 125 ppm en medio sólido. La degradación de estos colorantes tuvo un comportamiento muy similar al encontrado para el colorante Bezaktiv rojo V-5B; sin embargo, la degradación tardó un día más (tercer día) al estar en presencia del agente elicitor.

La Figura 2 presenta la degradación de los colorantes Bezaktiv azul V-2B 133 y Bezaktiv amarillo V-5 GL al tercer día de cultivo y en presencia de aserrín.

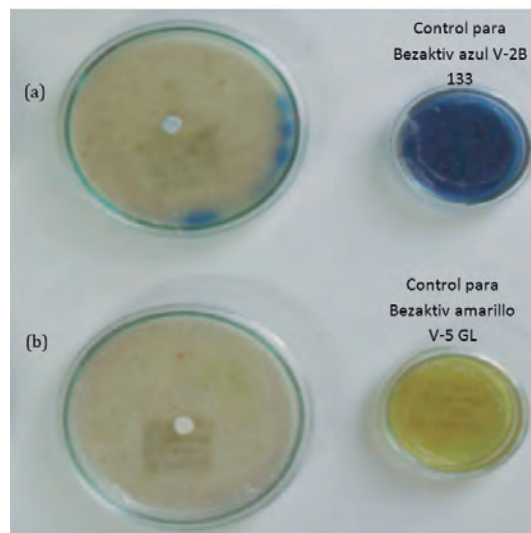


Figura 2. Día 3 de la degradación de los colorantes Bezaktiv azul V-2B 133 (a), Bezaktiv amarillo V-5 GL (b) en medio Park-Robinson con aserrín.

Evaluación de degradación en medio líquido sintético Sistema Batch

• Colorante Bezaktiv amarillo V-5GL

Durante la evaluación de degradación de colorante por el hongo *B. adusta*, pudimos evidenciar la capacidad de adaptación y de degradación que tendría el microorganismo frente al colorante presente en los efluentes. Como resultado de esta evaluación se encontró que el microorganismo fue capaz de crecer y degradar el colorante a concentraciones de 125 ppm.

De la Figura 3 se puede afirmar que el porcentaje máximo de degradación de colorante se da después de transcurridos 18 días de tratamiento y su valor fue del 92%. Anastasi *et al.* (2010) reportan valores de degradación del 90 % para efluentes sintéticos de colorantes reactivos amarillos y degradados con *B. adusta*; Eichlerova *et al.* (2007) reportan valores de degradación del 76% en un tiempo de 28 días cuando se utiliza el hongo *B. adusta*.

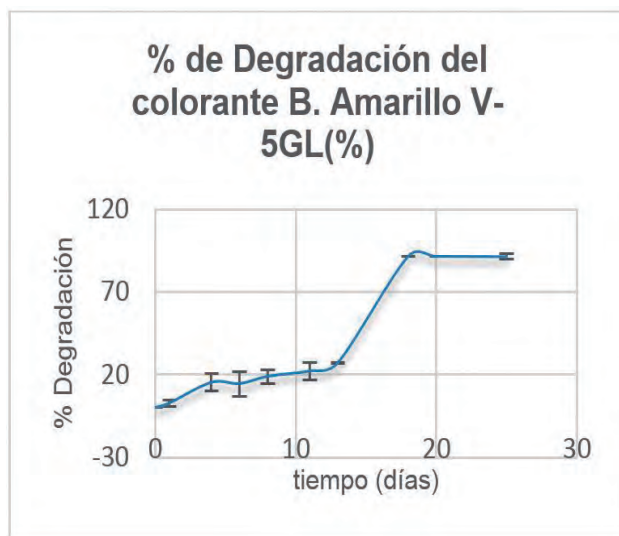


Figura 3. Cinética de degradación del colorante Bezaktiv amarillo V-5 GL, con el hongo *B. adusta*, sobre el medio Park-Robinson.

• Colorante Bezaktiv azul V-2B-133

Como resultado de esta evaluación se puede afirmar que el microorganismo fue capaz de crecer y degradar el colorante a una concentración inicial de 125 ppm.

La Figura 4, se puede observar que el porcentaje de degradación de colorante máximo ocurre después de transcurridos 13 días de tratamiento y el porcentaje máximo de degradación fue del 30%.

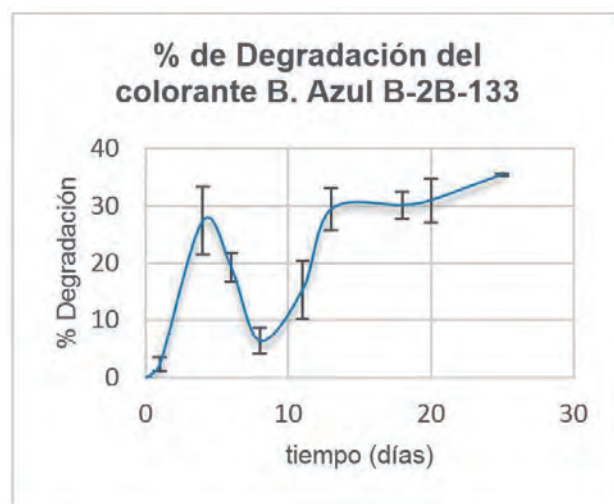


Figura 4. Cinética de degradación del colorante Bezaktiv azul V-2B 133, con el hongo *B. adusta*, sobre el medio Park-Robinson.

En la Figura 4 revela que en el día 4 se presenta un pico máximo de degradación y en el día 8 un valor mínimo de degradación, durante estos mismos días se evidenció en el hongo una coloración azul, la cual posteriormente desapareció. Varios autores han tratado de explicar esto por medio de dos fenómenos: el primero es la absorción de colorante sobre la biomasa, en este el colorante reacciona químicamente con los grupos funcionales OH⁻ y C=O de la quitina presente en la pared celular de los hongos (Tuomela y Hatakka, 2011), la otra fracción de colorante que no reacciona con la quitina es liberada nuevamente al medio (Kabbout y Taha, 2014; Robinson *et al.*, 2001). El otro fenómeno se debe principalmente a la tendencia que tienen los colorantes reactivos por adsorberse sobre la superficie del microorganismo, Osorio *et al.* (2011) argumentan que el grado de adsorción del colorante sobre la biomasa del hongo es un mecanismo importante principalmente en presencia de sales, donde puede alcanzar hasta un 36% de la remoción del colorante.

• Colorante Bezaktiv rojo V-5B

Esta evaluación se realiza para la cepa *B. adusta*, se puede decir que el microorganismo fue capaz de degradar el colorante cuando la concentración inicial de colorante fue de 130 ppm.

En la Figura 5, se puede estimar que el porcentaje de degradación de colorante máximo se da después de transcurridos 18 días de tratamiento y el porcentaje máximo de degradación fue del 75%.

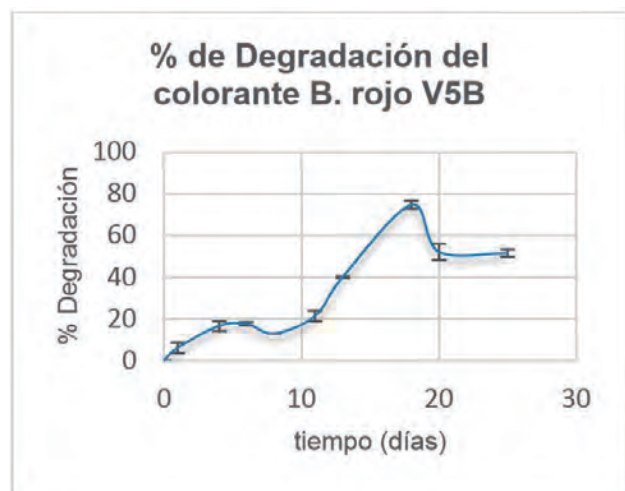


Figura 5. Cinética de degradación del colorante Bezaktiv rojo V-5B con el hongo *B. adusta*, sobre el medio Park-Robinson.

El tiempo de adaptación en el efluente fue de 8 días. El cambio de pendiente que se da en la fase exponencial (entre los días 13 y 18) ha sido reportado como un cambio en el mecanismo de degradación que tiene el microorganismo, esto se debe principalmente a la producción de otro grupo de enzimas que realizarían el mismo efecto de degradación sobre el colorante según lo reportan Ghodake *et al.*, (2009), Barrasa *et al.*, (2014).

Conclusiones

El hongo *Bjerkandera adusta*, tiene la capacidad de decolorar efluentes de la industria textil, en este caso particular; colorantes reactivos de tipo vinilsulfónicos. De los tres colorantes evaluados el que presentó mayor porcentaje de degradación fue el amarillo Bezaktiv V-5GL con un porcentaje del 91%.

Teniendo en cuenta que las concentraciones a las cuales el microorganismo presentó crecimiento y capacidad degradadora se encuentran muy por debajo de las concentraciones que puede tener un efluente textil real, se recomienda utilizar un proceso combinado (tratamiento físico o químico) en primer lugar; de manera que se disminuya la concentración de colorante hasta valores cercanos a las 150 ppm y posteriormente un proceso biotecnológico.

El proceso de adsorción del colorante en la superficie del hongo puede aumentar el porcentaje de degradación en un 25%, esto se puede ver favorecido por la presencia de sales inorgánicas.

Bibliografía

- Anastasi, A., Spina, F., Prigione, V., Tigini, V., Giansanti, P., y Varese, G. (2010). Scale-up of a bioprocess for textile wastewater treatment using *Bjerkandera adusta*. *Bioresource Technology*, 101(9), 3067–3075. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.067>
- Area Metropolitana Valle de Aburrá. (2012). Resolución metropolitana 002016 de octubre 26 de 2012. Medellín, Colombia. Recuperado de http://www.metropol.gov.co/RecursoHidrico/dlNormatividad/Resolucion_002016_octubre_26_2012.pdfS_DE_CALIDAD.pdf
- Barrasa, J. M., Blanco, M. N., Esteve-Raventós, F., Altés, A., Checa, J., Martínez, A. T., & Ruiz-Dueñas, F. J. (2014). Wood and humus decay strategies by white-rot basidiomycetes correlate with two different dye decolorization and enzyme secretion patterns on agar plates. *Fungal genetics and biology*, 72, 106-114. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2014.03.007>
- Cardona, M., Osorio, J., y Quintero, J. (2009). Degradación de colorantes industriales con hongos ligninolíticos. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 48, 27–37.
- De Jager, D., Sheldon, M. S., y Edwards, W. (2014). Colour removal from textile wastewater using a pilot-scale dual-stage MBR and subsequent RO system. *Separation and Purification Technology*, 135, 135-144. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.08.008>
- Eichlerova, I., Homolka, L., y Nerud, F. (2007). Decolorization of high concentrations of synthetic dyes by the white rot fungus *Bjerkandera adusta* strain CCBAS 232. *Dyes and Pigments*, 75(1), 38-44. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.05.008>
- Ghodake, G., Jadhav, S., Dawkar, V., y Govindwar, S. (2009). Biodegradation of diazo dye Direct brown MR by *Acinetobacter calcoaceticus* NCIM 2890. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63(4), 433-439. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.12.002>

