

Universidad Nacional de Colombia

Rector: Ignacio Mantilla Parada

Vicerrector: John Willian Branch

Decano Facultad de Ciencias: Arley David Zapata Zapata

Editor Jefe: Revista Facultad de Ciencias: Víctor Ignacio López Ríos

Evaluadores Volumen 5 Número 2 y Volumen 6 Número 1

Ruth Álvarez Universidad de Carabobo, Venezuela	Jhon César Neita Moreno Instituto Alexander von Humboldt, Colombia
Germán Amat García Universidad Nacional de Colombia, Colombia	Jorge Noriega National Museum of Natural Science (CSIC), España
Isabel Bravo Realpe Universidad del Cauca, Colombia	Fredy Hoyos Velasco Universidad Nacional de Colombia, Colombia
Miguel Caro Candezano Universidad del Atlántico, Colombia	Carlos Alberto Peláez Jaramillo Universidad de Antioquia, Colombia
Alvaro Castro Caicedo Universidad Nacional de Colombia, Colombia	Edier Humberto Pérez Universidad del Cauca, Colombia
Carolina Giraldo Universidad del Valle, Colombia	Jaime Andrés Pérez Taborda Instituto de Microelectrónica, Madrid, España
Juan Manuel González Tecnoacademia Cali, Centro ASTIN SENA, Colombia	Jairo Plaza Castillo Universidad del Atlántico, Colombia
Rubén Guevara González Universidad Nacional de Colombia, Colombia	Oscar Jaime Restrepo Baena Universidad Nacional de Colombia, Colombia
María Esperanza López Gómez Universidad de Antioquia, Colombia	Elisabeth Restrepo-Parra Universidad Nacional de Colombia, Colombia
Claudia Medina Instituto Alexander Von Humboldt, Colombia	Guillermo Salas UNAM, México
Milton Humberto Medina Barreto Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia	Wilmer Saldarriaga Universidad Nacional de Colombia, Colombia
María Flórez Molina, Universidad de Antioquia, Colombia	Allan H. Smith Pardo U. S Department of Agriculture, USA
Jesús Eliécer Larrahondo Aguilar Universidad del Valle, Colombia	Fidel Ulín-Montejo Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México
Carlos Marina Fernández Instituto Nacional de Salud Pública, México	Alvaro Váldez Universidad Nacional de Colombia, Colombia
Julián Paul Martínez Galán Universidad de Antioquia, Colombia	José Vargas Navas Universidad Nacional de Colombia, Colombia
José Marulanda Bernal Universidad EAFIT, Colombia	Jhon Jairo Vargas Sánchez Universidad del Magdalena, Colombia
Martha Lucía Molina Prado Universidad de Pamplona, Colombia	Liliana Vera Londoño Instituto de Microelectrónica, Madrid, España
Alcides Montoya Universidad Nacional de Colombia, Colombia	

Diagramación en Latex: Sahory Torres, Estudiante de Ingeniería Forestal, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Impreso y hecho en Medellín.

El material de esta revista puede ser reproducido citando la fuente.

Contenido

EDITORIAL.....	7
CONSTRUCCIÓN DE UN ESCÁNER TRIDIMENSIONAL USANDO C++ Y HARDWARE LIBRE.....	9
CONSTRUCTION OF A THREE-DIMENSIONAL SCANNER USING C++ AND FREE HARDWARE CRISTIAN E. GAMBOA CAICEDO, CARLOS W. SÁNCHEZ	
CARACTERIZACIÓN DE UN ANDISOL DE LA CUENCA ALTA DE LA QUEBRADA SANTA ELENA, ORIENTE ANTIOQUEÑO, COLOMBIA	24
CHARACTERIZATION OF AN ANDISOL OF THE SANTA ELENA UPPER BASIN, EASTERN ANTIOQUIA, COLOMBIA NICOLÁS PÉREZ ECHAVARRÍA, DANIEL JARAMILLO JARAMILLO, ORLANDO RUÍZ VILLADIEGO, LUIS PARRA SÁNCHEZ	
ESTUDIO NUMÉRICO DEL MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS EN FLUIDOS MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO.....	39
NUMERICAL STUDY OF THE MOVEMENT OF PARTICLES IN FLUIDS BY FINITE ELEMENT METHOD JEISON VARGAS, CARLOS JACOME, CARLOS GIRALDO	
GOLD ELECTROLEACHING IN A POROUS BED REACTOR	57
ELECTROLIXIVIACIÓN DE ORO EN UN REACTOR DE LECHO POROSO LUVER ECHEVERRY VARGAS, NÉSTOR ROJAS REYES	
ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ORELLANA MEDIANTE MODE- LOS GAMLSS	67
ESTIMATION OF ORELLANA YIELD THROUGH GAMLSS MODELS GIPSY NARANJO DUEÑAS, EDGAR MONSALVE LUGO, FREDDY HERNÁNDEZ BARAJAS	
PROPIEDADES ESTRUCTURALES Y MAGNÉTICAS DE ALEACIONES $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ OBTENIDAS POR ALEAMIENTO MECÁNICO.....	83
STRUCTURAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF ALLOYS OF $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ OBTAINED BY MECHANICAL ALLOYING MAURICIO GALVIS, YEBRAIL ROJAS, DAGOBERTO OYOLA, HUMBERTO BUSTOS, HUGO MARTÍNEZ	

DIAGNÓSTICO DE LA COLECCIÓN DE ESCARABAJOS COPRÓFAGOS (SCARABAEIDAE: SCARABAEINAE) DEL MUSEO ENTOMOLÓGICO FRANCISCO LUIS GALLEGO, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, CAMPUS MEDELLÍN.....	93
<p style="margin-left: 40px;">DIAGNOSIS OF THE DUNG BEETLES COLLECTION (SCARABAEIDAE: SCARABAEINAE) WITHIN THE ENTOMOLOGICAL MUSEUM FRANCISCO LUIS GALLEGO, NATIONAL UNIVERSITY OF COLOMBIA, CAMPUS MEDELLÍN</p> <p style="margin-left: 40px;">DIEGO ESTEBAN MARTÍNEZ REVELO, CLAUDIA A. MEDINA</p>	
 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA APLICADO A LA PRODUCCIÓN PANELERA TRADICIONAL EN COLOMBIA.....	 107
<p style="margin-left: 40px;">LIFE CYCLE ASSESSMENT FOR THE TRADITIONAL PRODUCTION OF PANELA IN COLOMBIA</p> <p style="margin-left: 40px;">JUAN CASTAÑEDA, ANTONIO GONZÁLEZ, CRISTIAN USMA, NATALIA ANDREA CANO LONDOÑO</p>	

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
Facultad de Ciencias

COMITÉ EDITORIAL CENTRO EDITORIAL

Román Eduardo Castañeda Sepúlveda, Escuela de Física, Director Centro Editorial
Daniel Alberto Barragán Ramírez, Escuela de Química
Víctor Ignacio López Ríos, Escuela de Estadística
María Elena Márquez Fernández, Escuela de Biociencias
Mauricio Andrés Osorio Lema, Vicedecano Académico
Fernando Cubides Martínez, Asesor Centro de Publicaciones
María Eugenia Aristizábal Giraldo, Comunicadora Facultad de Ciencias

COMITÉ EDITORIAL REVISTA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS

Carlos Alberto Cadavid Moreno Ph. D. en Matemáticas, University Of Texas System Profesor Titular Universidad EAFIT email: ccadavid@eafit.edu.co	Jorge Mahecha Gómez Ph D. en Ciencias Física, University Of Belgrade, Serbia Profesor Universidad de Antioquia email: mahecha@gmail.com
Elder Jesús Villamizar Ph. D. en Matemáticas, Universidade Estadual de Campinas, Brasil Profesor Universidad Industrial de Santander email: jvillami@uis.edu.co	Juan Carlos Correa Morales Ph. D. en Estadística, University of Kentucky, Estados Unidos Profesor Asociado Escuela de Estadística email: jccorrea@unal.edu.co
Elizabeth Castañeda Ph. D. Microbiología, Universidad de California at San Francisco, Estados Unidos Investigador Emérito Instituto Nacional de Salud, Bogotá email: ecastaneda21@gmail.com	Juan Darío Restrepo Ángel Ph. D. en Ciencia Marina, University of South Carolina, Estados Unidos. Profesor Universidad EAFIT, Medellín jdrestre@eafit.edu.co
Fanor Mondragón Ph. D. en Ciencias Química, Universidad de Hokaido, Japón Profesor Instituto de Química, Universidad de Antioquia email: fmondra@gmail.com	Rodrigo Covaleta Doctor en Enseñanza de las Ciencias, Universidad de Burgos, España Profesor Jubilado Universidad de Antioquia email: rocovaleda@gmail.com
Gustavo Cañas Cardona Ph. D. en Óptica Profesor Universidad del Valparaiso, Chile email: gustavocanascardona@gmail.com	Sandra Bibiana Muriel Ruíz Ph. D. en Ciencias-Biología, Universidad del Valle, Colombia Profesora Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid email: sbmuriel@elpoli.edu.co

COMITÉ CIENTÍFICO

- Alberto Germán Lencina
Ph. D. en Física, Universidade Federal da Paraíba, Brasil
Profesor Universidad Nacional de La Plata, Argentina
email: agl@ciop.unlp.edu.ar
- Alfonso Castro
Ph. D. in Mathematics University of Cincinnati
Professor of Mathematics, Department of Mathematics Harvey
Mudd College, USA
email: castro@g.hmc.edu
- Ángela Restrepo Moreno
Ph. D. Microbiología, Tulane University Of Louisiana
Academia Colombiana de Ciencias Exactas Física y Naturales,
Capítulo de Antioquia, Medellín
email: angelares@une.net.co
- Carlos Augusto Molina Velásquez
Magister Astronomía, Universidade Federal Do Rio De Janeiro.
Planetario de Medellín Jesús Emilio Ramírez, Colombia
email: carlos.molina@parqueexplora.org
- Fernando Albericio
Ph. D. en Ciencias Química, Universidad de Barcelona
Investigador principal del Instituto de Investigación Biomédica
de Barcelona (IRB Barcelona) y catedrático de química
orgánica de la Universitat de Barcelona, España
email: albericio@ub.edu
- Fernando Albericio
Ph. D. en Ciencias Químicas, Universidad de Barcelona
Investigador principal del Instituto de Investigación Biomédica
de Barcelona (IRB Barcelona) y catedrático de química
orgánica de la Universitat de Barcelona, España
email: albericio@ub.edu
- Jairo Alberto Villegas Gutiérrez
Ph. D. Matemáticas, Universidad Politécnica de Valencia,
España
Profesor Asociado Universidad EAFIT, Colombia
email: javille@eafit.edu.co
- Jean-Pierre Galaup
Universidad de Paris Sud, Francia
email: mmtzjaroszewicz@post.home.pl
- Juan José Ibañez Marti
Ph. D. en Ciencias Biológicas
Científico Titular del Centro de Investigaciones sobre
Desertificación (CSIC-Universidad de Valencia), España
email: choloibanez@hotmail.com
- Luis Raúl Pericchi Guerra
Ph. D. University of London, Imperial College
Department of Mathematics (Mathematical Statistics), Puerto
Rico
email: luarpr@gmail.com
- Michael Seeger
Ph. D. Instituto Gesellschaft für Biotechnologische Forschung
en Braunschweig, Alemania
Profesor Titular de la Universidad Técnica Federico Santa
María en Valparaíso, España
email: michael.seeger@gmail.com
- Mónica Reinartz Estrada
Ph. D. Ciencias de la educación, Universidad de
Montreal-Canadá
Profesora Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional
de Colombia, Sede Medellín
email: mreinar@unal.edu.co
- Sandra Milena Hurtado Rúa
Ph.D. Statistics, University of Connecticut
Assistant Professor Department of Mathematics, Cleveland
State University, USA
email: s.hurtadorua@csuohio.edu
- Zbigniew Jaroszewicz
Ph. D. en Física, Institute of Physics of Warsaw University of
Technology
Profesor Instituto de Óptica Aplicada de Varsovia, Polonia
email: mmtzjaroszewicz@post.home.pl

CONSEJO FACULTAD DE CIENCIAS 2017

Arley David Zapata Zapata

Decano quien preside

Mauricio Andrés Osorio Lema

Vicedecano Académico

Claudia Patricia García García

Vicedecana de Investigación

Jorge Alberto Correa Quiroz

Director de Bienestar Universitario

Farid Chejne Janna

Representante del Consejo Superior Universitario

Román Eduardo Castañeda Sepúlveda

Director Escuela De Física y

Representante de los Directores de Escuela

Rodney Jaramillo Justinico

Director de la Escuela de Matemáticas y

Representante de los Directores de Escuela

Carlos Mario Lopera Gómez

Director Área Curricular de Estadística

Cristian Ramiro Abril Díaz

Representante Estudiantil de Posgrado

Jair de Jesús Gaviria Arango

Representante de los profesores ante el Consejo de la

Facultad de Ciencias

Francisco Luis Montoya Herrera

Secretario Facultad

EDITORIAL

ROMÁN EDUARDO CASTAÑEDA SEPÚLVEDA ^a

Presentamos el primer número del sexto volumen de la revista manteniendo la regularidad que nos hemos impuesto en los últimos años, pero con nuevos propósitos. Nos hemos fijado la meta de elevar el nivel de la revista para brindarle mejores incentivos a nuestros autores. En esa búsqueda, hemos ingresado la revista a nuevas bases de datos y nos estamos esforzando por cumplir los requisitos de ingreso a otras más. La estructura de los comités editorial y científico se ha renovado y, además de reiterar nuestra invitación a participar a la comunidad académica de nuestra alma mater, la estamos extendiendo a un abanico externo de autores y de revisores potenciales.

Esta estrategia tiene, no obstante, la condición de preservar el carácter multidisciplinario de la revista y el acceso libre a su contenido a través de su página. Estamos convencidos de la importancia de un aporte con estas características, en un mundo cuya fascinación por el conocimiento especializado va estrechando cada vez más el acceso y reduciendo el interés en una cultura científica amplia y fundamentada en criterios de calidad. En coherencia con ello, hemos depurado el contenido, migrando ciertas secciones (el reporte de tesis de posgrado, la reseña de grupos de investigación y el conversatorio con profesores de la facultad) a un nuevo y más apropiado canal de comunicación: el boletín de la Facultad de Ciencias. Con ese norte, mantenemos la atención en superar el reto de lograr alta valoración y reconocimiento social por mantener y fomentar el carácter multidisciplinario que debe caracterizar al órgano de divulgación de conocimiento de una Facultad de Ciencias.

Extendemos nuestro agradecimiento a los autores que han sometido sus artículos al proceso de publicación revisada de la revista, en particular a los de los ocho trabajos que tenemos el gusto de presentarles hoy, de vocación tanto teórica como aplicada, que abordan tópicos en diversas áreas temáticas de las ciencias exactas y naturales, así como de su instrumentación.

Abrimos este número con el reporte del desarrollo de un escáner 3D de bajo costo y reproducibilidad al alcance de cualquier laboratorio universitario. Este instrumento construye modelos digitales de objetos tridimensionales, útiles en múltiples aplicaciones de ciencia e ingeniería. A continuación, se reporta la caracterización de un andisol de la cuenca de la quebrada Santa Elena, en el oriente

^a Director Centro Editorial, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

antioqueño, un estudio técnico de los suelos locales que informa sobre sus constituyentes, aportando criterios para decidir sobre sus mejores usos. El conocimiento de la dinámica de los fluidos bifásicos (aquellos que contienen partículas sólidas) tiene un alto valor en muchas disciplinas que, incluso, no parecen tener otros vínculos directos, como la producción de alimentos, las ciencias biomédicas, la industria de colorantes y de petroquímicos, por citar pocos ejemplos. Sin embargo, la obtención de conocimiento con utilidad práctica en este tema es una labor compleja, pues requiere de la solución de sistemas de ecuaciones de diferente índole para describir tanto las interacciones entre el fluido y las partículas sólidas como las interacciones entre dichas partículas, bajo condiciones reales. El abordaje de este reto desde el método de elemento finito es el tema del siguiente artículo. El deterioro ambiental consecuencia de la explotación mineral, particularmente del oro, es un problema agudo en la actualidad. Una de sus causas específicas es la lixiviación de los minerales que, en el caso de materiales auríferos, emplea sustancias altamente tóxicas para separar los componentes apropiadamente. En el cuarto artículo de este número se reporta un estudio de electro-lixiviación de este tipo de minerales, con base en el cual se propone una explicación de la dinámica de cianuración por lixiviación del oro.

El quinto trabajo se enfoca en un tema específico de lo que hoy se denomina agricultura de precisión, disciplina que abarca los procesos de producción agrícola bajo condiciones ambientales controladas. El artículo está dedicado a la producción de hongos Orellana y reporta las condiciones que la optimizan a nivel industrial. Por otra parte, es un hecho actual que buena parte de la industria manufacturera utiliza materiales diseñados, fabricados y caracterizados por el hombre. Un ejemplo de este tipo de materiales es tema del siguiente reporte, que se ocupa de la caracterización estructural y magnética de un polvo específico fabricado por aleación mecánica en un molino planetario. A continuación, se presenta el diagnóstico del estado de organización y conservación de la colección de escarabajos coprófagos del Museo Entomológico Francisco Luis Gallego, adscrito a la Facultad de Ciencias y cerramos el número con un análisis de ciclo de vida aplicado a la producción panelera tradicional colombiana.

Esperamos que estas contribuciones despierten el interés de nuestros lectores y deseamos que les resulten útiles para sus búsquedas ya sean estas investigativas, profesionales o simplemente personales.

Por último, se continúa invitando a nuestros lectores a consultar libremente el contenido de todos los artículos editados por la revista de la Facultad de Ciencias visitando la página web de la revista: <http://revistas.unal.edu.co/index.php/rfc> y en <http://www.medellin.unal.edu.co/~revistafc/>.

CONSTRUCCIÓN DE UN ESCÁNER TRIDIMENSIONAL USANDO C++ Y HARDWARE LIBRE^a

CONSTRUCTION OF A THREE-DIMENSIONAL SCANNER USING C ++ AND FREE HARDWARE

CRISTIAN GAMBOA CAICEDO^b, CARLOS W. SÁNCHEZ^b

Recibido 31-10-2016, aceptado 07-02-2017, versión final 21-02-2017.

Artículo Investigación

RESUMEN: En este trabajo, se desarrolló un sistema económico de escaneo tridimensional (3D) que permite obtener información de la estructura física de un determinado objeto a partir de la cual, se genera un modelo digital. Este sistema opera proyectando un haz de luz láser en forma de línea sobre el objeto, mientras rota sobre su propio eje (eje z), el haz de luz crea un perfil del objeto, el cual es capturado mediante video de alta definición (HD) por una cámara. A través del procesamiento digital de las imágenes capturadas se obtienen los vértices del objeto y se construye el modelo tridimensional. Para llevar a cabo esta tarea, el escáner 3D está formado por un conjunto de elementos de hardware y software libre como lo son: la plataforma Arduino, que permite realizar el control del hardware de escaneo, y un software desarrollado en C++ que implementando las librerías OpenCv y OpenGL, permite la realización de las tareas de procesamiento y análisis de imágenes. Estos elementos hacen que este desarrollo se constituya como incursión económica en la tecnología de escaneo láser tridimensional.

PALABRAS CLAVE: escáner; láser; modelo tridimensional; hardware libre.

ABSTRACT: This paper shows the development of an economic three-dimensional scan system (3D) that provides information about the physical structure of a particular object from which a digital model is generated. This system operates by projecting a laser beam as a line on the object as it rotates on its own axis (z-axis), the beam creates a profile of the object, which is captured by high definition (HD) videocamera. By means of digital processing of the captured images, the object vertices are obtained and the three-dimensional model is constructed. To accomplish this task, the 3D scanner consists of a set of open source hardware and software, such as: the Arduino platform which allows to control of scanning and a software developed in C++ that implementing bookstores OpenCV and OpenGL, allows the tasks of processing and image analysis. These elements make this development, an economic foray into three-dimensional laser scanning technology.

KEYWORDS: acanner; laser; three-dimensional model; free hardware.

^aGamboa, C. E. & Sánchez, C. W. (2017). Construcción de un escáner tridimensional usando C++ y hardware libre. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 6 (1), 9–23. DOI: 10.15446/rev.fac.cienc.v6n1.60812

^bGrupo de investigación KIMSA, Facultad de Ingeniería, Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium-UNICATOLICA, Cra. 122 No. 12- 459, Cali, Colombia. cegamboa@unicatolica.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Es muy común encontrarse con modelos digitales, que pueden ser creaciones provenientes de la imaginación, y en ocasiones, representaciones de objetos de la vida real, que requieren ser estudiados preservando una de sus características más importantes, la integridad. Éste es un tema que siempre ha causado gran interés entre diferentes campos como: la arqueología, la medicina, la ingeniería, entre otros, debido a la posibilidad de observar y manipular objetos a detalle, sin tener contacto con los mismos.

El desarrollo de modelos tridimensionales presenta dificultades técnicas cuando se trata de modelos orgánicos con muchas curvas, como es el caso de animales o rostros humanos, aún más cuando lo que se requiere es recrear estos detalles en el modelo partiendo de un objeto conocido y manteniendo sus dimensiones, colores y/o texturas. Para esto surgen soluciones como los escáneres 3D, que permiten capturar las dimensiones reales del objeto punto a punto de manera que se pueda generar una imagen tridimensional del mismo, es decir, una representación virtual de un objeto real.

En este artículo, se dará a conocer un sistema de escaneo láser tridimensional (3D) multipropósito, construido a través del lenguaje C++, las librerías openCv y OpenGL, y la tarjeta de circuito programable Arduino, herramientas de software y hardware libre, respectivamente. Este dispositivo utiliza procesos matemáticos, como el manejo de matrices y el cambio de coordenadas, para obtener información de un objeto real, y luego generar un modelo tridimensional constituido por polígonos, el cual puede ser estudiado en diferentes entornos de modelado.

Este artículo está dividido por secciones, con el fin de contemplar todos los aspectos implicados en el desarrollo del producto. La sección 2, describe los conceptos utilizados como base para el desarrollo del proyecto. En la sección 3, se mencionan los componentes utilizados para la elaboración del sistema de escaneo. En la sección 4, se muestran los procesos necesarios para la generación de los modelos tridimensionales, y por último, en la sección 5, se muestran algunos de los resultados obtenidos.

2. CONCEPTOS PRINCIPALES

En esta sección, se describen los conceptos principales, utilizados para el desarrollo del sistema de escaneo descrito en este artículo.

2.1. Modelado 3D

El modelado tridimensional es el proceso que permite crear estructuras digitales en tres dimensiones, mediante el uso de computadores y empleando software especializado para este propósito (Marrero,

2009). Existen diferentes técnicas de modelado, las más importantes se encuentran: la reconstrucción por superficies, en donde la estructura es construida a partir de superficies generadas por polinomios, y la reconstrucción por polígonos, que básicamente permite la construcción de modelos a partir de triángulos (Marrero, 2009).

2.1.1. Modelado de curvas y superficie

El modelo de curvas y superficies permite la construcción de los modelos a través de puntos, curvas, líneas, y superficies (Marrero, 2009; Galdames, 2011; Salgado *et al.*, 2008).

2.1.2. Modelado de polígonos

Un polígono es un conjunto de líneas unidas que no se cruzan y son unidas por puntos que encierran un área simple. La mayoría de los modelos tridimensionales están compuestos por arreglos triangulares conocido como mallas triangulares (Marrero, 2009). Esta técnica permite obtener información del modelo como: el volumen, la transparencia, la masa, otros, (Baldassari, 2013; Scala, 2012).

2.2. Escáner 3D

Un escáner 3D es un dispositivo hardware de captura, que con ayuda de un software de procesamiento de imágenes, transfiere la información de un objeto real, en forma de nube de puntos, a un espacio virtual tridimensional (Marrero, 2009).

Generalmente, los escáneres tridimensionales se clasifican en dos tipos: escáner 3D de contacto y escáner 3D sin contacto. El primero, captura la información por medio de una sonda que actúa en puntos de contacto sobre el objeto, traduciendo estos puntos en coordenadas del objeto virtual. Esta técnica tiene como desventaja la posibilidad de una alteración en la integridad del objeto. El segundo, no requiere tocar el objeto para completar su tarea, pero presenta dificultades en el análisis de detalles como hoyos y oclusiones (Marrero, 2009). Este último tipo de escáner, se clasifica en dos tipos: activos y pasivos. Una breve descripción de estos se desarrollará a continuación.

2.2.1. Escáner pasivo

El escáner pasivo utiliza la intensidad de luz para obtener la profundidad y generar la reconstrucción del modelo (Marrero, 2009).

2.2.2. Escáner activo

El escáner activo irradia algún tipo energía sobre el objeto, para detectar la posición de cada uno de los puntos del mismo, y obtener el modelo deseado (Marrero, 2009).

El escáner activo recibe su nombre dependiendo de la tecnología que se implemente, así se presenta sus diferentes tipos:

- Escáner 3D por luz estructurada: consiste en la proyección de un patrón de luz sobre un objeto, y el registro de información por parte de una cámara.
- Escáner 3D láser: consiste en la proyección de un haz de luz sobre el objeto, que es reflejado por el mismo, y luego esta información es tomada a partir de una relación distancia/tiempo que depende del rebote de la luz.
- Escáner 3D por triangulación: consiste en la proyección de un haz de luz láser sobre el objeto y el uso de una cámara para el registro de información. La ubicación de la cámara, el láser, y el objeto que generalmente reposa sobre una superficie giratoria, forman un triángulo, lo que da su nombre a esta técnica. Éste será el tipo de escáner implementado en este artículo.
- Escáner 3D de sonar: consiste en la emisión de una onda electromagnética, que rebota sobre el objeto, y permite obtener la ubicación de los puntos del mismo.

Éste es el tipo de escáner que se implementó para el desarrollo de la herramienta aquí descrita. Por esto, se requiere que el objeto a escanear presente un alto nivel de opacidad para un adecuado proceso de captura.

3. COMPONENTES DEL SISTEMA

En esta sección, se hace una descripción del diseño, en cuanto a software y hardware, del sistema descrito.