- Hatvani, N., y Mécs, I. (2002). Effect of the nutrient composition on dye decolorisation and extracellular enzyme production by *Lentinus edodes* on solid medium. *Enzyme and microbial technology*, 30(3), 381-386. doi: [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(01\)00512-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(01)00512-9)
- Heinfling, A., Martínez, M. J., Martínez, A. T., Bergbauer, M., y Szewzyk, U. (1998). Purification and characterization of peroxidases from the dye-decolorizing fungus *Bjerkandera adusta*. *FEMS Microbiology Letters*, 165(1), 43-50. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1998.tb13125.x>
- Joshi, T., Iyengar, L., Singh, K., y Garg, S. (2008). Isolation, identification and application of novel bacterial consortium TJ-1 for the decolourization of structurally different azo dyes. *Bioresource technology*, 99(15), 7115-7121. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.074>
- Kabbout, R., y Taha, S. (2014). Biodecolorization of textile dye effluent by biosorption on fungal biomass materials. *Physics Procedia*, 55, 437-444. doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.07.063>
- Kirk, T., Tien, M., Kersten, P. J., Kalyanaraman, B., Hammel, K. E., & Farrell, R. L. (1990). Lignin peroxidase from fungi: *Phanerochaete chrysosporium*. In *Methods in Enzymology* (Vol. 188, pp. 159-171). [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(90\)88029-A](https://doi.org/10.1016/0076-6879(90)88029-A)
- Knapp, J. S., Newby, P. S., & Reece, L. P. (1995). Decolorization of dyes by wood-rotting basidiomycete fungi. *Enzyme and Microbial Technology*, 17(7), 664-668. doi: [https://doi.org/10.1016/0141-0229\(94\)00112-5](https://doi.org/10.1016/0141-0229(94)00112-5)
- Kumar, S., Raut, S., Bandyopadhyay, P., y Raut, S. (2016). Fungal decolouration and degradation of azo dyes: a review. *Fungal Biology Reviews*, 30(3), 112-133. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2016.06.003>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Minambiente presenta nueva Norma de Vertimientos que permitirá mejorar la calidad agua del país*. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=1700:minambiente-presenta-nueva-norma-de-vertimientos-que-permitira-mejorar-la-calidad-agua-del-pais>
- Osorio, J., Vidal, A., y Quintero, J. C. (2011). Decoloración de aguas residuales textiles utilizando el hongo ligninolítico anamorfo R1 de *Bjerkandera* sp. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 57, 85-93.
- Podgornik, H., Grgić, I., y Perdih, A. (1999). Decolorization rate of dyes using lignin peroxidases of *Phanerochaete chrysosporium*. *Chemosphere*, 38(6), 1353-1359. doi: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(98\)00537-2](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(98)00537-2)
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., y Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: A critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, 77(3), 247-255. doi: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00080-8)
- Ruiz, S. E. (2011). *Evaluación de la remoción del colorante INDIGO utilizado en empresas dedicadas a la producción de telas tipo DENIM empleando a *Pleurotus ostreatus* como modelo biológico* (Tesis de Maestría). Universidad de la Sabana, Bogotá, Colombia.
- Senthilkumar, S., Perumalsamy, M., y Prabhu, H. J. (2014). Decolourization potential of white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* on synthetic dye bath effluent containing Amido black 10B. *Journal of Saudi Chemical Society*, 18(6), 845-853. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2011.10.010>
- Singh, R. L., Singh, P. K., y Singh, R. P. (2015). International Biodeterioration & Biodegradation Enzymatic decolorization and degradation of azo dyes e A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 104, 21-31. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.04.027>

- Superintendencia de Sociedades. (2015). *Desempeño del sector textil-confección 2012-2014*. Recuperado de <http://www.supersociedades.gov.co/noticias/Documents/2015/Septiembre/EE1-Sector Textil- 2015 VIII 14.pdf>
- Taha, M., Adetutu, E. M., Shahsavari, E., Smith, A. T., y Ball, A. S. (2014). Azo and anthraquinone dye mixture decolourization at elevated temperature and concentration by a newly isolated thermophilic fungus, *Thermomucor indicae-seudaticae*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 415-423. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.01.015>
- Tuomela, M., y Hatakka, A. (2011). Oxidative Fungal Enzymes for Bioremediation. *Comprehensive Biotechnology*, 6(Segunda edición), 183-196. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00370-6>
- Valentin, L., Lu-Chau, T. A., Lopez, C., Feijoo, G., Moreira, M. T., & Lema, J. M. (2007). Biodegradation of dibenzothiophene, fluoranthene, pyrene and chrysene in a soil slurry reactor by the white-rot fungus *Bjerkandera* sp. BOS55. *Process Biochemistry*, 42(4), 641-648. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.11.011>
- Zouari-Mechichi, H., Mechichi, T., Dhoub, A., Sayadi, S., Martínez, A. T., & Martínez, M. J. (2006). Laccase purification and characterization from *Trametes troglis* isolated in Tunisia: decolorization of textile dyes by the purified enzyme. *Enzyme and Microbial Technology*, 39(1), 141-148. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.11.027>

Aprovechamiento de subproductos de origen carbonatado en la industria del cemento y el concreto: Una revisión para evaluar su aplicación en el departamento del Huila

Use of carbonate rock mining by-products in the cement and concrete industry to assess its application in the Department of Huila: A review

Recibido: 15-05-2017 Aceptado: 14-11-2017

Karen Viviana Fabara Hernández¹
Carlos Alberto Flórez Arias²
Hanny Juliet Callejas Reyes³
Paola Cristina Cajas Daza⁴

¹ Colombiana. MSc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Tecnoparque-nodo Neiva. Grupo de Investigación para el Desarrollo Social y Tecnológico. e-mail: kfabara@sena.edu.co.

² Colombiano. MSc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA Tecnoparque-nodo Neiva. e-mail: cfloreza@sena.edu.co.

³ Colombiana. MSc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA Tecnoparque-nodo Neiva. e-mail: hcallejas@sena.edu.co.

⁴ Colombiana. PhD. Universidad de Brasilia. e-mail: patolacajas@gmail.com.

Resumen

El departamento del Huila se ha convertido en un foco llamativo para desarrollar la actividad minera por su diversidad de minerales y estado virgen de los yacimientos. Para el departamento surge como primicia articular subproductos mineros con el sector de la construcción, proyectándose como un renglón fuerte en el crecimiento económico de la región. Este artículo presenta una revisión de la literatura acerca de las principales características y tendencias en la utilización de subproductos derivados de la minería de origen carbonatado en aplicaciones de construcción, especialmente en la producción de cemento y concreto Portland, reduciendo el impacto sobre el medio ambiente, costo económico y obteniendo propiedades mecánicas favorables.

Palabras clave: Subproductos mineros; rocas carbonatadas; construcción; dolomita; calcita; concreto portland; cemento portland.

Abstract

The Department of Huila has become an eye-catching focus in the development of mining activities due to its diversity of minerals and untapped deposits. It comes up for the Department, the pressing need for a joint between mining by-products and the building industry which will certainly play an important role in the region's economic growth. This article shows a literature review about the main characteristics and trends in the use of carbonate rock mining by-products in building applications, specially in

the production of Portland cement and concrete, where negative environment impacts and economic costs are minimized and beneficial mechanical properties are obtained.

Keywords: Mining by-products; carbonate rocks; building; dolomite; calcite; portland concrete; portland cement.

Introducción

El aprovechamiento de subproductos industriales es una materia objeto de investigación en aras de fomentar que los procesos industriales sean sostenibles y los impactos ambientales asociados disminuyan en el marco de una creciente población mundial. El uso más común de los subproductos industriales es en obras civiles y en materiales de construcción, seguidos por aplicaciones en agricultura y horticultura (Castells, 2012; Fraccascia, Giannoccaro y Albino, 2018; Matthey, Robayo, Torres, Ramos y Delvasto, 2015). Generalmente se requiere un conocimiento detallado de su composición, propiedades físicas y sus variaciones en calidad, así como las especificaciones del material virgen que busca ser reemplazado. En aplicaciones de obras civiles, los subproductos tienen aplicación como agregados en diferentes estructuras: (e.g. carreteras, edificios, barreras de ruido, rellenos, diques, entre otros), uso en pavimentos (García, Quereda, Mallol, Soriano, y Vicent, 2011), subcapas de vertederos, mampostería (Isa *et al.*, 2016), estabilizadores de suelos (Swart, y van Schalkwyk, 2001) entre otros (Fuentes, Fragozo, y Vizcaino, 2015; Serrano, Pérez, Torrado y Hernández, 2017; Wiemes, Pawlowsky y Mymrin, 2017). En materiales para la construcción, el uso de cenizas volátiles, barro rojo, yeso derivado de procesos de desulfuración (FGD Gypsum), particulado de gases de escape, escorias de níquel y cobre, arena de fundición como aditivos y aglutinantes en materiales de construcción como cemento Portland, concreto y asfalto. Residuos de ferrocromo son utilizados como material de aislamiento en estructuras (Sorvari y Wahlström, 2014).

En la tecnología de la construcción actual hay una tendencia muy clara e irreversible hacia el aprovechamiento de subproductos provenientes de la minería. Esta tendencia está asociada con la importancia que ha adquirido la creciente preocupación ambiental y los beneficios económicos implícitos en su uso.

Se han llevado a cabo investigaciones para encontrar formas de aprovechar los subproductos de la extracción del mármol (Bilgin *et al.*, 2012; Hebhoub, Aoun, Belachia,

Houari, y Ghorbel, 2011; Pappu, Saxena, y Asolekar, 2007; Saboya, Xavier, y Alexandre, 2007). En países como Italia, España, Turquía, Irán y Egipto, líderes en la industria del mármol a nivel mundial, el aprovechamiento de residuos producto de las acciones de minería es imperativo dado el gran volumen de producción que manejan y el alto impacto ambiental derivado. La generación de residuos desde la extracción hasta la obtención del producto terminado es del 50% del mineral extraído (Aliabdo, Elmoaty y Auda, 2014). Debido a la presión sobre el aprovechamiento de dichos subproductos, se han desarrollado a la vez investigaciones del uso de la roca dolomita para la producción de nuevos materiales sintéticos para su uso en la industria de los plásticos, producción de medicamentos, industria biomédica, ladrillos cerámicos refractarios para hornos, tratamientos de aguas efluentes de la industria minera, entre otros (Altiner y Yildirim, 2017; Aziz, y Smith, 1996; Iglesias, García-Romero, y Acosta, 2014; Niesyt y Psiuk, 2017; Rabah y Ewais, 2009; Romero, Flores, y Arévalo, 2010; Sadek 2012; Sadik, Moudden, El Bouari, y El Amrani, 2016).

En Colombia, se han desarrollado diversos estudios en torno a la utilización de subproductos de la construcción (Bernal *et al.* 2009; Correa, 2005; Delgado y Medina, 2003; Monsalve, Bolaños, Lopez y Toro, 2014; Robayo-Salazar, Mejía de Gutiérrez, y Mulford-Carvajal, 2016). En particular, fue realizada una caracterización física y mecánica a agregados reciclados provenientes de la construcción y se concluyó que es posible utilizarlos realizando una molienda fina para reducir el mortero adherido y los problemas de absorción de agua debido a porosidades (Matthey, Salazar, Silva, Álvarez y Delvasto, 2014). Posteriormente fue realizada una evaluación sobre la sustitución de arena en paneles de ferrocemento por agregado fino reciclado producto de trituración de escombros de concreto, concluyendo que es posible la sustitución hasta en un 100% generando incremento en la resistencia a la compresión de dichos paneles hasta 7,3% (Matthey *et al.*, 2015). La revisión presentada en este trabajo evidencia los potenciales usos de subproductos de origen calcáreo de la industria minera en el departamento del Huila.

Generalidades de la extracción minera del departamento del Huila

La producción minera del departamento, proviene principalmente de los municipios de Tesalia, Palermo, Santa María, Neiva e Iquira en oro y plata, de los municipios de Agrado, Gigante, Palermo y Tesalia en materiales de construcción, en arcillas de Pitalito, y en roca fosfórica

de los municipios de Aipe y Tesalia. De acuerdo con la Agencia Nacional de Minería del Ministerio de Minas y Energía existen 229 títulos mineros vigentes en la región, que representan un área de 68508,21 Ha, correspondiente al 3,66% de superposición en el departamento. En general, las actividades de la extracción de minerales no metálicos predominan sobre la extracción de minerales metálicos (Castillo, 2011), en donde la roca fosfórica, las rocas carbonatadas como la caliza, el mármol y la barita conforman un eslabón importante en la economía del departamento, hecho que puede dar lugar a beneficios técnicos, económicos y ecológicos. (Catastro Minero Colombiano, 2017; Vargas, 2015).