3.1. Software

El componente de software se describe a través de diagramas de flujo, como se muestra a continuación:

- El diagrama 1 (ver Figura 1) describe el componente que se encarga del procesamiento de las imágenes capturadas y construcción del modelo tridimensional.
- El diagrama 2 (ver Figura 2) describe el componente que se encarga del control de hardware de escaneo, permitiendo la comunicación con el software.

Para la elaboración de este componente de software, se implementaron las librerías de procesamiento de imágenes y generación de escenas tridimensionales, OpenCV (*Open Source Computer Vision*) y OpenGL (*Open Graphics Library*), respectivamente. La primera es una librería de código abierto utilizada para la implementación de las técnicas de visión por computadora, mientras que la

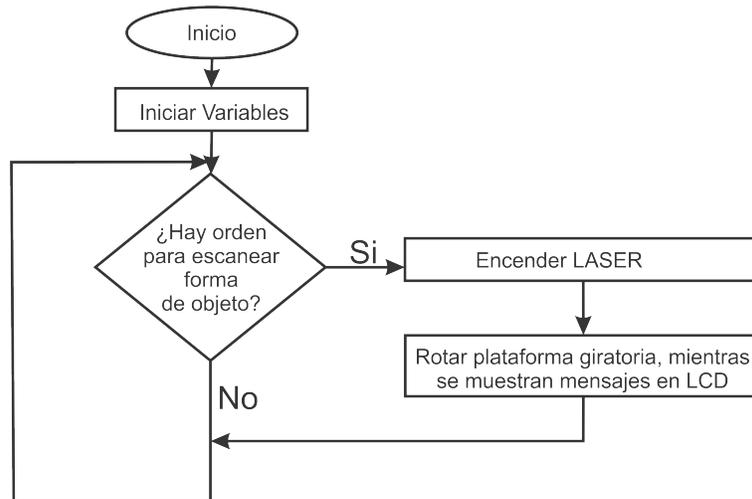


Figura 1: Diagrama de flujo 1, control del hardware de escaneo. Fuente: Elaboración propia.

segunda, es una librería gráfica que permite generar escenas en dos y tres dimensiones (Bradski & Kaebler, 2008).

3.2. Hardware

Los elementos hardware del equipo desarrollado para la generación de modelos tridimensionales, será agrupado en elementos de rotación, elementos de captura y elementos de interacción con el usuario. Todo esto, con el fin de tener una mayor claridad del funcionamiento del sistema.

3.2.1. Elementos de rotación

Los elementos utilizados para la rotación del objeto a escanear, se describen a continuación:

- **Arduino:** es una plataforma de desarrollo computacional de código abierto, que se constituye de componentes como: micro-controlador, entradas y salidas de tipos analógicas y digitales, Memoria RAM (*Random Access Memory*), entre otros (Arduino, 2016). Debido a su facilidad de uso y la gran cantidad de librerías, esta plataforma es muy utilizada en proyectos de robótica, domótica, entre otros (Crespo & Fernández, 2014). El modelo de Arduino utilizado en este artículo es el Arduino Mega 2560 (Monk, 2012). Esta tarjeta permite el control del hardware a partir del software.
- **Motor Shield:** es un periférico electrónico, compatible con la plataforma Arduino, que permite el manejo de relés, solenoides y motores paso a paso (Monk, 2012). En este proyecto, el dispositivo *MotorShield* junto con la plataforma Arduino, permiten el movimiento de la plataforma giratoria.

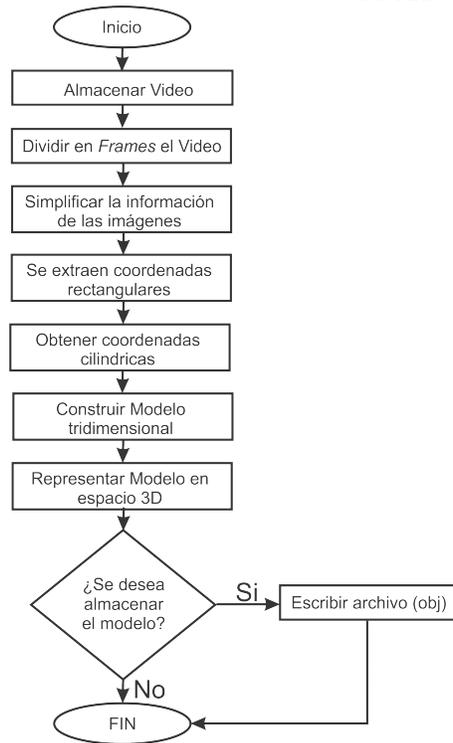


Figura 2: Diagrama de flujo 2, componente de software. Fuente: Elaboración propia.

- Este periférico, está basado en el chip L298, el cual es un integrado formado por un doble puente H, lo que le permite el manejo de dispositivos como: relés, solenoides, motores DC y motores paso a paso (Monk, 2012). Un puente H, es un dispositivo de tipo electrónico compuesto principalmente por transistores, que permite el control del sentido de giro de un motor DC (Carletti, 2007; Conti, 2005).
- Plataforma giratoria: La plataforma giratoria utilizada para generar la rotación de 360 grados del objeto, se compone de un disco de acrílico acoplada mecánicamente a un motor paso a paso que lo impulsa. Un motor paso a paso es un tipo de motor que avanza dando pasos discretos en ángulos dados por las especificaciones del motor, permitiéndose dar giros completos o fracciones de vuelta (Palazzesi, 2008).

3.2.2. Elementos de captura

Los elementos que permiten la captura de imágenes del objeto a escanear, se describen a continuación:

- Cámara: la cámara utilizada para la obtención de las imágenes es una Logitech C525, la cual fue seleccionada por su gran desempeño presentado en proyectos relacionados con el tema de escaneo de imágenes (Logitech, 2010; Logitech, 2016).

- Láser: el haz de luz láser que se proyecta sobre el objeto, es generado por un apuntador rojo con longitud de onda de $650 \text{ nm} \pm 10$ potencia máxima de 5mW . Debido a que este elemento ofrece un punto, se presenta la necesidad de generar el fenómeno de refracción a través un prisma cilíndrico, que es un elemento con capacidades para reflejar, dispersar y polarizar la luz, y permite obtener un haz sobre el objeto a escanear (Marrero, 2009). En la Figura 3, se muestra un esquema del arreglo láser.

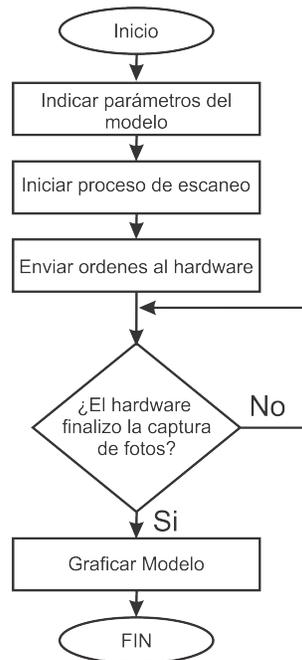


Figura 3: Esquema de arreglo laser. Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Elementos de interacción con el usuario

El elemento de interacción con el usuario implementado dentro del usuario corresponde a una pequeña pantalla LCD (*liquid crystal display*), la cual permite mostrar el estado de funcionamiento del escáner.

3.3. Esquema eléctrico del hardware

En la Figura 4 se muestra el esquema eléctrico del hardware del sistema de escaneo descrito en este artículo.

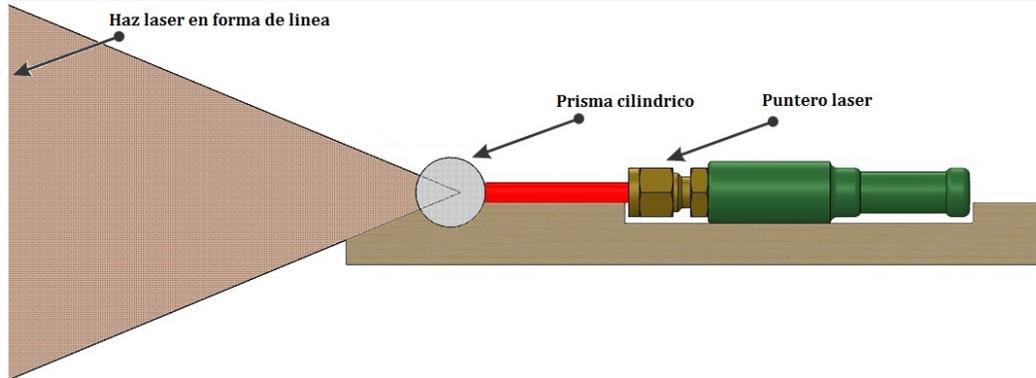


Figura 4: Esquema eléctrico del hardware del sistema. Fuente: Elaboración propia.

3.4. Comunicación entre software y hardware

En el mundo de las redes, existen dos tipos de transmisión de datos: comunicación serial y comunicación paralela. La primera, consiste en la transmisión de datos a través de una sola línea, por lo que sólo puede enviarse un bit a la vez. La segunda, transmite simultáneamente la información a través de las ocho líneas, por lo que puede enviar un byte a la vez (Llamas, 2014).

En el desarrollo de este proyecto, se utilizó la comunicación serial, con el fin de enviar información desde el programa de digitalización hasta la plataforma Arduino que controla el hardware, y viceversa.

Esta comunicación, permitió el planteamiento de la lógica del sistema como se muestra en la Figura 3.

4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO TRIDIMENSIONAL

El escáner desarrollado consta de una fuente de luz láser y una cámara digital de alta definición ubicados sobre el mismo plano y desfasados un ángulo θ uno con respecto al otro, tal y como se muestra en la Figura 5.

En el proceso de captura de información a través de imágenes, se implementa el principio de triangulación, el cual permite aprovechar la rotación de la plataforma tomando los datos de cada uno de los perfiles de manera que se pueda realizar la reconstrucción completa del objeto. El haz de luz debe ser enfocado de tal forma que tenga alineación con el eje Y de la plataforma, además, la figura debe ser ubicada en el centro de la superficie giratoria para determinar con mayor precisión las dimensiones del mismo.

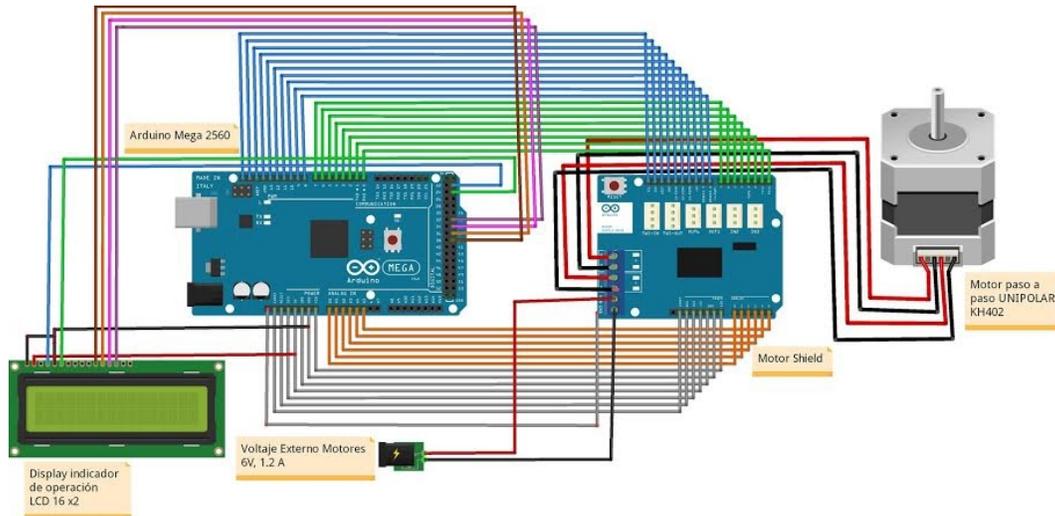


Figura 5: Diagrama de flujo, funcionamiento del sistema. Fuente: Elaboración propia.

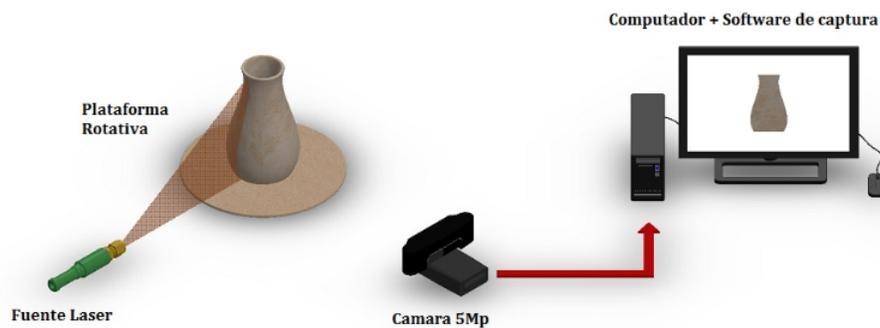


Figura 6: Escáner 3D con haz de luz láser. Fuente: Elaboración propia.

El algoritmo de reconstrucción usa un proceso de cambio de coordenadas, en el que las coordenadas cartesianas obtenidas de la imagen son convertidas a coordenadas cilíndricas (Sevilla, 2007), lo que permite visualizar la figura en un espacio euclidiano (Marrero, 2009).

En coordenadas cilíndricas, un punto P es representado por (r, θ, z) , como se muestra en la figura 7.

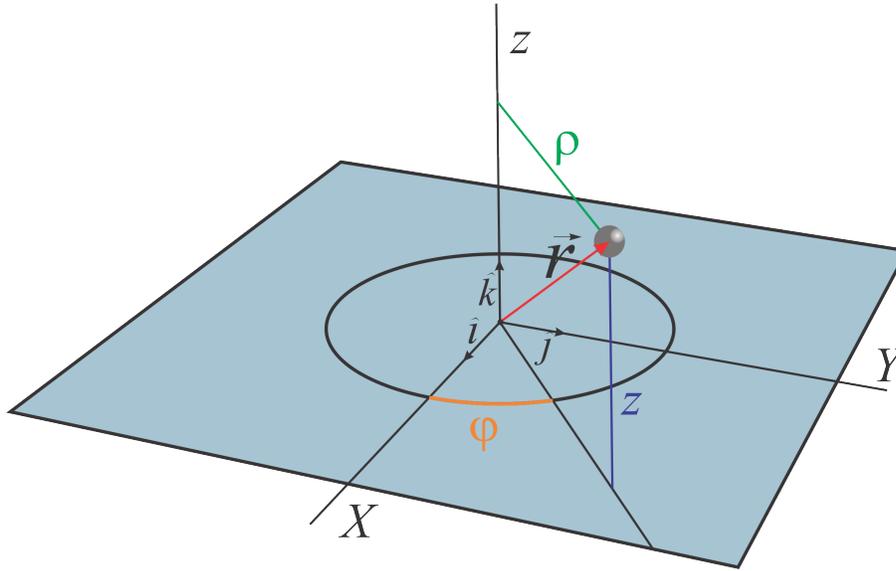


Figura 7: Coordenadas cilíndricas. Fuente: Elaboración propia.

La equivalencia entre las coordenadas cartesianas y las coordenadas cilíndricas está dada por las ecuaciones 1, 2 y 3:

$$x = \gamma \cos \theta \quad (1)$$

$$y = \gamma \sin \theta \quad (2)$$

$$z = z \quad (3)$$

donde:

- γ : Coordenada radial, es la distancia del punto P al eje z .
- θ : Coordenada azimutal, es el ángulo que se forma con el eje x .
- z : Coordenada vertical, es la distancia desde el punto P al plano XY .

En este trabajo, se toma como valor de r , la distancia con el eje y , para cada uno de los puntos (x, y) , como se muestra en la figura 8.

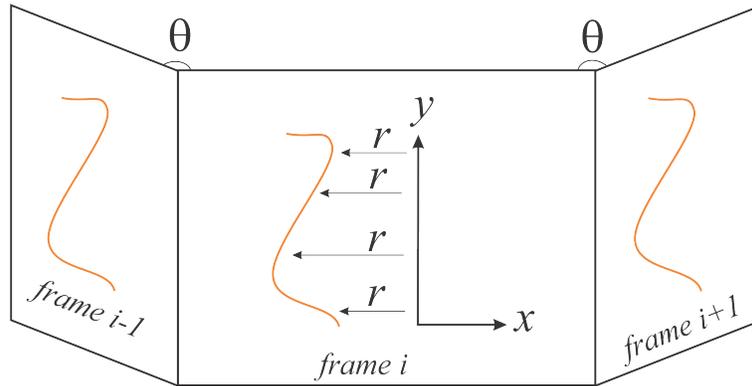


Figura 8: Reconstrucción tridimensional con escáner láser (Marreros, 2009).

El valor de θ , que indica el ángulo en el cual se dibujará la traza, es determinado dependiendo del número de cuadros (*frames*) que se presenten, como se muestra en la ecuación 4:

$$\theta = \frac{360}{\text{número de cuadros}} \quad (4)$$

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Durante el desarrollo del proyecto, se evidenció que los modelos tridimensionales generados, presentaban un porcentaje de error, alrededor de 400 % como se muestra en la Tabla 1

Tabla 1: Medidas iniciales.

Ejes	Medidas reales (cm)	Medidas teóricas (cm)	Error(%)
x,z	3.6	17.80	394
y	7.7	38.74	403

La Figura 9 muestra los ejes que se tomaron para el ajuste del objeto virtual con el objeto real.

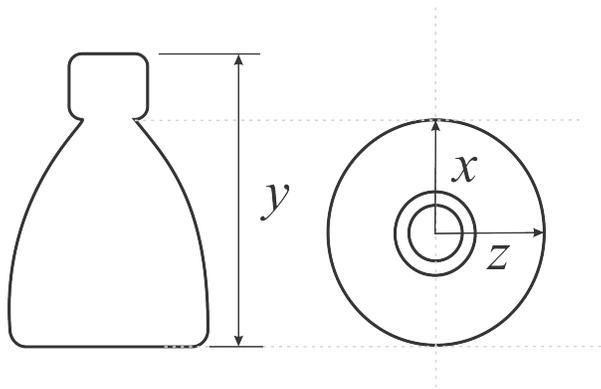


Figura 9: Toma de ejes para calibración del objeto. Fuente: Elaboración propia.

Las ecuaciones 5 y 6, fueron utilizadas para la alteración de los modelos futuros.

$$C_i = \frac{M_r}{M_t} \quad (5)$$

$$E_i = E_i \times C_i \quad (6)$$

donde:

- M_r : Medida real
- M_t : Medida teórica
- C_i : Constante de calibración
- E_i Ejes (z,y o z)
- i índice de cada eje

Los factores de escala obtenidos para cada uno de los ejes son los siguientes:

$$fx = 0.20224 \quad fz = 0.20224 \quad fy=0.19876$$

Una vez aplicados estos valores, los modelos presentaban los errores mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2: Medidas finales.

Ejes	Medidas reales (cm)	Medidas teóricas (cm)	Error(%)
x,z	3.6	3.4	6
y	7.7	7.8	1

En la Figura 10, se puede observar algunos de los modelos obtenidos mediante el uso del escáner desarrollado. Los objetos reconstruidos reflejan la forma original de los objetos reales ofreciendo un acabado superficial rugoso a la vista debido a la construcción generada por el algoritmo de formación del objeto. Es evidente que se requiere un proceso de simplificación de nodos que permitan generar superficies lisas adaptadas a las necesidades de los usuarios. Las imágenes generadas presentan solapamiento de nodos que deben ser tratados con algoritmos para su corrección de manera que las imágenes puedan ser modificadas desde la malla de datos generada.



Figura 10: Objetos escaneados. (a) y (c) objetos originales, (b) y (d) imagen de objetos modelados correspondientes en entorno tridimensional. Fuente: Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de este proyecto se logró evidenciar que:

La reconstrucción de objetos reales en un entorno virtual puede emplearse para facilitar áreas de desarrollo como videojuegos o incluso en la preservación de piezas arqueológicas en delicado estado ya que se tiene una técnica de no contacto que facilita su digitalización.

Los conceptos de visión por computadora y procesamiento de imágenes, así como su aplicación en la vida real, pueden ser abordados con el uso de herramientas como las librerías OpenCV y OpenGL, las cuales permiten un ágil desarrollo de proyectos en los que se requiere el uso de estos tópicos.

El uso de hardware libre, como la plataforma de circuito programable Arduino, junto con sus diferentes shields, facilitan el desarrollo de proyectos, en los que se requiere la interacción entre hardware y software, además, de brindar flexibilidad a los mismos.

Los objetos generados pueden ser usados como elementos constituyentes de una escena tridimensional, pero en caso de que se requieran para un proceso de edición, se hace necesario el uso de un tratamiento de la malla de datos, esto con el fin de eliminar el solapamiento de nodos generado por el algoritmo de reconstrucción. Algoritmos como Ganapathy y Delauny, pueden ser implementados para este fin.

Referencias

- Arduino (2016). Obtenido de Arduino: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>.
- Baldassari, S. (2013). Modelado geométrico. Obtenido de: <http://webdiis.unizar.es/sandra/masterig/modgeométrico13-14.pdf.4>
- Bradski, G. & Kaebler, A. (2008). Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. Beijing: O'Reilly Media; 1st edition.
- Carletti, E. J. (2007). Control de motores de cc puente h. *Robots Argentina*. Obtenido de: <http://robots-argentina.com.ar/MotorCCPuenteH.html>
- Conti, F. (2005). Motores paso a paso. Buenos Aires, Argentina: Librería y Editorial Alsina; 1 edition.
- Crespo, C. M & Fernández, E. (2014). Diseño e implementación de un escáner 3D para prototipado y modelado geométrico de objetos. Tesis Pregrado, Universidad Autónoma del Caribe.
- Galdames, O. (2011). Modelización con curvas y superficies de Bézier. *Modelling in Science Education and Learning*, 4(4), 181–193.
- Llamas, L. (2014). Tutoriales arduino, comunicación de arduino con puerto serie. Obtenido de: <http://www.luisllamas.es/2014/04/arduino-puerto-serie/>.
- Logitech, L. H. (2010). Webcam c525. Obtenido de HD Webcam C525: <https://neocenter.com/2015/img/logitech/176-85-LOCC525.pdf>.
- Logitech, L. (2016). HD WEBCAM C525. Obtenido de <http://www.logitech.com/es-roam/product/hd-webcam-c525>.
- Marrero, F. (2009). Escáner 3D mediante Triangulación y Luz Estructurada para Reconstrucción de Piezas Arqueológicas. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Monk, S. (2012). Programming Arduino getting started with sketches. New York: McGraw-Hill.
- Palazzesi, L. (2008). Motores paso a paso. Obtenido de <http://www.neoteo.com/motores-paso-a-paso>.
- Salgado, D., Castro, L., & Castro, S. (2008). Subdivisión de superficies Beta-spline cúbicas. Proceedings XIV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación, Oct. 2008.
- Scala Estalella, J. J. (2012). Análisis Vectorial, Volumen I: Vectores. España: Reverte ediciones.

Sevilla, L. D. (2007). Coordenadas cilíndricas. Definición. team, o. d. (2016). OpenCV. Obtenido de OpenCV: <http://docs.opencv.org/2.4/genindex.html>.

CARACTERIZACIÓN DE UN ANDISOL DE LA CUENCA ALTA DE LA QUEBRADA SANTA ELENA, ORIENTE ANTIOQUEÑO, COLOMBIA^a

CHARACTERIZATION OF AN ANDISOL OF THE SANTA ELENA UPPER BASIN, EASTERN ANTIOQUIA, COLOMBIA

NICOLÁS PÉREZ ECHAVARRÍA^b, DANIEL JARAMILLO JARAMILLO^c, ORLANDO RUÍZ
VILLADIEGO^d, LUIS PARRA SÁNCHEZ^e

Recibido 20-10-2016, aceptado 07-02-2017, versión final 22-02-2017.
Artículo Investigación

RESUMEN: Se caracterizó detalladamente un Andisol derivado de ceniza volcánica de la cuenca alta de la quebrada Santa Elena, Oriente Antioqueño (Colombia), con el fin de realizar en él otros estudios más detallados de pedogénesis. El suelo estudiado presentó un bajo contenido de bases y de fósforo disponible y una alta acidez, lo que indica un bajo nivel de fertilidad natural. El alto contenido de materia orgánica superficial está en concordancia con el clima frío húmedo de la zona y con la formación de complejos organometálicos que la protegen de la mineralización. Los horizontes superficiales del perfil estudiado se clasificaron como no alofánicos mientras que los horizontes subsuperficiales se clasificaron como alofánicos. El suelo estudiado mostró evidencias de ser poligenético, así como de fenómenos de erosión asociados a cambios climáticos drásticos y fue clasificado como un Acrudoxic Fulvudand, medial, mezclado, isotérmico.

PALABRAS CLAVE: andisol; materia orgánica; pedogénesis.

ABSTRACT: A volcanic ash derived Andisol in Eastern Antioquia (Colombia) was studied in order to establish farther pedological aspects. The soil presents low bases status, low available phosphorus contents and high acidity, indicating a low level of natural fertility. The high content of surface organic matter is in accordance with the damp cold climate of the area and with the formation of organometallic complexes that protects it again mineralization. The surface horizons were classified as non allophanic while the subsurface horizons were classified as allophanic. The studied soil was poligenetic and show evidence of erosion phenomena associated with drastic climate changes. The soil was classified as medial, mixed, isothermic Acrudoxic

^aPérez Echavarría, N., Jaramillo Jaramillo, D., Ruíz Villadiego, O. & Parra Sánchez, L. (2017). Caracterización de un andisol de la cuenca alta de la quebrada Santa Elena, Oriente Antioqueño, Colombia. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 6 (1), 24–38. DOI: 10.15446/rev.fac.cienc.v6n1.60628

^bIngeniero agrónomo, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, npereze@unal.edu.co.

^cProfesor Titular y Maestro Universitario, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, djaramal@unal.edu.co.

^dProfesor asociado, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, osruiz@unal.edu.co.

^eProfesor asociado, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, lnparra@unal.edu.co.

Fulvudand.

KEYWORDS: andisol; organic matter; pedogenesis.

1. INTRODUCCIÓN

Los Andisoles son suelos que se desarrollan a partir de materiales provenientes de eyecciones volcánicas (ceniza, pumita, lava) y/o materiales volcanoclásticos, cuya fracción coloidal está dominada por minerales de bajo rango de ordenamiento o por complejos Al-humus (Soil Survey Staff (SSS), 1999).