En la actualidad, la agrominería es la actividad principal para el uso de dichos materiales como insumo en el proceso de producción de mezclas, calces, carbonatos de calcio y demás productos para el mejoramiento de suelos del sector agrícola (Ordóñez y Bahamón, 2010). En particular, la explotación de caliza y mármol se da principalmente en la zona noroccidental del departamento en locaciones rurales de los municipios de Palermo, Teruel, Santa María y Neiva. Debido a que la producción de las actividades mineras depende de factores como el comportamiento climático y condiciones en el suministro de explosivos, no es fácil obtener un estimado de producción anual de material calcáreo de la región. Según un informe técnico y de gestión de la secretaría técnica de la cadena agrominera (Castillo, 2011), la producción promedio de materiales calcáreos por unidad de explotación es de 10 toneladas al día. Tomando en cuenta 38 títulos mineros registrados para el año 2011, la producción anual total se estima en 109440 toneladas. Tomando en cuenta un porcentaje de recuperación del 50%, la cantidad de subproductos de origen calcáreo generados al año en la actualidad se estima sea igual o mayor a 54720 toneladas al año.

Características de las rocas carbonatadas

Las rocas carbonatadas están compuestas por dos minerales principales: calcita o dolomita y un mineral no carbonatado entre fases. La calcita es la forma más estable del carbonato de calcio (CaCO_3) y es un mineral polimorfo (la misma fórmula química con diferentes estructuras cristalinas) (Dietrich, 1999). La dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) es un mineral metaestable, los cristales inicialmente formados pueden ser reemplazados luego por fases más estables vía disolución o re-precipitación. Dado que las fases de la dolomita evolucionan constantemente, una capa de dolomita puede retener o crear porosidad y permeabilidad

a mayor profundidad y en entornos de mayor temperatura que la caliza (Warren, 2000).

Cuando el carbonato contiene un mayor contenido de calcita es llamado piedra caliza; en contraste, un carbonato con mayor contenido de dolomita es llamado roca dolomita. No es usual encontrar una mezcla con contenidos similares de calcita y dolomita en un carbonato, siempre hay una tendencia a la formación del uno o del otro (Warren, 2000).

Adicional al mineral de dolomita, la roca dolomita está compuesta por algunas impurezas asociadas tales como SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 . Al someter la roca dolomita a diferentes temperaturas se pueden obtener variadas composiciones que pueden ser utilizadas en diversas aplicaciones; Darweesh (2001), demostró el desarrollo de ladrillos de construcción a partir de la mezcla de roca dolomita (40%) y arcilla silíceas (60%) que al ser sometida a una temperatura de 750°C permitió que se presentaran interacciones térmicas que facilitaron la obtención de un material para construcción de alta resistencia mecánica.

Producción y consumo de cemento Portland en Colombia

El concreto Portland es el material estructural más destacado en la construcción civil, su descubrimiento constituye una verdadera revolución debido al conjunto de propiedades que presenta tanto en su moldeabilidad como en su hidráulica. Es comúnmente usado en construcción civil y no se encuentra en la naturaleza, puesto que es en realidad el resultado de una mezcla de varios materiales, tales como cemento Portland, arena, piedra y agua. Las propiedades del concreto están determinadas por la calidad y los porcentajes de los componentes usados, pudiendo ser modificados dependiendo de la aplicación deseada (Abo-El-Enein, Hashem, Amin y Sayed, 2016; Martin, 2005).

Particularmente, el cemento Portland está compuesto por clinker y adiciones minerales como el yeso controlador del tiempo de fraguado y algunas otras como *fly ash* y escorias siderúrgicas. El clinker se obtiene al mezclar e incinerar conjuntamente material calcáreo y arcilla a temperaturas superiores a los 1350°C, el proceso es descrito en la Figura 1. Esta mezcla es atractiva porque en presencia de agua se forma una reacción química, esto hace que el sistema se torne viscoso y seguidamente se endurezca, adquiriendo de ese modo una alta resistencia mecánica. Otra ventaja que presenta es que su obtención se da a partir de materias primas abundantes en la naturaleza. Este tipo de cemento permite obtener tiempos menores de

endurecimiento, mejora la tasa de hidratación y aumenta la resistencia de los compuestos del cemento en estados iniciales (Ingram y Daugherty, 1992).

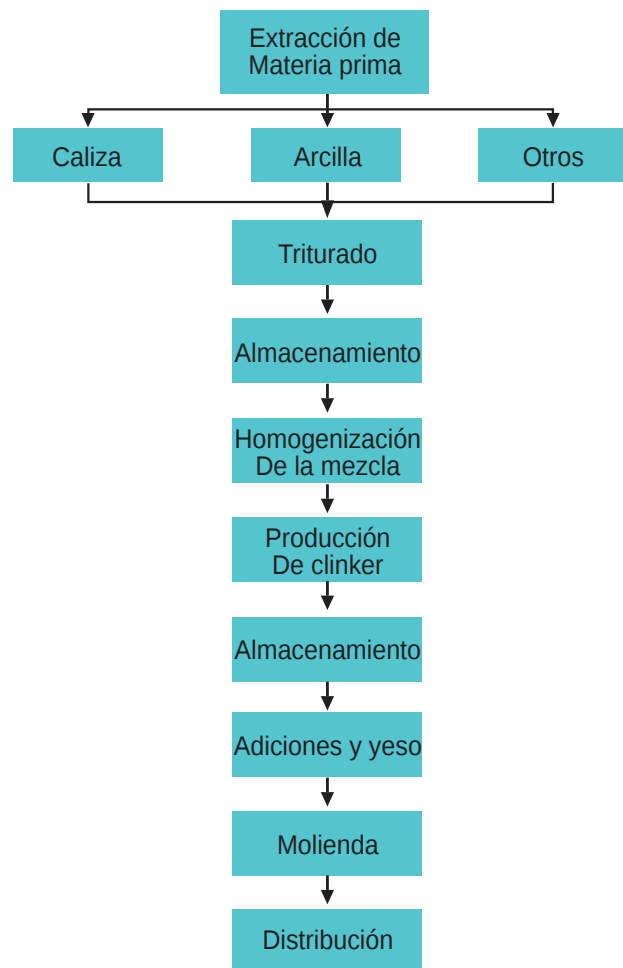


Figura 1. Proceso esquemático de la producción de cemento portland
Fuente: Los autores

Colombia cuenta con seis tipos de cemento producido por siete empresas en 19 plantas, su mercado presenta un comportamiento inestable, con producciones por encima del millón de toneladas en los últimos 3 años. El mes de agosto de 2017 se presentó en Colombia una producción de 1034,8 miles de toneladas mientras que se despacharon 1032,9 miles de toneladas al mercado nacional (DANE, 2017), la diferencia se explica con exportaciones y en menor medida con reservas, el departamento con más despachos de cemento es Antioquia con 17,4%, seguido de Bogotá con 12,1%, Cundinamarca y Valle del Cauca con 8,8% y 8,4% respectivamente. El departamento del Huila recibe el 2,4% de los despachos nacionales correspondiente a 24789,6 toneladas.

Uso de rocas carbonatadas en la producción de cemento y concreto Portland

Diversos autores han realizado investigaciones sobre los efectos del uso de rocas carbonatadas como agregados en la producción del concreto Portland. No siempre resulta fácil disponer de fuentes de agregados aptos para el concreto, sin embargo, estudios coinciden en señalar las ventajas de usar la dolomita. Revelan que la dolomita posee una mayor absorción, densidad, módulo de elasticidad, similar resistencia y desgaste respecto a agregados graníticos sobre los cuales existen abundantes experiencias (Alexander, y Mindess, 2010; Cabrera, 2017; Mangin, 2015; Milanesi *et al.*, 2010). En relación con la piedra caliza, el efecto de la dolomita aporta propiedades físicas y mecánicas significativas al concreto, viabilizando la producción de cemento Portland (Mikhailova, Yakovlev, Maeva y Senkov, 2013).

También se ha estudiado el reemplazo de la caliza por un material calcáreo dolomítico como agregado alternativo en la producción de cemento Portland. Se encontró que los sistemas que contienen un 25% en peso de este agregado presentaron mayores resistencias a la compresión. Adicionalmente se obtuvieron mejoras en la densificación de la estructura y un posible aumento de la resistencia temprana sin efectos perjudiciales en las propiedades a largo plazo del concreto (Mikhailova, *et al* 2013).

Otras investigaciones reportan que la dolomita como agregado en el cemento puede presentar expansión como resultado de la posible reactividad de las dolomitas en un entorno húmedo. Este fenómeno fue confirmado tras la observación de determinados daños a las estructuras de hormigón y por algunas pruebas de laboratorio. Los procesos de dedolomitización están relacionados con los agregados de dolomita y piedra caliza dolomítica. El mecanismo y las reacciones de la dedolomitización son conocidos y ampliamente descritos. Como resultado de la reacción de dedolomitización, la dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) puede convertirse en calcita (CaCO_3) o magnesita (MgCO_3) y la calcificación de los agregados puede esperarse al contacto con soluciones con altas relaciones de $\text{Ca}_2^+ / \text{Mg}_2^+$ que fluyen libremente por los poros (Dębska, 2015; Smith, 1999). Adicionalmente, los agregados calcáreos dolomíticos son altamente reactivos cuando están en contacto con los cationes alcalinos presentes en los cementos, efecto que podría causar degradación del producto final, siendo necesario realizar estudios previos de las cantidades a ser usadas (Rocha, Da Luz y Cheriaf, 2002).

Debido a la tendencia de crecimiento del transporte por carretera también ha aumentado la utilización de materiales locales y alternativos para la construcción de vías. Se han realizado estudios para determinar la aplicabilidad del agregado de roca caliza en las mezclas de asfalto y se ha determinado que puede ser usado exitosamente en concreto asfáltico de alto módulo para pavimento de caminos (Haritonovs, Tihonovs y Zaumanis, 2016; Sybilski, Bankowski y Krajewski, 2010). En el caso del pavimento de concreto, los aspectos que definen su desempeño están dados por la rugosidad, textura superficial y ausencia de grietas. Muchas de estas propiedades son atribuidas a las características de los agregados (Souza y Calo, 2008).

Por otro lado, la producción de clinker como principal componente del cemento Portland es un proceso intenso, una sustitución parcial de clinker por adiciones minerales representa considerables ahorros energéticos y disminución de la emisión de CO_2 proveniente de industrias de cemento y concreto. Adicionalmente, tiene sentido económico reducir la energía utilizada en la producción de cemento y concreto y al mismo tiempo, hacer un uso seguro de lo que puede ser clasificado como subproducto de la minería. (Hartshorn, Sharp y Swamy, 1999; Li, Du y Huo, 2007; Piechówka-Mielnik y Giergiczny, 2011; Tsivilis, Batis, Chaniotakis, Grigoriadis y Theodossis, 2000).

Algunos estudios muestran que las propiedades de desempeño de un cemento Portland para generar una mezcla terciaria al adicionar caliza (hasta 20%) y escoria siderúrgica de alto horno (hasta 30%), aumenta hasta un 35% la resistencia a compresión en relación con un mortero de referencia y a su vez presenta menores coeficientes de succión capilar, confirmando la acción tanto de carácter físico como químico de los materiales de adición. También mencionaron que la contracción de secado disminuye con el aumento del componente calcáreo (Aquino, Inoue, Miura, Mizuta, y Okamoto, 2010; Díaz, Izquierdo, Mejía de Gutiérrez y Gordillo, 2013).

El reemplazo de arena natural por arenas trituradas de origen carbonatado también ha sido evaluado. Para el concreto en estado endurecido, las experiencias realizadas se basan en hormigones elaborados con arenas trituradas calcítica, dolomítica, granítica y cuarítica, y como referencia se utilizó una arena natural. Todas las arenas presentaban igual módulo de finura, y los hormigones se diseñaron con iguales proporciones. Los resultados establecen que la relación entre esta resistencia y el módulo de elasticidad a los 28 días es mayor para agregados de dolomita y calcita (Cabrera, Ortega, y Traversa, 2010). Paralelamente, se ha encontrado en la producción de concreto, que el

reemplazo de la arena con polvo de mármol a razón del 15% al 75%, incrementa la resistencia a la compresión en un 20% a 26% debido a la presencia de carbonato de calcio (CaCO_3) y óxido de silicio (SiO_2) en la estructura química del mármol, desarrollando un mejor rendimiento mecánico en comparación con el concreto en el cual el polvo de mármol reemplaza al cemento, que de hecho disminuye la resistencia a la compresión y trabajabilidad de la mezcla en porcentajes superiores al 20% (Aliabdo *et al.*, 2014; Arel, 2016; Sadek, El-Attar y Ali, 2016; Sutcu, Alptekin, Erdogmus, Er y Gencil, 2015).

Finalmente, se han desarrollado estudios sobre mezclas binarias de sustitución parcial del cemento Portland. Estos son llamados cementos de adición que corresponden a los cementos con sostenibilidad ambiental. La sustitución del cemento por adiciones minerales inertes (calizas), o adiciones químicamente activas, tales como puzolanas (humo de sílice, ceniza volante, ceniza de cascarilla de arroz) pueden presentar o no buenas características en función de la calidad y cantidad de la adición. Ventajas técnicas tales como menor demanda de agua, ahorro de energía, menor porosidad capilar y buen comportamiento frente a medios agresivos (Águila, 2016; Carrasco, Cruz, Terrados, Corpas, y Pérez, 2014; Loayza Goicochea, 2014; Robayo, Matthey y Delvasto, 2013; Vegas, Gaitero, Urreta, García y Frías, 2014; Villaquirán, Rodríguez y de Gutiérrez, 2014).

Conclusiones

La revisión de la literatura permitió encontrar alternativas de alto potencial de aplicación para subproductos derivados de la minería en el departamento del Huila. Ventajas entre las cuales se pueden mencionar cuestiones ecológicas, eventual reducción de costos y mejores características mecánicas abren la puerta a posibles nuevos modelos de negocio alrededor de dichos subproductos, especialmente los relacionados con las rocas calcáreas.

Se debe analizar cuidadosamente el porcentaje de las adiciones, las características mineralógicas y la porosidad de los agregados debido a que dichos parámetros influyen en las propiedades mecánicas del concreto. Particularmente adiciones de material calcáreo en cemento Portland permiten reducir los costos del procesamiento del concreto, además es un subproducto ampliamente presente en la región y como ventaja permite acelerar la tasa de hidratación de la mezcla en una etapa inicial, proporcionando un producto con características favorables.

Referencias

- Abo-El-Enein, S. A., Hashem, F. S., Amin, M. S., y Sayed, D. M. (2016). Physicochemical characteristics of cementitious building materials derived from industrial solid wastes. *Construction and Building Materials*, 126, 983-990. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.112>
- Águila, I. (2016). Evaluación físico químico de cenizas de cascarilla de arroz, bagazo de caña y hoja de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 23(4).
- Alexander, M., y Mindess, S. (2010). *Aggregates in concrete*. CRC Press.
- Aliabdo, A. A., Elmoaty, A. E. M. A., y Auda, E. M. (2014). Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and building materials*, 50, 28-41. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.005>
- Altiner, M., y Yildirim, M. (2017). Production and characterization of synthetic aragonite prepared from dolomite by eco-friendly leaching-carbonation process. *Advanced Powder Technology*, 28(2), 553-564. doi: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.10.024>
- Aquino, C., Inoue, M., Miura, H., Mizuta, M., y Okamoto, T. (2010). The effects of limestone aggregate on concrete properties. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2363-2368. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.05.008>
- Arel, H. Ş. (2016). Recyclability of waste marble in concrete production. *Journal of Cleaner Production*, 131, 179-188. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.052>
- Aziz, H. A., y Smith, P. G. (1996). Removal of manganese from water using crushed dolomite filtration technique. *Water Research*, 30(2), 489-492. doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(95\)00178-6](https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00178-6)
- Bernal, S., Esguerra, J., Galindo, J., de Gutiérrez, R. M., Rodríguez, E., Gordillo, M., y Delvasto, S. (2009). Morteros geopoliméricos reforzados con fibras de carbono basados en un sistema binario de un subproducto industrial. *Rev. Lat. Metal. Mater S*, 1, 587-592.
- Bilgin, N., Yeprem, H. A., Arslan, S., Bilgin, A., Günay, E., y Marşoglu, M. (2012). Use of waste marble powder in brick industry. *Construction and Building Materials*, 29, 449-457. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.011>
- Cabrera, O. A. (2017). *Caracterización de la durabilidad de hormigones con arenas de trituración*. (Tesis de post grado). Recuperado de <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/3102>
- Cabrera, O. A., Ortega, N. F., y Traversa, L. P. (2010). Una fuente alternativa de agregados finos para el hormigón.
- Carrasco, B., Cruz, N., Terrados, J., Corpas, F. A., y Pérez, L. (2014). An evaluation of bottom ash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks. *Fuel*, 118, 272-280. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.077>
- Castells, X. E. (2012). *Aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales: Reciclaje de residuos industriales*. Ediciones Díaz de Santos.
- Castillo, N. (2011). Agrominería: Desarrollo Local Sostenible: Informe Técnico y de Gestión 2011. *Gobernación del Huila*, 122-141. Recuperado de <http://www.huila.gov.co/publicaciones/5220/cadena-agromineria/>
- Catastro minero colombiano, 2017. Recuperado de <http://www.cmc.gov.co>
- Correa, R. A. T. (2005). La inserción de subproductos. Una mirada desde los materiales de construcción. *Educación y ambiente*, 207.
- DANE. (2017). Boletín técnico. Lugar de publicación: Estadísticas de cemento gris Agosto de 2017. Recuperado de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/cemento_gris/Bol_cemen_gris_ago17.pdf
- Darweesh, H. H. (2001). Building materials from siliceous clay and low grade dolomite rocks.

- Ceramics International*, 27(1), 45-50. doi: [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(00\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(00)00040-7)
- Dębska, D. (2015). The effect of exposition conditions on the durability of cement concrete with dolomite aggregate sourced near Kraków, Poland. *Procedia Engineering*, 108, 673-680. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.198>
- Delgado, O. F., y Medina, J. A. (2003). Extrusión de perfiles espumados de madera plástica. *Revista de Ingeniería*, (18), 56-63.
- Díaz, J., Izquierdo R., Mejía de Gutiérrez, R & Gordillo, M. (2013). Mezcla ternaria de cemento portland, escoria de alto horno y piedra caliza: resistencia mecánica y durabilidad. *Revista de la Construcción*, 12(3), 53-60. doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2013000300006>
- Dietrich, R.V. (1999). Calcite (mineral). Encyclopedia Britannica. Recuperado de <https://www.britannica.com/science/calcite>
- Fraccascia, L., Giannoccaro, I., y Albino, V. (2018). *Green product development: What does the country product space imply?*. Journal of Cleaner Production, 170, 1076-1088. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.190>
- Fuentes Molina, N., Fragozo Tarifa, O. I., y Vizcaino Mendoza, L. (2015). Residuos agroindustriales como adiciones en la elaboración de bloques de concreto no estructural. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2). doi: <https://doi.org/10.18359/rcin.1434>
- García Ten, F. J., Quereda, M. F., Mallol Gasch, G., Soriano, M., y Vicent, M. (2011). Desarrollo de baldosas cerámicas para pavimentación urbana basadas en residuos industriales.
- Haritonovs, V., Tihonovs, J., y Zaumanis, M. (2016). Performance evaluation of high modulus asphalt concrete mixes. *3rd International Conference on Competitive Materials and Technology Processes (IC-CMTP3)*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 123 (2016) 012055. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/123/1/012055>
- Hartshorn, S. A., Sharp, J. H., y Swamy, R. N. (1999). Thaumasite formation in Portland-limestone cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1331-1340. doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00100-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00100-3)
- Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., y Ghorbel, E. (2011). Use of waste marble aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1167-1171. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.037>
- Iglesias, I., García-Romero, E., y Acosta, A. (2014). Influence of dolomite microcrystals on the technological properties of Santa Cruz de Mudela clays used for building ceramics. *Applied Clay Science*, 102, 261-267. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.10.009>
- Ingram, K. D., y Daugherty, K. E. (1992). Limestone additions to portland cement: uptake, chemistry, and effects. *Int. Congr. Chem. Cem.*, 9th, III, 160.
- Isa, N. F., Muhammad, K., Yahya, N., Ahmad, M. M., Manaf, A., Hisyam, M. B., ... y Naspu, A. (2016). Dolomite quarry waste as sand replacement in sand brick. *Materials Science Forum*, 857, 319-322. Trans Tech Publications. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.857.319>
- Li, Y., Du, X. L., y Huo, D. (2007). Utilization of limestone as mineral admixture in cement and concrete. *Journal of Wuhan University of Technology*, 3, 010.
- Loayza Goicochea, P. (2014). Efecto de la ceniza de cáscara de arroz sobre la resistencia a la compresión del concreto normal.
- Mangin, N. M. (2015). *Utilización de agregados calcáreos de la Provincia de Córdoba para el desarrollo de hormigones con cemento portland blanco*. (Tesis de maestría). Recuperado de <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/2072>
- Martin, J. F. M. (2005). *Aditivos para concreto*. Concreto. Ensino. Pesquisa e Realizações. São Paulo, Brasil: Ibracon.