El sistema de clasificación taxonómica de suelos del USDA (Soil Survey Staff, SSS, 1999, 2014), establece que la tierra fina de los suelos que poseen propiedades ándicas debe cumplir con los siguientes requerimientos: contenido de carbono orgánico menor al 25 % (en peso), densidad aparente con humedad retenida a 33 kPa menor de 0.9 Mg/m^3 , retención de fosfatos mayor o igual a 85 % y contenido de Al y Fe extractables con oxalato ácido de amonio ($\text{Al}_0 + 1/2 \text{ Fe}_0$) mayor o igual a 2 %. Aparte de los requerimientos anteriores, Jaramillo (2009) considera que hay algunas propiedades químicas de los Andisoles que se pueden relacionar con las propiedades ándicas, como los contenidos de Al, Fe y Si extractables con pirofosfato de sodio, el pH medido en NaF y la CIC variable.

Shoji *et al.* (1996), proponen la relación entre el Al extraído con pirofosfato de sodio y el extraído con oxalato ácido de amonio para separar horizontes ándicos dominados por complejos Al-humus de los dominados por materiales alofánicos. Según Van Breemen & Buurman (1998), el oxalato debe extraer todo el aluminio y el hierro asociados a compuestos amorfos inorgánicos (incluyendo aluminosilicatos) y a compuestos orgánicos, mientras que el pirofosfato debe extraer únicamente el aluminio y el hierro ligado a compuestos orgánicos.

Flórez *et al.* (2006) y Jaramillo *et al.* (2006), realizaron varias investigaciones sobre génesis de Andisoles de la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas, en el Oriente Antioqueño, y definieron que los suelos predominantes en esta zona pertenecían a los grandes grupos Melanudands, Fulvudands y Hapludands. Son suelos profundos a moderadamente profundos, bien o moderadamente bien drenados en las laderas y con drenaje imperfecto en las depresiones, tienen texturas medias y son bien estructurados, presentan altos contenidos de materia orgánica y de aluminio intercambiable, bajo contenido de bases y de fósforo disponible y son de bajo nivel de fertilidad natural.

El presente trabajo se realizó con el objetivo de caracterizar, de manera detallada, un Andisol de la cuenca alta de la quebrada Santa Elena, en el Oriente Antioqueño, el cual se utilizará para otros estudios, aún más detallados sobre pedogénesis de estos suelos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Caracterización del sitio experimental

El estudio se llevó a cabo en el Centro Agropecuario Paysandú de la Universidad Nacional de Colombia, ubicado en el corregimiento de Santa Elena, a una distancia de 18 km al oriente de la ciudad de Medellín (Figura 1). Sus coordenadas geográficas son $6^{\circ} 12' 37''$ de latitud norte y $75^{\circ} 30' 11''$ de longitud oeste. Su área se estima en 139.3 ha. Ecológicamente, se encuentra en la zona de vida bosque muy húmedo montano bajo (bmh - MB), con una precipitación media anual de 2500 mm, con distribución bimodal, y una temperatura media anual de $14.7^{\circ}C$ (De los Ríos *et al.*, 2004).

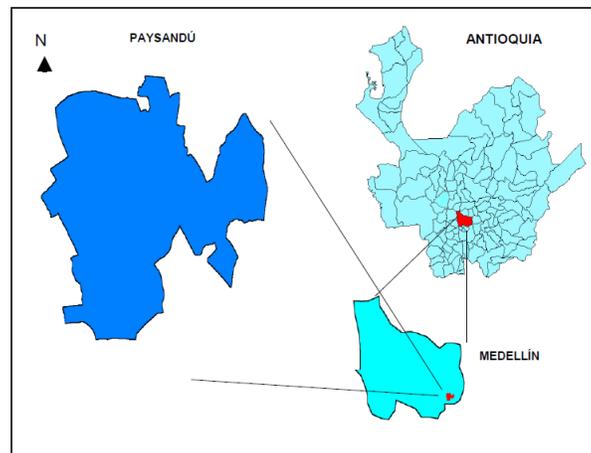


Figura 1: Localización del Centro Agropecuario Paysandú, Medellín, Colombia. Fuente: De los Ríos *et al.*, 2004.

Según el Departamento Administrativo de Planeación de la Alcaldía de Medellín (2008), el corregimiento de Santa Elena se encuentra conformado por la parte alta de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, las partes alta y media alta de la cuenca de la quebrada Santa Elena, donde se ubica el Centro Agropecuario Paysandú, y la parte alta de las cuencas de la zona sur oriental y de algunas cuencas de la zona nororiental del Valle de Aburrá.

Según Jaramillo *et al.* (2006), en la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas, se presentan anfíbolitas y serpentinitas como los materiales litológicos de mayor cobertura, con algunos depósitos aluviales y de vertiente de edad cuaternaria. Sin embargo, desde el punto de vista del material parental de los suelos, estos autores definen que la ceniza volcánica es el más importante en toda la cuenca, ya que ella recubre los paisajes de colinas bajas desarrolladas en saprolitos espesos de rocas y los depósitos de vertiente. Además, recubre aluviones y/o forma parte de ellos como material retransportado y depositado por las corrientes de agua.

2.2. Muestreo del suelo

Se hicieron recorridos exploratorios por las partes altas de las cuencas de las quebradas Piedras Blancas y Santa Elena observando en los taludes y cortes que se encontraban en ellas los suelos existentes. En varios de los sitios visitados se realizaron observaciones detalladas del perfil del suelo, siguiendo las pautas que para tal efecto recomienda el Soil Survey Division Staff (Soil Survey Staff (SSS), 1999). Después de analizar la información recolectada en los recorridos de campo, se seleccionó un perfil bajo cobertura natural que representaba la mayoría de los perfiles observados (Perfil Paysandú). En ese sitio se preparó una calicata de 2 m de largo por 2 m de ancho por 1.5 m de profundidad y se hizo una descripción detallada del suelo con base en la guía que para el efecto tiene el USDA (Schoeneberger *et al.*, 2002).

De cada uno de los horizontes descritos se tomó una muestra de suelo disturbada de aproximadamente 1 kg que se empacó en una bolsa plástica hermética para realizar los análisis de laboratorio respectivos: caracterización de la fertilidad y de las propiedades ándicas del suelo. Además se tomó una muestra sin disturbar con un cilindro metálico de 92.57 cm³ para determinar la Densidad aparente (Da) de los horizontes.

2.3. Caracterización de la fertilidad

Para caracterizar la fertilidad del suelo se realizaron las siguientes determinaciones: pH en agua 1:1 volumen: volumen (método potenciométrico), contenido de materia orgánica (M.O., %) mediante oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio (método de Walkley-Black), contenidos de bases intercambiables (Ca, Mg, K y Na, cmol (+)/kg de suelo) mediante extracción con acetato de amonio 1 N a pH 7, fósforo disponible (P, mg/kg de suelo) por el método de Bray II, aluminio intercambiable (Al, cmol (+)/kg de suelo) extraído con KCl 1 N, contenido de elementos menores (Fe, Mn, Cu, Zn, mg/kg de suelo) por el método Olsen-EDTA y contenido de boro (B en mg/kg de suelo) extraído con agua caliente y cuantificado por espectrofotometría UV-VIS con el método de Azometina-H. Además, se midió la capacidad de intercambio catiónico del suelo a pH 7 (CIC7, cmol (+)/kg de suelo) por el método del acetato de amonio 1 N y se estimó la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE, cmol (+)/kg de suelo) mediante la suma de las bases más el aluminio intercambiable (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, 2006). También se calculó el porcentaje de saturación con bases como la sumatoria de las bases sobre la CICE del suelo $[(Ca + Mg + K + Na)/CICE] \times 100$ y el porcentaje de saturación con aluminio como el contenido de aluminio intercambiable sobre la CICE del suelo $(Al/CICE) \times 100$. Estos análisis fueron realizados en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

2.4. Caracterización de las propiedades ándicas y otras relacionadas con génesis y clasificación

Para caracterizar las propiedades ándicas del suelo y otras relacionadas con su génesis y clasificación, se midieron las cantidades de Al, Fe y Si extractables con oxalato ácido de amonio (Alo, Feo, Sio, respectivamente, %), así como las extractables con pirofosfato de sodio (Alp, Fep, Sip, respectivamente, %) y la capacidad de fijación de fosfatos (FF, %), siguiendo los métodos propuestos por Pansu & Gautheyrou (2006). Además, se midió el pH en NaF (método potenciométrico, 1:50 peso: volumen), según lo recomendado por el sistema de clasificación taxonómica de suelos del USDA (Soil Survey Staff (SSS), 2014) y se determinó la Da (Mg/m^3) para cada uno de los horizontes, utilizando el método del cilindro biselado (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, 2006). Estos análisis también fueron realizados en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Descripción del perfil en campo

En la Figura 2 se observa el Perfil Paysandú y su descripción se presenta a continuación:

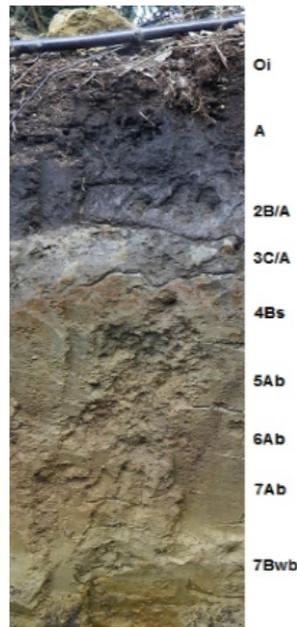


Figura 2: Perfil Paysandú. Fuente: Elaboración propia.

Describieron: Daniel Francisco Jaramillo Jaramillo, Nicolás Pérez Echavarría. *Fecha:* Octubre 3 de 2014. *Localización:* Centro Agropecuario Paysandú de la Universidad Nacional de Colombia, corre-

gimiento de Santa Elena. *Altitud*: 2692 msnm. *Precipitación media anual*: 2500 mm. *Temperatura media anual*: 14.7°C. *Posición fisiográfica*: Parte media de la ladera de colinas bajas, redondeadas, desarrolladas en saprolito de anfibolita y recubiertas con ceniza volcánica. *Topografía*: Fuertemente inclinada con pendiente entre 7 y 12%. *Material parental*: Cenizas volcánicas del complejo Ruíz-Tolima. *Vegetación natural*: Rastrojo alto con abundante helecho. *Uso actual*: Barbecho. *Régimen de humedad del suelo*: údico. *Régimen de temperatura del suelo*: Isotérmico. *Profundidad efectiva*: Muy profundo. *Drenaje natural*: Bien drenado. *Evidencias de erosión*: No presenta. *Epipedón*: ócrico. *Horizontes subsuperficiales*: Cámbico.

Oi 0 - 10 cm; capa de material orgánico fresco, abundantes raíces de helecho muy finas, límite abrupto ondulado.

A 10 - 24 cm; color en húmedo pardo muy oscuro (10 YR 2/2); franco arcilloso; con estructura en bloques subangulares, finos, moderados; friable, ligeramente plástico, moderadamente pegajoso; comunes poros finos y muy finos; comunes raíces finas; reacción muy fuerte y rápida al NaF (++++); límite abrupto plano.

2B/A 24 - 31/34 cm; color en húmedo pardo oliva (2.5 Y 4/3) en un 75 % de la matriz del suelo y negro (10 YR 2/1) en el 25 % restante; franco arcilloso a arcilloso; con estructura en bloques subangulares, finos, moderados; friable, muy plástico, muy pegajoso; comunes poros finos y muy finos; sin raíces; mezcla con el horizonte A por pedotúbulos y grietas; reacción muy fuerte y rápida al NaF (++++); límite muy abrupto irregular.

3C/A 31/34 - 38/41 cm; color variegado, en húmedo y en amasado pardo oliva (2.5 Y 4/4); arcilloso; sin estructura, masivo; extremadamente firme, muy plástico, muy pegajoso; pocos poros finos; sin raíces; mezcla con el horizonte A por pedotúbulos y grietas; reacción muy fuerte y rápida al NaF (++++); límite muy abrupto irregular.

4Bs 38/41 - 50 cm; color variegado, en húmedo y en amasado pardo (10 YR 4/3); arcilloso; con estructura en bloques angulares, finos, moderados; friable, muy plástico, muy pegajoso; comunes poros finos; sin raíces; reacción moderada al NaF (++); límite abrupto irregular.

5Ab 50 - 65 cm; color en húmedo pardo oliva (2.5 Y 4/4); arcilloso; con estructura en bloques angulares, finos, moderados; friable, moderadamente plástico, muy pegajoso; muchos poros finos; pocas raíces finas muertas; reacción moderada al NaF (++); límite claro plano.

6Ab 65 - 75 cm; color en húmedo pardo oliva (2.5 Y 4/3) con 5 % de moteos pardo rojizos (5 YR 4/4) y rojo amarillentos (5 YR 5/8) provenientes de oxidación de raíces; arcilloso; con estructura

NICOLÁS PÉREZ ECHAVARRÍA, DANIEL JARAMILLO JARAMILLO, ORLANDO RUÍZ VILLADIEGO, LUIS PARRA SÁNCHEZ
en bloques angulares, finos, débiles; friable, muy plástico, muy pegajoso; muchos poros finos; pocas raíces finas muertas; reacción moderada al NaF (++) ; límite claro plano.

7Ab 75 - 93 cm; color en húmedo pardo amarillento oscuro (10 YR 4/4) con 5 % de moteos pardo rojizos (5 YR 4/4) y rojo amarillentos (5 YR 5/8) provenientes de oxidación de raíces; arcilloso; con estructura en bloques angulares, finos, débiles; friable, muy plástico, muy pegajoso; muchos poros finos; pocas raíces finas muertas; reacción moderada al NaF (++) ; límite claro plano.

7Bwb 93 - 103 cm; color en húmedo amarillo oliva (2.5 Y 6/6); arcilloso; con estructura en bloques angulares, finos, débiles; friable, muy plástico, muy pegajoso; muchos poros finos; sin raíces; reacción moderada al NaF (++) ; límite claro plano.

8Ab 103 - 113 cm; color en húmedo pardo oliva claro (2.5 Y 5/6); franco arcilloso; con estructura en bloques angulares, finos, débiles; friable, moderadamente plástico, moderadamente pegajoso; muchos poros finos; sin raíces; reacción moderada al NaF (++) ; límite claro plano.

9C 113 + cm; color en húmedo amarillo oliva (2.5 Y 6/8); franco arcilloso; sin estructura, masivo; friable, muy plástico, muy pegajoso; pocos poros finos; sin raíces; no presenta reacción al NaF.

3.2. Caracterización de la fertilidad

Los resultados de las Tablas 1 y 2 muestran que el suelo estudiado presenta las propiedades químicas típicas de los Andisoles que predominan en la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas y, en general, en el Oriente Antioqueño (Flórez *et al.*, 2006; Jaramillo *et al.*, 2006; Caballero & Jaramillo, 2007).

Castro & Gómez (2010) proponen los siguientes valores de referencia para interpretar los análisis químicos: los suelos que presentan un pH menor a 4.5 son extremadamente ácidos, entre 4.5 y 5.0 son muy fuertemente ácidos y entre 5.1 y 5.5 son fuertemente ácidos; en clima frío los contenidos de M.O. menores a 5 % son bajos, entre 5 y 10 % son medios y mayores a 10 % son altos; los contenidos de Ca menores a 2 cmol(+)/kg de suelo son muy bajos, entre 2 y 3 cmol(+)/kg de suelo son bajos, entre 3 y 6 cmol(+)/kg de suelo son medios y mayores a 6 cmol(+)/kg de suelo son altos; los contenidos de Mg menores a 0.5 cmol(+)/kg de suelo son muy bajos, entre 0.5 y 1.2 cmol(+)/kg de suelo son bajos, entre 1.2 y 1.8 cmol(+)/kg de suelo son medios y mayores a 1.8 cmol(+)/kg de suelo son altos; los contenidos de K menores a 0.2 cmol(+)/kg de suelo son muy bajos, entre 0.2 y 0.4 cmol(+)/kg de suelo son bajos, entre 0.4 y 0.6 cmol(+)/kg de suelo son medios y entre 0.6 y 1 cmol(+)/kg de suelo son altos; los contenidos de Na menores a 0.1 cmol(+)/kg de suelo son bajos, entre 0.1 y 0.5 cmol(+)/kg de suelo son medios y mayores a 0.5 cmol(+)/kg de suelo son

Tabla 1: Propiedades químicas de los horizontes del Perfil Paysandú: pH, M.O., bases intercambiables, aluminio intercambiable, CICE y CIC7.

Horizonte	Profundidad cm	pH agua 1:1	M.O %	cmol(+)/kg de suelo						
				Ca	Mg	K	Na	Al	CICE	CIC7
Oi	0-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	10-23	4.5	22.6	0.09	0.16	0.10	0.02	1.2	1.6	15.9
2B/A	23-30/34	4.7	19.5	0.03	0.08	0.06	0.02	2.8	3.0	37.0
3C/A	30/34-38/41	5.0	13	0.03	0.02	0.03	0.01	1.2	1.3	37.3
4Bs	38/41-50	5.1	8.7	0.02	0.02	0.02	0.01	0.4	0.5	21.0
5Ab	50-65	5.1	6.5	0.02	0.02	0.02	0.01	0.3	0.4	35.6
6Ab	65-75	5.3	6.1	0.03	0.01	0.02	0.01	0.2	0.3	31.3
7Ab	75-93	5.3	6.3	0.03	0.02	0.01	0.01	0.3	0.4	28.3
7Bwb	93-103	5.3	6.4	0.03	0.02	0.02	0.01	0.2	0.3	31.3
8Ab	103-113	5.1	3.1	0.03	0.02	0.02	0.02	0.3	0.4	4.0
9C	113+	5.3	0.88	0.13	0.60	0.02	0.01	0.5	1.3	13.1

altos; los contenidos de Al menores a 1 cmol(+)/kg de suelo son bajos, entre 1 y 2.5 cmol(+)/kg de suelo son medios y mayores a 2.5 cmol(+)/kg de suelo son altos. Finalmente los contenidos de P menores a 10 ppm se consideran muy bajos, entre 10 y 20 ppm son bajos, entre 20 y 40 ppm son medios y mayores a 40 ppm son altos.

Debido a lo anterior se puede afirmar que este suelo es muy fuertemente ácido en superficie y fuertemente ácido en profundidad y que presenta un alto contenido de materia orgánica en los horizontes superficiales y un nivel muy bajo de bases y de fósforo disponible en todo el perfil. Los contenidos de Al intercambiable, excepto en el horizonte 2B/A, son bajos y medios, lo que podría indicar según De los Ríos *et al.* (2004), que los principales responsables de la acidez en este suelo son los grupos ácidos de la materia orgánica y en menor medida las reacciones de hidrólisis del Al. A pesar de que estos valores de Al intercambiable fueron en general bajos y medios, este elemento representa un porcentaje muy alto de la CICE en la mayoría de los horizontes, lo que explica la alta saturación con Al que se encontró en casi todo el perfil e indica que éste es el catión dominante en el complejo de cambio del suelo.

Castro & Gómez (2010), también indican que contenidos de Fe menores a 50 ppm son bajos, entre 50 y 100 ppm son medios y mayores a 100 ppm son altos; que contenidos de Mn menores a 5 ppm son bajos, entre 5 y 10 ppm son medios y mayores a 10 ppm son altos; que contenidos de Cu menores a 2 ppm son bajos, entre 2 y 4 ppm son medios y mayores a 4 ppm son altos; que contenidos de Zn

NICOLÁS PÉREZ ECHAVARRÍA, DANIEL JARAMILLO JARAMILLO, ORLANDO RUÍZ VILLADIEGO, LUIS PARRA SÁNCHEZ
 Tabla 2: Propiedades químicas de los horizontes del Perfil Paysandú: fósforo y elementos menores.

Horizonte	Profundidad cm	Saturación con bases (%)	Saturación con Al (%)	<i>mg/kg</i> de suelo					
				P	Fe	Mn	Cu	Zn	B
Oi	0-10	-	-	-	-	-	-	-	-
A	10-23	23.1	75.0	3.0	307	1.0	1.0	1.0	0.70
2B/A	23-30/34	6.3	93.3	2.0	140	1.0	1.0	1.0	0.50
3C/A	30/34-38/41	6.9	92.3	1.0	113	0.5	1.0	0.5	0.22
4Bs	38/41-50	14.0	80.0	1.0	107	0.5	1.0	0.5	0.12
5Ab	50-65	17.5	75.0	1.0	22	0.5	1.0	0.5	ND
6Ab	65-75	23.3	66.7	1.0	12	0.5	1.0	0.5	0.03
7Ab	75-93	17.5	75.0	1.0	8	0.5	1.0	0.5	ND
7Bwb	93-103	26.7	66.7	1.0	8	0.5	1.0	0.5	ND
8Ab	103-113	22.5	75.0	2.0	23	0.5	2.0	0.5	0.32
9C	113+	58.5	38.5	1.0	14	2.0	2.0	0.5	0.15

menores a 3 ppm son bajos, entre 3 y 6 ppm son medios y mayores a 6 ppm son altos; por último contenidos de B menores a 0.3 ppm son considerados bajos, entre 0.3 y 0.6 ppm son considerados medios y mayores a 0.6 ppm son considerados altos. Debido a lo expuesto por estos autores puede decirse que los valores de Fe son altos en los cuatro primeros horizontes y bajos en los demás; que en general el Mn, Cu y Zn presentan valores bajos en todo el suelo y que el B tiene un valor alto en el primer horizonte, un valor medio en el segundo horizonte y valores bajos en el resto. La CICE es muy baja comparada con la CIC7, lo que indica que la carga del suelo es predominantemente variable y representa en promedio el 95.16 % de la carga del suelo a pH 7.

3.3. Caracterización de las propiedades ándicas y otras relacionadas con génesis y clasificación

En las Tablas 3 y 4 puede apreciarse que en todos los horizontes derivados de ceniza volcánica (hasta los 103 cm de profundidad) se cumplen los requerimientos de densidad aparente (Da), de fijación de fosfatos (FF) y de Al y Fe extractables con oxalato ácido de amonio (Alo y Feo), necesarios para considerar este espesor de suelo como un material con propiedades ándicas. Los dos horizontes restantes, 8Ab y 9C, no cumplieron con el contenido de Alo + 1/2 Feo mayor o igual a 2 %, ni con el % de FF mayor o igual a 85 %, requeridos para ser considerados como horizontes ándicos (Soil Survey Staff, SSS, 1999, 2014).

Los valores de Da en todos los horizontes del suelo variaron entre 0.43 y 0.79 mg/m^3 . La menor FF

se presentó en el horizonte A del suelo y fue de 94.91 %, mientras que los demás horizontes ándicos presentaron FF superiores a 98 %. La suma de Alo + 1/2 Feo presentó valores que estuvieron entre 2.05 % para el horizonte A y 11.36 % para el horizonte 4Bs.

Los valores más altos de Alp se encontraron en los horizontes A, 2B/A y 3C/A del suelo, los mismos que presentaron los mayores contenidos de M.O. Tabla 1, responsable de los complejos alumínicos que se extraen con pirofosfato. Al comparar los valores de Alp con los de Alo en los dos primeros horizontes se puede observar que entre ellos se presentan diferencias muy pequeñas, lo que confirma que buena parte del aluminio activo en estos horizontes está asociado con sustancias húmicas formando complejos organometálicos. En los demás horizontes que presentaron propiedades ándicas (3C/A, 4Bs, 5Ab, 6Ab, 7Ab y 7Bwb), los valores de Alo, con un promedio de 9.49 %, superaron ampliamente los valores de Alp, con un promedio de 1.02 %, indicando que la mayor parte del Al que se libera en ellos se polimeriza y precipita con Si, produciendo altas cantidades de alofana e imogolita (Shoji *et al.*, 1996; Van Breemen & Buurman, 1998). Los valores de la relación Alp/Alo de la Tabla 4 confirman lo que se dijo anteriormente, definiendo los dos primeros horizontes como no alofánicos (Alp/Alo >0.5) y los restantes como alofánicos (Alp/Alo <0.5) (Malagón *et al.*, 1991; Jaramillo *et al.*, 2006).

Tabla 3: Contenidos de Al, Fe y Si extraídos con pirofosfato de sodio y con oxalato ácido de amonio en los horizontes del Perfil Paysandú.

Horizonte	Profundidad cm	Extracción con pirofosfato de sodio %			Extracción con oxalato ácido de amonio %		
		Alp	Fep	Sip	Alo	Feo	Sio
A	10-23	1.63	0.34	0.36	1.74	0.63	0.29
2B/A	23-30/34	3.78	0.11	0.86	4.72	0.31	1.30
3C/A	30/34-38/41	1.83	0.23	0.11	9.15	1.00	3.88
4Bs	38/41-50	0.96	0.50	0.11	8.47	5.78	3.80
5Ab	50-65	0.90	0.19	0.07	9.40	0.85	4.37
6Ab	65-75	0.79	0.09	0.06	9.20	0.44	4.56
7Ab	75-93	0.84	0.05	0.05	10.50	0.38	5.26
7Bwb	93-103	0.82	0.06	0.05	10.20	0.45	5.25
8Ab	103-113	1.65	1.80	1.53	0.30	0.09	0.10
9C	113+	0.99	1.62	1.07	0.15	0.11	0.04

El pH en NaF de los horizontes ándicos estuvo entre 10.50 y 11.43 y para los horizontes 8Ab y 9C

Tabla 4: Propiedades ándicas y otras relacionadas con génesis y clasificación de los horizontes del Perfil Paysandú.