- Mattey Centeno, P., Robayo Salazar, R., Silva Urrego, Y., Álvarez Jaramillo, N., & Delvasto Arjona, S. (2014). Caracterización física y mecánica de agregados reciclados obtenidos a partir de escombros de la construcción. *Informador Técnico*, 78(2), 121-127. doi: <https://doi.org/10.23850/22565035.95>
- Mattey Centeno, P., Robayo Salazar, R., Torres Rico, J., Ramos Barragán, P., y Delvasto Arjona, S. (2015). Evaluación de las propiedades mecánicas de paneles de ferrocemento con agregado fino reciclado. *Informador Técnico*, 79(2), 146-155. doi: <https://doi.org/10.23850/22565035.159>
- Mikhailova, O., Yakovlev, G., Maeva, I., y Senkov, S. (2013). Effect of dolomite limestone powder on the compressive strength of concrete. *Procedia Engineering*, 57, 775-780. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.098>
- Milanesi, C. A., Perrone, F. H., Pappalardi, M., Violini, D., Zerbino, R., y Giaccio, G. (2010). Aprovechamiento de agregados de origen dolomítico en hormigones para pavimentos. *Cementos Avellaneda*. Recuperado de <http://www.cavellaneda.com.ar/publicaciones-detalle.php?id=8>
- Monsalve, I. V., Boláños, I. H., Lopez, P. F., y Toro, E. F. (2014). Teja tipo sándwich de cemento basados en subproductos industriales para el mejoramiento de la comodidad térmica. *Revista Colombiana de Materiales*, (5), 332-337
- Niesyt, M., y Psiuk, B. (2017). Fused dolomite-magnesia co-clinker for fired dolomite refractories. *Ceramics International*, 43(1), 51-59. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.08.150>
- Ordóñez, N., y Bahamón, W. (2010). La agrominería como motor del Huila para Colombia. *Programa de productividad y competitividad para el Huila. Informe técnico y de gestión 2010*.
- Pappu, A., Saxena, M., y Asolekar, S. R. (2007). Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. *Building and Environment*, 42(6), 2311-2320. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.04.015>
- Piechówka-Mielnik, M., y Giergiczny, Z. (2011). Properties of Portland-composite cement with limestone. *Cementing a sustainable future. XIII ICCI International Congress on the Chemistry of Cement*, Madrid (3-8).
- Rabah, M., y Ewais, E. M. M. (2009). Multi-impregnating pitch-bonded Egyptian dolomite refractory brick for application in ladle furnaces. *Ceramics International*, 35(2), 813-819. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2008.02.017>
- Robayo-Salazar, R. A., Mejía de Gutiérrez, R., y Mulford-Carvajal, A. J. (2016). Producción de elementos constructivos a partir de residuos de ladrillo activados alcalinamente. *Facultad de Ingeniería*, 25(43).
- Robayo, R., Mattey, P. y Delvasto, S. (2013). Comportamiento mecánico de un concreto fluido adicionado con ceniza de cascarilla de arroz (CCA) y reforzado con fibras de acero. *Revista de la Construcción*, 12(2), 139-151. doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2013000200011>
- Rocha, J. C., Da Luz, C. A., y Cheriaf, M. (2002). Effects Of Dolomite Aggregate On The Deterioration Of Concrete Floor. *9th International Conference on Durability of Materials and Components*. Rotterdam, Netherlands.
- Romero, A. A., Flores, S. L., y Arévalo, W. (2010). Tratamiento de efluentes de la industria minera con dolomita. *Industrial Data*, 13(1), 85. doi: <https://doi.org/10.15381/idata.v13i1.6174>
- Saboya, F., Xavier, G. C., y Alexandre, J. (2007). The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic. *Construction and Building Materials*, 21(10), 1950-1960. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.029>
- Sadek, D. M. (2012). Physico-mechanical properties of solid cement bricks containing recycled aggregates. *Journal of Advanced Research*, 3(3), 253-260. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2011.08.001>

- Sadek, D. M., El-Attar, M. M., y Ali, H. A. (2016). Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 121, 19-32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.044>
- Sadik, C., Moudden, O., El Bouari, A., y El Amrani, I. E. (2016). Review on the elaboration and characterization of ceramics refractories based on magnesite and dolomite. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 4(3), 219-233. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2016.06.006>
- Serrano Guzmán, M. F., Pérez Ruiz, D. D., Torrado Gómez, L. M., y Hernández, N. D. (2017). Residuos inertes para la preparación de ladrillos con material reciclable: una práctica para protección del ambiente. *Industrial Data*, 20(1).
- Smith, M. R. (1999). *Stone: building stone, rock fill and stone in construction*. Nottingham, Londres: The Geological Society.
- Sorvari, J., y Wahlström, M. (2014). Industrial By-products. En E. Worrell y M. Reuter, *Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists* (1st ed., pp. 231-253). Amsterdam: Elsevier.
- Souza, E., y Calo, D. (2008, November). Influencia de las características del agregado en el comportamiento del pavimento de hormigón. In *Primer Congreso Argentino de Áridos*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Ciudad del Mar del Plata, Plata.
- Sutcu, M., Alptekin, H., Erdogmus, E., Er, Y., y Gencil, O. (2015). Characteristics of fired clay bricks with waste marble powder addition as building materials. *Construction and Building Materials*, 82, 1-8. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.055>
- Swart, C. J. U., y van Schalkwyk, A. (2001). Subsurface grout barriers for ground stabilization in dolomite areas near Carletonville, South Africa. *Environmental Geology*, 40(4), 592-601. doi: <https://doi.org/10.1007/s002540000222>
- Sybilski, D., Bankowski, W., y Krajewski, M. (2010). High modulus asphalt concrete with limestone aggregate. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 3(2), 96.
- Tsivilis, S., Batis, G., Chaniotakis, E., Grigoriadis, G., y Theodossis, D. (2000). Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar. *Cement and Concrete Research*, 30(10), 1679-1683. doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00372-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00372-0)
- Vargas, R. (2005). Yacimientos minerales del departamento del Huila. Universidad Surcolombiana. Facultad de Ingeniería. Recuperado de <http://ingenieria.usco.edu.co/museo/images/GeoEconomicaHuila.pdf>
- Vegas, I., Gaitero, J. J., Urreta, J., García, R., y Frías, M. (2014). Aging and durability of ternary cements containing fly ash and activated paper sludge. *Construction and Building Materials*, 52, 253-260. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.070>
- Villaquirán, M. A., Rodríguez, E., y de Gutiérrez, R. M. (2014). Evaluación térmica de sistemas geopoliméricos basados en metacaolín con incorporación de humo de sílice y ceniza de cascarilla de arroz. *Informador Técnico*, 78(1), 6-11. doi: <https://doi.org/10.23850/22565035.64>
- Warren, J. (2000). Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-Science Reviews*, 52(1), 1-81. doi: [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00022-2)
- Wiemes, L., Pawlowsky, U., y Mymrin, V. (2017). Incorporation of industrial wastes as raw materials in brick's formulation. *Journal of Cleaner Production*, 142, 69-77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.174>

Current overview of the state of disabled population, regarding the use of transtibial prosthesis

Una mirada actual al estado de la población en condición de discapacidad frente al uso de prótesis de miembro inferior a nivel transtibial

Recibido: 28- 04 - 2017 Aceptado: 28-11-2017

Jhon Hernández Martín¹
Luis Alberto Parra²

¹ Colombiano MSc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Centro de Diseño y Metrología. e-mail jhonmartin56@gmail.com.

² Colombiano MSc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Centro de Diseño y Metrología. e-mail ingluisparra@misena.edu.co.

Abstract

The Center of Design and Metrology of SENA-CDM (Centro de Diseño y Metrología del SENA-CDM) has found that the population with disability of lower limbs represents a technical-technological challenge, regarding locomotion recovery, since this group requires very expensive surgeries or devices, such as canes, crutches, wheel chairs or other items to help them move freely. It is important to take into account that there are doubts as to whether prosthesis on the market satisfy patients' economical and functionality needs. Through this project, we intend to solve this inconvenience and generate a solution with local technology in the Center of Design and Metrology of SENA. In Colombia, there are not many companies that design and manufacture the elements composing a prosthesis; for this reason, the CDM has been working for approximately five years on the design and adaptation of prosthesis and orthosis with imported components. Thus, we intend to design and implement a 100%-SENA-manufactured ankle articulation for transtibial amputation, which meets the ergonomic and functional needs for patients. This original scientific article gathers the most relevant information regarding a topic affecting our society. Here, we analyze different bibliographic sources described in the existing literature. Using this knowledge, we have created the stages required to write this article, defining revision objectives and making the most relevant bibliographical search, and organizing information according to mind maps in order to write this paper.

Keywords: Foot; transtibial prosthesis; articulation; ankle.

Resumen

En el Centro de Diseño y Metrología del SENA-CDM se ha detectado que la población en condición de discapacidad de miembros inferiores representa un desafío técnico y tecnológico en la recuperación de las condiciones normales de la marcha, puesto que se requieren intervenciones costosas o elementos que ayuden al desplazamiento de estas personas, como bastones, sillas de ruedas, muletas u otros implementos que sirvan de soporte y faciliten la rehabilitación del paciente. Es importante tener en cuenta que hay dudas acerca de si las prótesis existentes en el mercado suplen las necesidades económicas y de funcionalidad de cada paciente. Con esta investigación se pretende implementar una prótesis transtibial, a fin de mejorar algunas condiciones de la marcha del paciente. Colombia no cuenta con muchas entidades que diseñen y fabriquen los elementos que componen una prótesis. Por tal razón y porque en el SENA, específicamente en el Centro de Diseño y Metrología- CDM, hace aproximadamente cinco años se viene trabajando en el diseño y adaptación de ortesis y prótesis, pero con componentes importados, se quiere diseñar e implementar una articulación de tobillo para amputación transtibial, haciendo uso del recurso humano y tecnológico disponible en el país, y así, poder desarrollar un sistema con manufactura propia y 100 % SENA, que cumpla con las características de funcionalidad y ergonomía para los pacientes con dicha discapacidad. Este artículo científico original recopila la Información más relevante sobre un tema que afecta nuestra sociedad. Aquí se analizan diferentes fuentes bibliográficas descritas en la literatura existente. Con ellas creamos las etapas necesarias para la redacción del artículo definiendo los objetivos de la revisión, haciendo la búsqueda más relevante de la bibliografía y organizando la información de acuerdo con mapas mentales para redactar el artículo.

Palabras clave: Pie; prótesis transtibial; articulación; tobillo.

Introduction

All human beings possess an intrinsic, natural characteristic in our bodies that is movement; however, in some cases, this natural attribute is lost due to different circumstances. Most frequent factors are associated to situations such as violence, high accidentally rates, and medical causes which directly compromise the person. For the specific case of violence, some areas of the world have suffered the serious consequences of land mines, a worldwide issue that affects societies' public policies,

according to the Red Cross international commission (CIRC, 2016). Countries where this issue is particularly serious are Cambodia, Angola, Bosnia-Herzegovina, Afghanistan, El Salvador, Nicaragua and Colombia, with a high number of active landmines, due to the armed conflicts in these nations.

For the specific case of Colombia, some distressing statistics have been retrieved; according to the Observatorio De Minas Antipersonas de la Presidencia de la Republica (Contraloria General de la República, 2012; Reyes, 2011), by 2011, around 1080 people had died due to landmines (Reyes, 2011). On the other hand, in most cases, the patient does not die, but loses one or both lower limbs, thus rendering landmines as one of the main causes for disability. Unofficial figures from the medic Thomas Küchenmeister indicate that, by 2011, the armed conflict in Colombia has left 20.000 victims counting deceased and disabled.

As one of the most affected countries by this situation, Colombia has a high percentage of disabled population (Nation general comptroller's office), who require medical and psychological aid on a daily basis (Álvarez and Ospina, 2013).

Thus, retrieving locomotion of population with lower-limb disability represents quite a challenge, since it requires expensive surgery, which, depending on specific needs, may require prosthesis, orthosis or devices which help them move freely, such as canes, crutches, wheel chairs or other items that generate the static balance of the person.

For Colombia, it becomes necessary generating around 4000 new prosthetics a year to cover the needs produced by the armed conflict (Ministerio de Posconflicto, Derechos Humanos y Seguridad, 2016) and amputations due to diabetes and accident tolls. Therefore, it is necessary to implement a bank of medical prosthetics which covers said need. Likewise, it is also important to consider if existing prosthetics meet the economic and functional needs of each patient. It is important to be aware that these elements represent a high investment and must be imported from other countries, since there is no local production.

By carrying out this research, it is sought to improve use, whether fixed or moderate, of aiding elements in order to reenable march, by implementing an electromechanical element, along with appropriate physical rehabilitation, which improves patient locomotion.

Method

Bibliography of this document complies with the following characteristics:

- Up-to-date revision or basic references.
- Both global and specific state of the art.
- Bibliographic Revision of the four work areas of the Project.

References are oriented under professional bibliographic supervision.

General state of the art in the field of orthopedic technology

An amputated patient experiences a loss in life quality, due to the difficulties in mobility or aesthetic changes (Molero-Sánchez, Molina-Rueda, Alguacil-Diego, Cano-De la Cuerda and Miangolarra-Page, 2015; Zhou *et al.*, 2015). This condition generates psychological sequels (Sagawa *et al.*, 2011) which lead to changes in personality and affect rehabilitation and loss acceptance (Lewis, 2008). Other psychological conditions derive in an intense sensation, originated in the location of the severed limb; this symptom is known as “phantom limb” (Lewis, 2008).

Mobility deprivation due to the loss of a limb makes many patients become a burden for their families and society, since they are unable to perform an economic activity due to their condition (Sinitski, Hansen and Wilken, 2012).

Treatments are the first tool to aid patients with physical sequels (Sinitski *et al.*, 2012; Morgenroth *et al.*, 2011). In treatments, the patient is subjected to physical tests, in order to determine the extent to which their mobility has been compromised (Colombo, Marchesin, Vergani, Boccafogli and Verni, 2011). Some injuries require the patient to wear supporting devices and others limit them to a wheel chair (Yuan, Wang, Zhu, and Wang, 2014; Zheng and Shen, 2013). For the latter case, patients have few options to improve their conditions (Molero-Sánchez *et al.*, 2015).

The first line of help for these diagnoses are prosthesis (Colombo *et al.*, 2011; Wang, Yuan, Zhu and Wang, 2015). At first, prosthesis was a solution to physical sequels (Sinitski *et al.*, 2012) as patients covered the inexistence of

a limb. Other types of prosthesis help the patient recover part of their lost mobility (Au *et al.*, 2015; Bellman, Holgate and Sugar, 2008; Casallas, Garzón and Luengas, 2011; Chen and Wang, 2015).

Au, Herr, Weber and Martínez-Villalpando (2007); Mancinelli *et al.* (2011); Lemoyne, Mastroianni, Hessel y Nishikawa (2015) define prosthesis as help devices for the people under disability conditions, configured as a set of mechanic, electro mechanic, orthotic and prosthetic pieces. Prosthesis design is carried out from pre-amputation, amputation and post amputation analysis (Ministerio de Salud de Colombia, 2015), thus achieving design suited to physical and personal conditions of each (Dillon and Fatone, 2013; Murdoch, 1967; Rubiano, 2012).

The mechanical principles of each limb are studied for design, in order to obtain an approximate model of the biomechanics of the limb to be replaced with the prosthesis (Au *et al.*, 2015; Casallas *et al.*, 2011; Cherelle, Grosu, Matthys, Vanderborght and Lefeber, 2014; Huang, Wensman and Ferris, 2016; Shultz, Lawson and Goldfarb, 2016; Sinitski *et al.*, 2012; Yuan *et al.*, 2014).

The approximate model of the limb is a mathematical representation, which allows characterizing the acting forces and the position of each part of the limb (Wang, Yuan, Zhu and Wang, 2014; Yuan, Wang and Wang, 2015; Zheng and Shen, 2013). This information is used in the design of a prosthesis with an approximate functionality, degree of Liberty and forces exerted on the limb (Adebayo *et al.*, 2011; Au *et al.*, 2015; Bellman *et al.*, 2008; Casallas *et al.*, 2011; Cherelle *et al.*, 2014; Sagawa *et al.*, 2011;).

The main inconvenience with mechanical and electro mechanical designs of prosthesis is centered on how to obtain a device which behaves similarly to muscles (Zheng and Shen, 2013). Muscles behave as both active and passive elements within the model of the limb (Bravo and Rengifo, 2014). In one moment, they exert lever force to produce the movement of the limb and in a second moment, they absorb impact or excess energy produced by other muscles (Lee Childers, Prilutsky and Gregor, 2014; Zheng and Shen, 2013).

Simulating muscle behavior is essential for the design of more functional prosthesis, which offer the patient a more natural experience (Bravo and Rengifo, 2014; Silverman and Neptune, 2012; Zheng and Shen, 2013). Achieving behavior similar to that of the muscles requires the use of several mechanic elements combined (Mancinelli *et al.*, 2011; Shultz *et al.*, 2016; Yuan *et al.*, 2015, 2014; Zheng

and Shen, 2013); however, the system is subjected to effects proper to the mechanical elements used, thus altering the dynamics intended to be simulated (Bravo and Rengifo, 2014; Fang, Jia, Wang and Suo, 2009; Gabriel *et al.*, 2008; Mancinelli *et al.*, 2011).

Lee *et al.* (2014), Silverman and Neptune (2012), Wang and Brown (2016) state that a mechanical system formed by a spring, and an engine exerting compression force on it, as well as contention of spring elongation simulate the behavior of a muscle (Au *et al.*, 2007; Brasil and Rosa, 2011; Chen, Wang, and Wang, 2015; Cherelle *et al.*, 2014; Hill and Herr, 2013; Huang *et al.*, 2016). More accurate studies on the biomechanics of certain limbs have proven that with the system previously described, it is possible to fully model them and even producing functional prototypes of prosthesis (Chen *et al.*, 2015; Chen and Wang, 2015; Cherelle *et al.*, 2014; Cherelle, Matthys, Grosu, Vanderborgh, and Lefeber, 2012; Eilenberg, Geyer and Herr, 2010).

Linear pneumatic cylinders are another alternative to simulate muscle behavior (Zheng and Shen, 2013). In their internal structure, cylinders have a spring which is compressed using a piston and pressurized air. The spring becomes an actuator which incorporates cylinder insertion within the pneumatic muscle, thus generating piston displacement, resembling the active part of the muscles in a lower limb (Zheng and Shen, 2013).

A clear example of the application of this mechanism is provided by Masum, Bhaumik and Ray (2014); Yuan, Zhu, Wang and Wang (2011), in the development of the prototype for a prosthesis for cases of transtibial amputation. They use the mechanical system to simulate the effect of compensation forces necessary for the patient to maintain balance as s/he moves (Adebayo *et al.*, 2011; Arotaritei, Turnea, Filep, Ilea and Rotariu, 2015; Casallas *et al.*, 2011; Chen and Wang, 2015; Wang *et al.*, 2015). The prototype is able to absorb the force generated when the prosthesis comes into contact with a surface, avoiding bounce effects, and it also compensates the angle between the basis of the prosthesis and the coupling axis, thus allowing the user to walk on steep surfaces (Bravo and Rengifo, 2014; Morgenroth *et al.*, 2011; Yuan *et al.*, 2014; Zheng and Wang, 2016; Zhu, Wang, Li, Sun and She, 2015; Zhu, Wang and Wang, 2014).

In the prototype by Yuan *et al.* (2011) a digital control system is implemented to calculate the magnitude of the force necessary for the patient to maintain balance from its own weight; the angle between the components of

the prosthesis regarding the ground and the part of the prosthesis coming into contact with the floor (Adebayo *et al.*, 2011; Bellman *et al.*, 2008; Cherelle *et al.*, 2014, 2012; Yuan *et al.*, 2011; Yuan *et al.*, 2014; Zheng and Wang, 2016; Zhu *et al.*, 2015, 2014). There is only one parameter left to the patient, the other ones are calculated by sensors located in different parts of the prosthesis. With these characteristics, it is possible to obtain a prosthesis which compensates changes in patients' steps (Cherelle *et al.*, 2014, 2012; Yuan *et al.*, 2015).

Previously cited prototypes only use the stages of the walking sequence to control actuators on the prosthesis (Shultz *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2014), requiring constant adjustments in each design, and their functionality is limited to a single use (Cherelle *et al.*, 2014). Prostheses are adjusted to walk or run, not both options, by changing the timing in the walking sequence (Wang *et al.*, 2014).

The use of electromyography will enable the development of prosthesis which adjust to the patient's walking pace without previous adjustment required (Chen, Wang and Wang, 2014; Chen *et al.*, 2015; Kannape, Member, Herr and Member, 2014). Placement of electrodes on certain muscles of the limb will deliver useful signals to determine the natural position of the limb (Chen *et al.*, 2014, 2015; Kannape *et al.*, 2014). This response from the limb to changes in the muscles will help patients to adapt to the prosthesis (Kannape *et al.*, 2014).

Prosthesis with these adaptation characteristics can be used in different patients by only adjusting the parameters of weight and physical length of the prosthesis (Ferris, Aldridge, Rábago, and Wilken, 2012; Laferrier and Gailey, 2010; Zhou *et al.*, 2015). Other prosthesis technologies require personal study of each patient, which consumes a considerable amount of time and does not guarantee patient's comfort with the result (Ferris *et al.*, 2012; Laferrier and Gailey, 2010; Molero-Sánchez *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2015).

Patients' rejection to the use of prosthesis propels the study of new techniques to make their use more natural (Ferris *et al.*, 2012; Laferrier and Gailey, 2010; Rusaw and Ramstrand, 2010; Sanders, Zachariah, Baker, Greve and Clinton, 2000; Zhou *et al.*, 2015). Changes in design, type of actuators, sensors and control techniques enable the improvement of commodities and functionality of prosthesis (Cherelle *et al.*, 2014, 2012; Shultz *et al.*, 2016; Zheng and Shen, 2013).

Follow-up on the prosthesis using the principles described by Masum *et al.*(2014); Yuan *et al.*(2011), have achieved several military-use versions, thanks to their resistance, and modular structure (Ferguson, Keeling and Bluman, 2010). The modular approach of prosthesis allows swift replacement of defective parts without jeopardizing patient's health every time reparations are required.

On the other side, glancing at the local, Latin-American perspective, specifically in Colombia, several developments have been achieved in the field of orthopedic technology (Hernández-Castillo, Álvarez-Camacho and Sánchez-Arévalo, 2013; Valladares, 2015), although many of them are patented, but not under production. Developments have been relevant, since they provided conditioning of costume-made prosthesis, component conditioning and, in turn, applied research (Estupiñán, Garzón and Suárez, 2007).

This type of development has been achieved from different fields of action; meaning, advances in applied technology are occurring due to research in universities with costume-made laboratories. A good example is the ankle movement march analysis laboratory, where foot movement can be recreated (Borrás, Gómez Serrano and Pinto, 2011; Raschke *et al.*, 2015). This laboratory displays the mechanical and mathematical process of said movement, all the way to the design of a prosthesis. Another example (Díaz and Cely, 2009) consists on a transtibial prosthesis, based on a CAT scan and validating design, through the method of analysis by finite elements. It is worth noting the use of this technique for prosthesis design. In 2015, Universidad San Buenaventura (Romero, 2012) designed and built a transtibial prosthesis, which takes electrical signals from the muscles and generates movement through it, using control technique for movement compensation.

Discussion

Along the information analysis, the different variables surrounding prosthesis use have been observed. Having said that, these variables increase and grow to a higher number of variables if we change height and condition of the amputation. Therefore, and considering the information reviewed, we can provide the corresponding technical recommendations for the implementation of prosthesis to be used in case of amputation. Technical parameters are as follow:

Technical or engineering parameters

- Patient's weight, height and biotype.
- Prosthesis must be similar in weight and length to the original limb.
- The system must offer great power and torque output during push.
- The system must be able to change rigidity.
- Prosthesis must be able to control articulation in the impulse phase.
- Prosthesis must be impact resistant to avoid damage.
- Prosthesis must generate low energetic expense, since it is strictly linked to battery use.

Materials

- The material used on prosthesis depends on the type of physical activity of the patient, but it is directly connected to his/her economic condition, since, depending on the level of resistance and low weight, the type of components may have a higher cost.
- Another important aspect in material management is life span of the components, since all these elements have pieces which wear out. Depending on the selection of components vs material characterization, it is possible obtaining a greater cost-weight benefit.
- Currently, ultralight materials are preferred, along with morphology similar to that of a normal leg, so that a patient with lower-limb disability is not excluded from practicing any sport or everyday activity and, on the other hand, his/her disability may go unnoticed by the rest of the community.