Horizonte	Profundidad cm	Propiedades ándicas				pH NaF 1:50
		Da (mg/m^3)	FF %	Alo + 1/2Feo %	Alp/Alo	
A	10-23	0.65	94.91	2.05	0.94	10.50
2B/A	23-30/34	0.65	98.71	4.88	0.80	11.40
3C/A	30/34-38/41	0.66	98.89	9.65	0.20	11.43
4Bs	38/41-50	0.56	98.95	11.36	0.11	11.13
5Ab	50-65	0.52	98.96	9.82	0.10	10.80
6Ab	65-75	0.49	98.97	9.42	0.09	10.95
7Ab	75-93	0.43	99.12	10.69	0.08	10.60
7Bwb	93-103	0.45	99.07	10.42	0.08	10.69
8Ab	103-113	0.74	53.83	0.34	5.56	11.20
9C	113+	0.79	39.96	0.21	6.45	9.40

fue de 11.20 y 9.40, respectivamente. El sistema de clasificación taxonómica de suelos del USDA (Soil Survey Staff, SSS, 1999, 2014), indica que un pH en NaF de 9.40 o más es un fuerte indicador de que minerales de bajo rango de ordenamiento dominan el complejo de cambio del suelo. Los valores tan altos de pH en NaF para los horizontes 8Ab y 9C, que no cumplieron con los requerimientos para ser considerados horizontes con propiedades ándicas, se podrían deber a procesos de translocación que incorporaron a estos últimos horizontes materiales provenientes de los horizontes suprayacentes, o a la presencia de otros compuestos no cristalinos diferentes a los aluminosilicatos producidos por la meteorización de la ceniza volcánica.

Desde el punto de vista pedogenético cabe destacar la gran cantidad de límites abruptos y muy abruptos, e irregulares, que se presentan en este suelo entre los horizontes A - 2B/A - 3C/A - 4Bs - 5Ab (Figura 2. Este tipo de límites define la presencia de discontinuidades litológicas en el perfil y evidencia la pérdida de por lo menos algunos horizontes de suelos (faltan horizontes A en algunas secuencias), si no de suelos completos, en épocas pasadas por efecto de fenómenos de erosión intensos asociados, probablemente, a climas relativamente secos que ya se han documentado (Salazar *et al.*, 2008).

3.4. Clasificación taxonómica

Orden: El suelo presentó propiedades ándicas en más del 60 % de los primeros 60 cm medidos desde la superficie del suelo mineral, por lo que se clasifica como Andisol.

Suborden: El suelo no cumplió con los requisitos para ser clasificado como Aquand, ya que no posee un epipedón hístico, ni está sometido a condiciones ácuicas a una profundidad entre 40 y 50 cm medidos desde la superficie del suelo mineral, donde no se observaron evidencias de reducción, ni concentraciones redox y se definió un valor de Chroma superior a 2. El suelo no presentó régimen de temperatura gélido ni crúico, ni régimen de humedad tórrico, xérico o ústico, por lo que se clasifica como Udand.

Gran grupo: El suelo no presentó un horizonte plácico ni un horizonte cementado dentro de los primeros 100 cm, por lo que no se clasificó como Placudand ni como Durudand. No cumple con los requerimientos de color ni de espesor para ubicarse en el Gran grupo Melanudands. Aunque no se evaluó la retención de humedad a 1500 kPa, Jaramillo *et al.* (2006) afirman que cuando estos suelos están secos al aire, presentan humedades cercanas al 13 % y a capacidad de campo muy pocos presentan humedades mayores al 100 %; por lo que la humedad retenida a 1500 kPa debe estar comprendida entre estos dos valores (13 y 100 %). Teniendo en cuenta que el potencial del agua del suelo en punto de marchitez permanente está más cercano al potencial del agua del suelo seco al aire y que la curva de humedad característica de los Andisoles cambia muy poco en este rango de tensiones, puede suponerse que la retención de humedad a 1500 kPa está por debajo del 70 %, lo que implica que no se cumple con el requerimiento de retención de humedad para poder clasificar el suelo en el Gran grupo Hydrudands o en algún Subgrupo Hydric. El suelo cumplió con los requerimientos de profundidad, de espesor y con el contenido de carbono orgánico (mayor a 6 % como promedio y mayor a 4 % en cada horizonte) necesarios para ser clasificado como Fulvudand.

Subgrupo: El suelo no presentó un contacto lítico dentro de los primeros 50 cm, por lo que no cumple con los requerimientos para ser clasificado como Lithic Fulvudand. Tampoco está sometido a condiciones ácuicas, ni se observaron concentraciones redox a una profundidad entre 50 y 100 cm, medidos desde la superficie del suelo mineral, por lo que no se clasifica como Aquic Fulvudand. No presenta saturación con agua dentro de los primeros 100 cm, medidos desde la superficie del suelo mineral, por 20 o más días consecutivos o por 30 o más días acumulativos y se asume que el contenido de agua retenida a 1500 kPa es menor a 70 %, por lo que el suelo estudiado no puede clasificarse como Oxyaquic Fulvudand ni como Hydric Fulvudand. El suelo cumplió con una suma de bases extractables con acetato de amonio más aluminio intercambiable de menos de 2.0 cmol (+)/kg de suelo, en un espesor de más de 30 cm, a una profundidad entre 25 y 100 cm medidos desde la superficie del suelo mineral, por lo que se clasificó como Acrudoxic Fulvudand.

Familia: El suelo presentó propiedades ándicas en más del 90 % de la sección control para las clases por tamaño de partícula (desde el horizonte A hasta el horizonte 7Bwb), por lo que se utilizaron las clases sustitutas para clase por tamaño de partícula, siendo un suelo Medial. La clase por mineralogía fue mezclada, ya que no se cumplió el requisito de $[8 \text{ Sio} + 2 \text{ Feo}]$ mayor o igual a 5 % en el horizonte A; el régimen de temperatura del suelo se definió como isotérmico. Con las consideraciones anteriores, el suelo estudiado cumple con los conceptos centrales del sistema de clasificación taxonómica de suelos del USDA (Soil Survey Staff, SSS, 2014) para ser clasificado a nivel de familia, como Acrudoxic Fulvudand, medial, mezclado, isotérmico.

4. CONCLUSIONES

En este suelo, en campo se pudieron definir varios suelos enterrados con base en cambios de color.

El alto contenido de M.O. superficial está en concordancia con el clima frío húmedo de la zona y con la formación de complejos organometálicos que protegen la M.O. de la mineralización. Sin embargo, los bajos contenidos de bases intercambiables y de fósforo disponible, así como la alta acidez, implican que el suelo estudiado es de muy bajo nivel de fertilidad natural.

Los horizontes A, 2B/A, 3C/A, 4Bs, 5Ab, 6Ab, 7Ab y 7Bwb, cumplieron con todos los requerimientos para ser considerados materiales con propiedades ándicas. Los horizontes A y 2B/A, se clasifican como no alofánicos, mientras que los demás horizontes ándicos se clasifican como alofánicos. Los horizontes 8Ab y 9C no presentaron propiedades ándicas.

El suelo estudiado registra evidencias de ser poligenético, así como de fenómenos de erosión asociados a cambios climáticos drásticos.

Por presentar propiedades ándicas en los 100 cm superficiales, estar en régimen de humedad údico y de temperatura isotérmico, no cumplir con el índice Melánico a pesar del alto contenido de M.O. superficial, tener una CICE muy baja, así como por su composición granulométrica y mineralógica, el suelo se clasificó como un Acrudoxic Fulvudand, medial, mezclado, isotérmico.

Referencias

Caballero, B. & Jaramillo, D. F. (2007). Humedad crítica y repelencia al agua en Andisoles bajo cobertura de *Cupressus lusitanica* y *Quercus humboldtii* en la cuenca de la quebrada Piedras

- Blancas (Medellín, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 60 (2), 4001–4024.
- Castro, H. E. & Gómez, M. I. (2010). Fertilidad de Suelos y Fertilizantes. En: Ciencia Del Suelo: Principios Básicos. *Colombia, editorial: Sociedad Colombiana De La Ciencia Del Suelo*. 213–303.
- De los Ríos, J. C., Gallego, A. F., Vélez, L. D., Agudelo, J. I., Toro, L. J., Lema, A. J. & Acevedo, L. I. (2004). Caracterización y evaluación de agroecosistemas a escala predial. Un estudio de caso: Centro Agropecuario Paysandú (Medellín, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 57(2), 2467–2489.
- Departamento Administrativo de Planeación. Alcaldía de Medellín. (2008). Santa Elena 2008-2020. Proceso participativo para la gestión estratégica del corregimiento de Santa Elena. 134.
- Flórez, M. T., Parra, L. N. & Jaramillo, D. F. (2006). Los fitolitos como una herramienta pedogenética en un Andisol de la cuenca de Piedras Blancas, Colombia. *Suelos Ecuatoriales*, 39 (1), 88-94.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC. (2006). Métodos analíticos del laboratorio de suelos, 6, 648.
- Jaramillo, D. F. (2009). Variabilidad espacial de las propiedades ándicas de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño (Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 62(1), 4907–4921.
- Jaramillo, D. F., Flórez, M. T. & Parra, L. N. (2006). Caracterización de un Andisol de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Oriente Antioqueño, Colombia. *Suelos Ecuatoriales*, 36 (1), 61–71.
- Malagón, D., Pulido, C. & Llinás, R. (1991). Andisoles. Investigaciones. Subdirección Agrológica. IGAC. Santa Fé de Bogotá D.C. 3 (1), 118.
- Pansu, M. & Gautheyrou, J. (2006). Handbook of Soil Analysis. Mineralogical, Organic and Inorganic Methods. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 993.
- Salazar, S., González, L. H. & Arias, L. A. (2008). Litoestratigrafía y pedoestratigrafía de los depósitos recientes en el Altiplano de Santa Rosa de Osos (ASRO). *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 23, 21–31.
- Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A., Benham, E. C., & Broderson, W. D. editors. (2002). Field book for describing and sampling soils, Version 2.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.

- NICOLÁS PÉREZ ECHAVARRÍA, DANIEL JARAMILLO JARAMILLO, ORLANDO RUÍZ VILLADIEGO, LUIS PARRA SÁNCHEZ
- Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren, R. & Quantin, P. (1996). Evaluation and proposed revisions of criteria for Andosols in the world reference base for soils resources. *Soil Science*, 161, 604–615.
- Soil Survey Division Staff (SSDS). (1993). Soil Survey Manual. Handbook 18. USDA. Washington D.C. 437.
- Soil Survey Staff (SSS). (1999). Soil Taxonomy. A Basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2a ed. Agriculture Handbook N° 436. Soil Survey Staff. Washington D.C. 869.
- Soil Survey Staff (SSS). (2014). Keys to soil taxonomy. Twelfth Edition. USDA. Washington D. C. 360.
- Van Breemen, N. & Buurman, P. (1998). Soil formation. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht. 377.
- Zapata, R. (2004). Química de la acidez del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 236.

ESTUDIO NUMÉRICO DEL MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS EN FLUIDOS MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO^a

NUMERICAL STUDY OF THE MOVEMENT OF PARTICLES IN FLUIDS BY FINITE ELEMENT METHOD

JEISON VARGAS^b, CARLOS JACOME^c, CARLOS GIRALDO^d

Recibido 26-10-2016, aceptado 17-02-2017, versión final 24-02-2017.

Artículo Investigación

RESUMEN: En este trabajo se aborda el problema de un flujo bifásico, el cual consiste de la interacción de un fluido con partículas sólidas inmersas en él, debido a la dificultad teórica que aparece al calcular todos los esfuerzos provenientes de la interacción entre fluido-sólido o sólido-sólido, así como las condiciones de contorno; se propone un enfoque numérico en el que se simula el movimiento fundamentado en las ecuaciones macroscópicas tanto para el fluido como para las partículas sólidas. Se creó un compendio de programas en ROOT (ROOT, 2014)- Root es un entorno orientado a objetos para análisis de datos a gran escala desarrollado en el marco del experimento NA49 del CERN , <https://root.cern.ch/drupal->, que solucionan las ecuaciones de Navier-Stokes que describen la fase líquida usando el método de elemento finito, y para las partículas se usa un método explícito que soluciona las ecuaciones de movimiento de Newton, en donde conforme se realiza un paso en el tiempo, las posiciones de los sólidos y el campo de velocidades son calculadas iterativamente. La simulación numérica permite investigar la dinámica del sistema, y calcular tanto el movimiento de las partículas como el del fluido en cuestión, obteniendo de esta manera importantes características en el estudio de los flujos bifásicos, las cuales son contrastadas con resultados experimentales.

PALABRAS CLAVE: ecuación de movimiento de Newton; ecuación de Navier-Stokes; flujo bifásico; método del elemento finito; simulación.

ABSTRACT: In this paper we study a two-phase flow, which consists of the interaction between fluid with immersed solid particles to it, due to the theoretical difficulty that appears to calculate all the stress from the interaction of both solid-solid and fluid-solid, and the boundary conditions, we propose a numerical approach in which the movement is simulated, based on the macroscopic equations for both the fluid and the solid particles. We developed a compendium of programs in ROOT that solve the Navier-Stokes equations

^aVargas, J., Jacome, C. & Giraldo, C. (2016). Estudio numérico del movimiento de partículas en fluidos mediante el método de elemento finito. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 6 (1), 39–56. DOI: 10.15446/rev.fac.cienc.v6n1.60740

^bUniversidad Distrital Francisco José de Caldas, Grupo de Física Teórica y Desarrollo de Software, Bogotá. jeavargasf@correo.udistrital.edu.co

^cUniversidad Distrital Francisco José de Caldas, Grupo de Física Teórica y Desarrollo de Software, Bogotá.