Psychosocial parameters

Although the ideal purpose of a prosthesis is reincorporating patients to their old social environment, with the same characteristics prior to amputation of lower limb, it becomes necessary, through different classes of rehabilitation and therapy, to minimize the impact of the missing limb, since the patient may be prone to future behavior, such as:

- Depression.
- Social dependence for routine activities.
- Social exclusion.

All these factors influence and are immerse in the proper treatment and rehabilitation to be provided for a patient.

Conclusions

- As the patient's degree of disability increases, along with the degree of liberty of the prosthetic component, the complexity index of the challenge increases proportionally, as kinetic and cinematic control vary accordingly.
- In order to implement an appropriate prosthetic component, which functioning depends on the acquisition and posterior control of electromyographic signals of the stump, experimental results in such practice must be excellent, as they are directly linked to the efficiency of the component as well as proper transmission of movement to the prosthetic device.
- Information analysis shows different transmission mechanisms, but the one reflecting the highest degree of efficiency and performance is the device composed by a ball screw, which has the main characteristic of increasing lineal displacement at very low speed and, surprisingly, with a minimum energetic consumption, thus making the mechanism easy to elaborate in a compact, lower-consumption manner.
- For proper implementation of the prosthetic component, the relation between the stump and the socket must generate minimum pressure, since it produces a sense of stability and confidence on the patient during march.

References

- Adebayo, O., George, L., Marchand, M., Marrion, J., Gielo-Perczak, K., Higgins, L. and Hoffman, A. (2011). Design of a new prosthetic alignment adaptor with quantitative alignment and height adjustment. *Bioengineering Conference (NEBEC), 2011 IEEE 37th Annual Northeast*, 1-2. doi: <https://doi.org/10.1109/NEBC.2011.5778538>
- Álvarez, R. J. and Ospina, N. J. (2013). Reparación integral a las víctimas de MAP, MUSE, AEI. Recuperado de <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/3669/2/AlvarezMarquezRafaelJesus2011.pdf>
- Arotaritei, D., Turnea, M., Filep, R., Ilea, M. and Rotariu, M. (2015). Analyze of Liner Influence in Transtibial Prosthetic taking into account Tribological Aspects. *Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2015 9th International Symposium on* (pp. 299-302). doi: <https://doi.org/10.1109/ATEE.2015.7133784>
- Au, S. K., Herr, H., Weber, J. & Martínez-Villalpando, E. C. (2007). Powered ankle-foot prosthesis for the improvement of amputee ambulation. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology - Proceedings*, 3020–3026. doi: <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2007.4352965>
- Au, S. K., Weber, J., Herr, H., Versluys, R., Desomer, A., Lenaerts, G. and Gopura, R.A.R.C.. (2015). System Identification of Human Joint Dynamics. *Rehabilitation Robotics (ICORR), 2015 IEEE International Conference*, 18(1), 55–87.
- Bellman, R. D., Holgate, M. A. and Sugar, T. G. (2008). SPARKy 3: Design of an active robotic ankle prosthesis with two actuated degrees of freedom using regenerative kinetics. *Biomedical Robotics and Biomechanics, 2008. BioRob 2008. 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference*, 511-516. doi: <https://doi.org/10.1109/BIOROB.2008.4762887>
- Borrás, C., Gómez, C. and Pinto, W. (2011) (s.f.). *Estudio, diseño y construcción biomecánica de un emulador de tobillo articulado para prótesis de miembro inferior*. Recuperado de <http://www.xixcnim.uji.es/CDActas/Documentos/ComunicacionesOrales/01-21.pdf>
- Brasil, L.M. and Rosa, S.F. (2011). Desenvolvimento de Prótese Ativa para Amputados Transtibiais Development of an Active Prosthesis for Transtibial Amputees, *Health Care Exchanges (PAHCE), 2011 Pan American* (pp. 223-224). IEEE.

- Bravo, A. M. y Rengifo, F. R. (2014). Modelo biomecánico de una prótesis de pierna. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 11(4), 417-425. doi: <https://doi.org/10.1016/j.riai.2014.08.003>
- Casallas, E. C., Garzón, E. Y. and Luengas, L. A. (2011). Modeling a transtibial prosthesis. *Medicine and Education (ITME), 2011 International Symposium 1*, 708-712. IEEE. doi <https://doi.org/10.1109/ITiME.2011.6130758>
- Chen, B. and Wang, Q. (2015). Combining human volitional control with intrinsic controller on robotic prosthesis: A case study on adaptive slope walking. *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015 37th Annual International Conference of the IEEE*, 4777-4780. doi: <https://doi.org/10.1109/EMBC.2015.7319462>
- Chen, B., Wang, Q. and Wang, L. (2014). Promise of using surface EMG signals to volitionally control ankle joint position for powered transtibial prostheses. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 2545-2548.
- Chen, B., Wang, Q. and Wang, L. (2015). Adaptive slope walking with a robotic transtibial prosthesis based on volitional emg control. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(5), 2146-2157. doi: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2365877>
- Cherelle, P., Grosu, V., Matthys, A., Vanderborght, B. and Lefeber, D. (2014). Design and validation of the ankle mimicking prosthetic (AMP-) Foot 2.0. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 22(1), 138-148. doi: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2013.2282416>
- Cherelle, P., Matthys, A., Grosu, V., Vanderborght, B. and Lefeber, D. (2012). The AMP-Foot 2.0: Mimicking intact ankle behavior with a powered transtibial prosthesis. *Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob), 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference*, 544-549.
- Colombo, C., Marchesin, E. G., Vergani, L., Boccafogli, E. and Verni, G. (2011). Study of an ankle prosthesis for children: Adaptation of ISO 10328 and experimental tests. *Procedia Engineering*, 10, 3510-3517. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.578>
- Comisión Internacional de la Cruz Roja -CICR- (2016). *Minas terrestres: legado de la guerra*. Recuperado de <https://www.icrc.org/es/minas-terrestres-legado-de-la-guerra>
- Contraloría General de la República. (2012). Primer informe de seguimiento y monitoreo de los entes de control a la Ley 1448 de 2011 de víctimas y restitución de tierras. Bogotá: CGR.
- Díaz, A. and Cely, M. M. (2009). Tomografía computarizada en 3D para análisis y diseño de prótesis transtibial. Recuperado de <http://repositorio.uac.edu.co/bitstream/handle/11619/1362/Tomograf%C3%ADa%20computarizada%20en%203D.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Dillon, M. P. and Fatone, S. (2013). Deliberations about the functional benefits and complications of partial foot amputation: do we pay heed to the purported benefits at the expense of minimizing complications? *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 94(8), 1429-1435. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2013.03.023>
- Eilenberg, M. F., Geyer, H. and Herr, H. (2010). Control of a powered ankle-foot prosthesis based on a neuromuscular model. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 18(2), 164-173. doi: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2009.2039620>
- Estupiñán, C. A., Carrillo, A. and Suárez, H. (2007). Diseño y fabricación de una prótesis de pie de respuesta dinámica en fibra de carbono. *IV Latin American Congress on Biomedical Engineering 2007, Bioengineering Solutions for Latin America Health*, 1233-1237. Springer, Berlin, Heidelberg. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-74471-9_286

- Fang, L. D., Jia, X. H., Wang, R. and Suo, S. (2009). Simulation of the Ligament Forces Affected by Prosthetic Alignment in a Trans-tibial Amputee Case Study. *Medical Engineering and Physics*, 31(7), 793–798. doi: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2009.02.010>
- Ferguson, J., Keeling, J. J. and Bluman, E. M. (2010). Recent Advances in Lower Extremity Amputations and Prosthetics for the Combat Injured Patient. *Foot and Ankle Clinics*, 15(1), 151–174. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcl.2009.10.001>
- Ferris, A. E., Aldridge, J. M., Rábago, C. A. and Wilken, J. M. (2012). Evaluation of a powered ankle-foot prosthetic system during walking. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 93(11), 1911–1918. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2012.06.009>
- Gabriel, R. C., Abrantes, J., Granata, K., Bulas-Cruz, J., Melo-Pinto, P. and Filipe, V. (2008). Dynamic joint stiffness of the ankle during walking: Gender-related differences. *Physical Therapy in Sport*, 9(1), 16–24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2007.08.002>
- Hernández-Castillo, A., Álvarez-Camacho, M., and Sánchez-Arévalo, FM. (2013). Protocolo para el análisis funcional de prótesis para pacientes con amputación parcial de pie. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, 34(1), 97-107.
- Hill, D. and Herr, H. (2013). Effects of a powered ankle-foot prosthesis on kinetic loading of the contralateral limb: A case series. *Rehabilitation Robotics (ICORR)*, 2013 IEEE International Conference, 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650375>
- Huang, S., Wensman, J. & Ferris, D. (2016). Locomotor Adaptation by Transtibial Amputees Walking with an Experimental Powered Prosthesis Under Continuous Myoelectric Control. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 24(5), 573-581. doi: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2015.2441061>
- Kannape, O. A., Member, I., Herr, H. M., and Member, I. (2014). Volitional Control of Ankle Plantar Flexion in a Powered Transtibial Prosthesis during Stair-Ambulation. *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2014 36th Annual International Conference of the IEEE, 1662-1665. doi: <https://doi.org/10.1109/EMBC.2014.6943925>
- Laferrier, J. Z. and Gailey, R. (2010). Advances in Lower-limb Prosthetic Technology. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 21(1), 87–110. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2009.08.003>
- Lee Childers, W., Prilutsky, B. I. and Gregor, R. J. (2014). Motor adaptation to prosthetic cycling in people with trans-tibial amputation. *Journal of Biomechanics*, 47(10), 2306–2313. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.04.037>
- Lemoyne, R., Mastroianni, T., Hessel, A. and Nishikawa, K. (2015, Novem.). Implementation of machine learning for classifying prosthesis type through conventional gait analysis. *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2015 37th Annual International Conference of the IEEE, 202-205.
- Lewis, R. A. (2008, November 11). Miembro fantasma. In D. Pravikoff (Ed.) *CINAHL Nursing Guide*. Glendale, California: Cinahl Information Systems.
- Mancinelli, C., Patriiti, B. L., Tropea, P., Greenwald, R. M., Casler, R., Herr, H. and Bonato, P. (2011). Comparing a passive-elastic and a powered prosthesis in transtibial amputees. *Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC*, 2011 Annual International Conference of the IEEE, 8255-8258. doi: <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6092035>
- Masum, H., Bhaumik, S. and Ray, R. (2014). Conceptual Design of a Powered Ankle-foot Prosthesis for Walking with Inversion and Eversion. *Procedia Technology*, 14, 228–235. doi: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.030>

- Ministerio de Postconflicto Derechos Humanos y Seguridad (2016). *Asistencia a víctimas*. Bogotá: Dirección para la Atención Integral contra Minas Antipersona, Ministerio de Postconflicto Derechos Humanos y Seguridad.
- Ministerio de Salud de Colombia (2015). *Guía de práctica clínica*. Bogotá: MS.
- Molero-Sánchez, A., Molina-Rueda, F., Alguacil-Diego, I. M., Cano-de la Cuerda, R., and Miangolarra-Page, J. C. (2015). Comparison of Stability Limits in Men With Traumatic Transtibial Amputation and a Nonamputee Control Group. *PM&R*, 7(2), 123–129. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2014.08.953>
- Morgenroth, D. C., Segal, A. D., Zelik, K. E., Czerniecki, J. M., Klute, G. K., Adamczyk, P. G. and Kuo, A. D. (2011). The effect of prosthetic foot push-off on mechanical loading associated with knee osteoarthritis in lower extremity amputees. *Gait & Posture*, 34(4), 502–507. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.07.001>
- Murdoch, G. (1967). Levels of amputation and limiting factors. *Annals of the Royal College of Surgeons of England*, 40(4), 204.
- Raschke, U., Orendurff, S., Mattie, M., Kenyon, J.L., Jones, D. E. A., Moe, D., & Kobayashi, T. (2015). Biomechanical characteristics, patient preference and activity level with different prosthetic feet: A randomized double blind trial with laboratory and community testing. *Journal of Biomechanics*, 48(1), 146–152. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.10.002>
- Reyes, C. (2011). La amenaza de las armas pequeñas, ligeras y explosivos ALP-ME. Borradores de Investigación: *Serie Documentos Ciencia Política y Gobierno y de Relaciones Internacionales*, (1).
- Romero, M. A. (2012). *Diseño y construcción de una órtesis de rodilla, destinada a la rehabilitación automatizada de la extremidad inferior*. Recuperado de dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2814/1/UPS-CT002463.pdf
- Rubiano, L. F. (2012). *Líderes de la comunidad como agentes rehabilitadores “yo, incluso”*. Recuperado de <http://intellectum.unisabana.edu.co/handle/10818/3487>
- Rusaw, D. and Ramstrand, N. (2010). Sagittal plane position of the functional joint centre of prosthetic foot/ankle mechanisms. *Clinical Biomechanics*, 25(7), 713–720. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2010.04.005>
- Sagawa, Y., Turcot, K., Armand, S., Thevenon, A., Vuillerme, N. and Watelain, E. (2011). Biomechanics and physiological parameters during gait in lower-limb amputees: A systematic review. *Gait & Posture*, 33(4), 511–526. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.02.003>
- Sanders, J. E., Zachariah, S. G., Baker, A. B., Greve, J. M. and Clinton, C. (2000). Effects of changes in cadence, prosthetic componentry, and time on interface pressures and shear stresses of three trans-tibial amputees. *Clinical Biomechanics*, 15(9), 684–694. doi: [https://doi.org/10.1016/S0268-0033\(00\)00026-7](https://doi.org/10.1016/S0268-0033(00)00026-7)
- Shultz, A. H., Lawson, B. E., and Goldfarb, M. (2016). Variable cadence walking and ground adaptive standing with a powered ankle prosthesis. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 24(4), 495-505. doi: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2015.2428196>
- Silverman, A. K. & Neptune, R. R. (2012). Muscle and prosthesis contributions to amputee walking mechanics: A modeling study. *Journal of Biomechanics*, 45(13), 2271–2278. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2012.06.008>
- Sinitski, E. H., Hansen, A. H. and Wilken, J. M. (2012). Biomechanics of the ankle-foot system during stair ambulation: Implications for design of advanced ankle-foot prostheses. *Journal of Biomechanics*, 45(3), 588–594. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2011.11.007>
- Valladares, D. L. (2015). *Diseño y modelado virtual del mecanismo policéntrico de una prótesis de rodilla*. Recuperado de <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/31033?show=full>

- Wang, H. and Brown, S. (2016, March). The effects of total ankle replacement on ankle joint mechanics during walking. *Journal of Sport and Health Science*, 1–6.
- Wang, Q., Yuan, K., Zhu, J. and Wang, L. (2014). Finite-state control of a robotic transtibial prosthesis with motor-driven nonlinear damping behaviors for level ground walking. *Advanced motion control (AMC), 2014 IEEE 13th international workshop*, 155-160. doi: <https://doi.org/10.1109/AMC.2014.6823274>
- Wang, Q., Yuan, K., Zhu, J., and Wang, L. (2015). Walk the walk: A lightweight active transtibial prosthesis. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 22(4), 80-89. doi: <https://doi.org/10.1109/MRA.2015.2408791>
- Yuan, K., Wang, Q. and Wang, L. (2015). Fuzzy-logic-based terrain identification with multisensor fusion for transtibial amputees. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(2), 618–630. doi: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2309708>
- Yuan, K., Wang, Q., Zhu, J., & Wang, L. (2014, June). Motion control of a robotic transtibial prosthesis during transitions between level ground and stairs. *IControl Conference (ECC), IEEE, 2014 European*, 2040-2045.
- Yuan, K., Zhu, J., Wang, Q. and Wang, L. (2011). Finite-state control of powered below-knee prosthesis with ankle and toe. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 2865-2870. doi: <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.03064>
- Zheng, E. and Wang, Q. (2016). Noncontact Capacitive Sensing Based Locomotion Transition Recognition for Amputees with Robotic Transtibial Prostheses. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 4320(c), 1–1.
- Zheng, H., and Shen, X. (2013, June). Sleeve muscle actuator and its application in transtibial prostheses. *Rehabilitation Robotics (ICORR), 2013 IEEE International Conference*, 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650444>
- Zhou, Z., Zhou, Y., Wang, N., Gao, F., Wei, K. and Wang, Q. (2015). A proprioceptive neuromuscular facilitation integrated robotic ankle-foot system for post stroke rehabilitation. *Robotics and Autonomous Systems*, 73, 111–122. doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.09.023>
- Zhu, J., Wang, Q. and Wang, L. (2014). On the design of a powered transtibial prosthesis with stiffness adaptable ankle and toe joints. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(9), 4797–4807. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2293691>
- Zhu, J., Wang, Q., Li, X., Sun, W. and She, H. (2015). Importance of Series Elasticity in A Powered Transtibial Prosthesis with Ankle and Toe Joints, *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2015 IEEE International Conference*, 541–546. Retrieved from www2.coe.pku.edu.cn/subpaget.asp?id=472

Indice de Autores

Authors

- Álvaro Chávez Porras. Colombiano. PhD. Universidad Militar Nueva Granada - UMNG. Bogotá, Colombia. e-mail: alvaro.chavez@unimilitar.edu.co.
- Andrés Torres. Colombiano. MSc. Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA - ASTIN - Tecnoparque. Grupo de Investigación en Desarrollo de Materiales y Productos GIDEMP. Cali, Valle del Cauca, Colombia. e-mail: torresrecalde84@gmail.com.
- Andrey Esneider Escobar Oquendo. Colombiano MSc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro Textil y de Gestión Industrial (SENA), Medellín, Colombia. Grupo de Investigación Aplicada a la Industria Textil y Química (GIAITEQ). e-mail: escobar.andrey@gmail.com.
- Carlos Alberto Flórez Arias. Colombiano. MSc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA Tecnoparque-nodo Neiva. e-mail: cfloreza@sena.edu.co.
- Carlos H. Valencia Ll. Colombiano. PhD. Universidad del Valle, Escuela de Odontología, Cali, Colombia. e-mail: carlos.humberto.valencia correounivalle.edu.co.
- Gloria Margely Muñoz Marín. Colombiana Tecnóloga. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro Textil y de Gestión Industrial (SENA), Medellín, Colombia. Grupo de Investigación Aplicada a la Industria Textil y Química (GIAITEQ). e-mail: geli1062008@gmail.com
- Hanny Juliet Callejas Reyes. Colombiana. MSc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA Tecnoparque-nodo Neiva. e-mail: hcallejas@sena.edu.co.
- Herney Garzón R. Colombiano. Esp. Universidad del Valle, Escuela de Odontología. Cali, Colombia. e-mail: herneygarzon@hotmail.com.
- Irvin J. Castro N. Colombiano. MSc. Universidad del Valle, Escuela de Odontología, Cali, Colombia. e-mail: irvin.castro@correounivalle.edu.co.
- Jhon Hernández Martin. Colombiano MSc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Centro de Diseño y Metrología. e-mail: jhonmartin56@gmail.com.
- John Fredy Holguín Múnera. Colombiano MSc. Universidad de Antioquia UdeA, Facultad de Ingeniería. Grupo Bioprocesos. Medellín, Colombia. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro Textil y de Gestión Industrial. Grupo de Investigación Aplicada a la Industria Textil y Química (GIAITEQ), e-mail: johnfh23@gmail.com.
- Juan David Peña. Colombiano MSc. Empresas Públicas de Medellín E.S.P. Medellín, Colombia. Innovación y Desarrollo.
- Karen Viviana Fabara Hernández. Colombiana. MSc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Tecnoparque-nodo Neiva. Grupo de Investigación para el Desarrollo Social y Tecnológico. e-mail: kfabara@sena.edu.co.
- Luis Alberto Parra. Colombiano MSc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Centro de Diseño y Metrología. e-mail: ingluisparra@misena.edu.co.
- Luis Alberto Ríos. Colombiano PhD, Universidad de Antioquia UdeA Medellín, Colombia. Facultad de Ingeniería. e-mail: luis.rios@udea.edu.co.
- María Alejandra Barragán. Colombiana. Odontóloga. Universidad del Valle, Escuela de Odontología. Cali, Colombia. e-mail: mabpr@hotmai.com.
- Mariana Peñuela Vásquez. Colombiana PhD. Universidad de Antioquia UdeA Medellín, Colombia. Facultad de Ingeniería, Grupo de

- Bioprocesos. e-mail: mariana.penuela@udea.edu.co.
- Nelly Alba de Sánchez. Colombiana. PhD. Universidad Autónoma de Occidente. Grupo Ciencia Ingeniería de Materiales GCIM. Cali, Valle del Cauca, Colombia. e-mail: nalba@uao.edu.co.
- Nicolás David Casallas Ortega. Colombiano. Esp. Universidad Militar Nueva Granada – UMNG. Bogotá, Colombia, e-mail: tnp.nicolas.casallas@unimilitar.edu.co.
- Paola Cristina Cajas Daza. Colombiana. PhD. Universidad de Brasilia. e-mail: patolacajas@gmail.com.
- Patricia Rodríguez S. Colombiana. Esp. Universidad del Valle, Escuela de Odontología, Cali, Colombia. e-mail: prodriguezsanchez@hotmail.com.
- Rocío del Pilar Monroy Rodríguez. Colombiana Ing. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro Textil y de Gestión Industrial (SENA), Medellín, Colombia. Grupo de Investigación Aplicada a la Industria Textil y Química (GIAITEQ). e-mail: rpmrodriguez@misena.edu.co.
- Vanessa Gil Ledesma. Colombiana. Estudiante Ingeniería. Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Valle del Cauca, Colombia. e-mail: vanne182_9@hotmail.com.
- Yessica Liceth Velásquez Castiblanco. Colombiana. Esp. Universidad Militar Nueva Granada – UMNG. Bogotá, Colombia. e-mail: yessica.velasquez@unimilitar.edu.co.

UNDIMOTRIZ

Columna de Agua
Oscilante para
Generación de
Energía Eléctrica



Proyectos Destacados

ASTIN
CENTRO NACIONAL DE ASISTENCIA
TÉCNICA A LA INDUSTRIA

2017



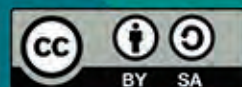
Vex Robotics Competition

Ganadores del
Premio de Robótica
en la competencia
nacional
"Vex In The Zone"





<http://revistas.sena.edu.co>
http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/index



Restrospectiva Informador Técnico

1982

2017



Número DOI

DOI: <https://dx.doi.org/10.23850/issn.2256-5035>



revistaitastin@sena.edu.co

Indexada en:



CENTRO NACIONAL DE ASISTENCIA
TÉCNICA A LA INDUSTRIA ASTIN

CALLE 52 No. 2Bis -15

Teléfonos: 57 (2) 431 5847 Ext. 22667 - 22695

Fax: (2) 447 1075 - 446 7182

www.sena.edu.co

<http://centroastinsena.blogspot.com/>

E-mail: astin@sena.edu.co

INFORMADOR TÉCNICO

Calle 52 No. 2Bis - 15

Cali, Valle del Cauca, Colombia

Teléfonos: 57 (2) 431 5800 Ext. 22694

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

<http://revistas.sena.edu.co>

DOI: <https://dx.doi.org/10.23850/issn.2256-5035>