^dUniversidad Distrital Francisco José de Caldas, Grupo de Física Teórica y Desarrollo de Software, Bogotá.

which describe the liquid phase using the finite element method, and an explicit method that solves the equations of motion of Newton for the solid particles; thus, at the step at the time increases the positions of the particles and the velocity field are calculated iteratively. The numerical simulation allows to understand the system dynamics, and calculate both the movement of the solid particles and the movement of the fluid. We got important features in the study of two-phase flows which are contrasted with experimental results.

KEYWORDS: finite element method; Navier-Stokes's equation; Newton's equations of motion; two-phase flow.

1. INTRODUCCIÓN

En el estudio de los flujos bifásicos se ha evidenciado que a pesar de que existan diversas teorías que indagan en las interacciones entre líquidos y sólidos (Hilton *et al.*, 2010; Hoomans, 2000; Deen *et al.*, 2007), no se conoce la naturaleza de las interacciones detalladas entre éstos, y su descripción total no ha sido aún recopilada en una teoría específica. De ahí que este trabajo procure proporcionar un enfoque más general en donde se puedan incluir todas las fuerzas de interacción entre las partículas y el fluido, por medio de los resultados numéricos para el campo de velocidades que resulta de la solución de la ecuación de Navier-Stokes. Una de las ecuaciones más completas que describe el movimiento de partículas sólidas en fluidos es la ecuación BBO (*Basset-Boussinesq-Oseen*) (Crowe *et al.*, 2012), la cual incluye términos de fuerza como el de la historia de Basset o el de masa añadida que generalmente son despreciados dado que complican bastante los cálculos. Sin embargo, aquí esas fuerzas aparecerán incluidas en la segunda ley de Newton, lo cual se verá evidenciado en conocer para cada partícula sólida su trayectoria $X(t)$. Existen trabajos experimentales sobre este fenómeno, tal como los estudiados en Werther (1999), Fortes *et al.* (1987), Huang *et al.* (2017), estos consisten básicamente en el estudio experimental de partículas en lechos fluidizados de dos o tres dimensiones, y sirven de sustento para contrastar los resultados acá obtenidos. El montaje experimental (Fortes *et al.*, 1987), consta de una cama o lecho de dos dimensiones presentado en la Figura 1. El fluido de trabajo que se suministra es *agua* de un tanque a presión a través de una válvula de aguja. Esta válvula permite un control fino de la velocidad de flujo de modo que hay una presión de trabajo bastante estable en la entrada del lecho fluidizado.

Con el fin de resolver el problema de las interacciones entre el sólido y el líquido, se toman como punto de partida las ecuaciones más generales y confiables que describen el comportamiento de los sólidos y de los fluidos. Estas son las ecuaciones de Navier-Stokes (1) para el líquido y las ecuaciones de Newton (2) para las partículas sólidas. Dada la complejidad connatural que aparece al pretender solucionar estas dos ecuaciones, que ciertamente están acopladas, es necesario abordar una solución numérica, permitiendo así obtener una descripción más exacta del problema, como lo es calcular el campo de velocidades, las trayectorias de las partículas sólidas, los esfuerzos que el fluido realiza sobre los sólidos y el movimiento inducido por parte de los sólidos en el fluido. De esta

manera, el dominio de flujo es discretizado para la implementación del método del elemento finito y se usa un esquema explícito para las ecuaciones de movimiento de Newton. Hay muy pocos trabajos en simulaciones tales como Patankar *et al.* (2000), Hu *et al.* (2001), además un desarrolló llamado *DSD / ST* (Deforming-Spatial-Domain/Space-Time), que es un procedimiento para los cálculos de elementos finitos que involucran fronteras móviles e interfaces (Tezduyar *et al.*, 1992; Tezduyar *et al.*, 1992b), los cuales son un importante precedente, porque uno de los más grandes retos de este trabajo consiste en manejar las fronteras conforme avanza el tiempo, dado que el número de partículas sólidas es muy grande, y realizar un enmallado dinámico que también cambie con el tiempo, que sea estable y que proporcione la solución para el campo de velocidades. De tal manera también se implementa un criterio de convergencia para dar validez a los resultados numéricos. Existen otros tipo de simulaciones que toman variantes del método de elemento finito (Rutger *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2014), con el fin de calcular las fuerzas de interacción cuando las fronteras de las partículas sólidas se encuentran, aunque, en algunas no se toma en cuenta el cambio de el campo de velocidades por la presencia de las partículas sólidas tal como se hace en el presente artículo.

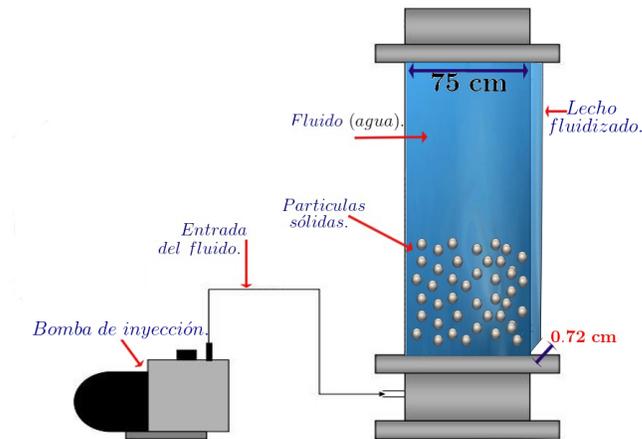


Figura 1: Aparato para crear lechos fluidizados bidimensionales. Fuente: Elaboración propia.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En este problema se considera un flujo bidimensional en un canal infinito de anchura W . El fluido en el canal se toma como *Newtoniano* e *incompresible*, se denotará su densidad como ρ_f y su viscosidad dinámica como μ_f . La coordenada x se toma en la dirección axial, es decir en la dirección del campo gravitacional e y está en la dirección del ancho del canal (perpendicular), como se muestra en la Figura 2. Hay N cilindros rígidos de diámetro d y densidad ρ_s , los cuales estarán en movimiento

dentro del canal, t es el tiempo, Ω_t es la región ocupada por el fluido para un tiempo (t) y Γ_t es la frontera de esta región, el segundo subíndice para la frontera Γ_{1i} , mostrado en la Figura 2, permite reconocer la frontera entre el cilindro i -ésimo y el fluido. Supongase que el centro del cilindro i -ésimo, donde $i = 1, 2, \dots, N$ se encuentra en la posición (X_i, Y_i) , su ángulo de rotación con respecto al ángulo inicial es Θ_i , sus componentes de la velocidad en la dirección x e y son (U_i, V_i) y su velocidad angular es Ω_i . En la Figura 2 se muestra la situación para $N = 2$ en el canal.

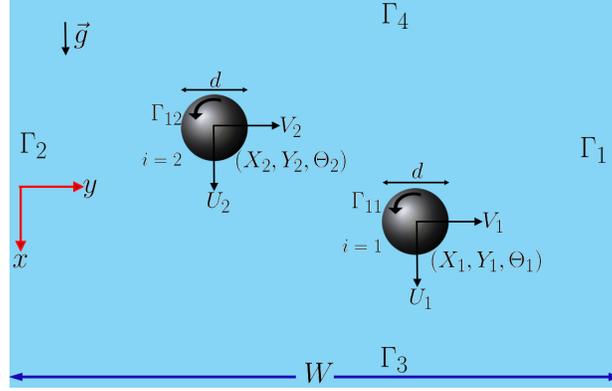


Figura 2: Esquema para dos partículas sólidas. Fuente: Elaboración propia.

Para este caso el movimiento del fluido y de los cilindros esta acoplado, ya que el fluido ejerce fuerzas y torques sobre los cilindros, cambiando así el movimiento de estos, y a su vez, el movimiento de los cilindros induce el flujo en el fluido por el cambio de la posición de la frontera y las velocidades. Entonces, se hace necesario utilizar la ecuación de *Navier - Stokes* (Kundu *et al.*, 2016; Donea & Huerta, 2003), ya que la velocidad $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ y la presión $p(\mathbf{x}, t)$ en el líquido se rigen por estas ecuaciones:

$$\rho_f \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \rho_f \mathbf{g} - \nabla p + \mu_f \nabla^2 \mathbf{u} \quad \text{en } \Omega_t, \quad \forall t \in (0, T) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

\mathbf{g} es la gravedad, $(0, T)$ es un intervalo de tiempo de cómputo y $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ es la condición de incompresibilidad.

Por otra parte, el movimiento de los cilindros satisface la segunda ley de Newton, la cual se puede escribir de una forma más generalizada comprometiendolos torques y las fuerzas simultáneamente,

$$\mathbf{M} \frac{d\mathbf{U}_i(t)}{dt} = \mathbf{F}_i \quad (2)$$

y la velocidad de la partícula i -ésima,

$$\frac{d\mathbf{X}_i(t)}{dt} = \mathbf{U}_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad \forall t \in (0, T) \quad (3)$$

En donde $\mathbf{M} = \text{diag}\{m, m, I\}$ es la matriz diagonal de masa, I el momento de inercia de los cilindros y m es su masa, $\mathbf{U}_i(t) = (U_i, V_i, \Omega_i)$ es el vector velocidad, $\mathbf{X}_i(t) = (X_i, Y_i, \Theta_i)$ es el vector de posición, $\mathbf{F}_i(t) = (F_{ix}, F_{iy}, F_{im})$ es el vector de fuerza que actúa sobre el cilindro i -ésimo. Es de resaltar la importancia que el vector de fuerza contiene la fuerza total que actúa sobre cada partícula, incluyendo un término de cuerpo como consecuencia de la gravedad y un término de superficie resultante de los esfuerzos del fluido sobre el sólido.

Las ecuaciones diferenciales (1) y (2) que describen el movimiento de las partículas y del fluido deben satisfacer condiciones de frontera Γ_t , en general Γ_t se puede dividir en dos partes $(\Gamma_t)_g$ y $(\Gamma_t)_h$ conocidas como condiciones de frontera de Dirichlet y Neumann respectivamente (Chung, 2010), que consisten en el conocimiento del campo de velocidades en la frontera y del esfuerzo básicamente.

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_g \text{ en } (\Gamma_t)_g \quad \forall t \in (0, T) \quad (4)$$

y

$$\boldsymbol{\tau}\mathbf{n} = \mathbf{h} \text{ en } (\Gamma_t)_h \quad \forall t \in (0, T) \quad (5)$$

Aquí \mathbf{u}_g es un valor prescrito de la velocidad y \mathbf{h} el esfuerzo, sobre los cuales se discutirá su valor ulteriormente, $\boldsymbol{\tau} = -p\mathbf{I} + \mu_f(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)$ es el tensor de esfuerzos y \mathbf{n} es el vector normal en $(\Gamma_t)_g$.

Los cilindros que se estudian son más densos que el fluido $\{\rho_s > \rho_f\}$, y parten de un fluido inicialmente en reposo. Haciendo referencia a la Figura 1, se denota como Γ_{1i} la frontera en la superficie del cilindro i -ésimo. También hay que hacer uso de la condición de no deslizamiento, la cual enuncia que la velocidad del fluido en un punto (x, y) en Γ_{1i} es igual a la velocidad del cilindro en el mismo punto, lo que se puede escribir de la manera siguiente:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= [U_i - \Omega_i(y - Y_i)]\hat{e}_x + [V_i + \Omega_i(x - X_i)]\hat{e}_y \\ \forall(x, y) \text{ que satisfaga } &(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 = d^2/4 \end{aligned} \quad (6)$$

En las dos fronteras de los canales estacionarios Γ_1 y Γ_2 , la condición de no deslizamiento exige que la velocidad del fluido sea cero. Teóricamente el canal es infinitamente largo, aunque el dominio computacional se toma lejos de los cilindros con el fin de disminuir el enmallado. Por lo tanto, en el límite Γ_3 , el cual se encuentra lo bastante alejado de los cilindros se supone que la perturbación causada por el movimiento de los cilindros es muy pequeña hasta el punto de hacerse cero, de esta manera,

$$\mathbf{u} = \mathbf{0} \text{ en } \Gamma_1, \Gamma_2 \text{ y } \Gamma_3 \quad (7)$$

Y muy por detrás del último cilindro, en la frontera Γ_4 , se aplica la condición de tracción libre, lo que implica que la fuerza debida al esfuerzo es nula.

$$\boldsymbol{\tau}\mathbf{n} = \mathbf{0} \text{ en } \Gamma_4 \quad (8)$$

Además, si se supone que el líquido está inicialmente en reposo, se tienen las siguientes condiciones iniciales: Su velocidad es cero y la presión es hidrostática, y los cilindros tienen una posición inicial bien definida, lo que se reduce a:

$$\mathbf{u}(x, 0) = \mathbf{0} \text{ en } \Omega_0, \quad (9)$$

$$\mathbf{X}_i(0) = \mathbf{X}_{i0} \text{ y } \mathbf{U}_i(0) = \mathbf{0} \quad \text{Para } i = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (10)$$

En el caso donde el número de partículas es muy grande, se hizo necesario recurrir a generar números aleatorios dentro del dominio, para así establecer las componentes de los vectores de posición inicial $\mathbf{X}_i(0)$, siempre y cuando se garantice que dos partículas no se encuentren en el mismo lugar en $t = 0$ y que se encuentren dentro del canal.

Entonces, para un tiempo mayor que cero, se dejan los cilindros libres para que se desplacen dentro del fluido, y lo que se busca es conocer el movimiento de estos cilindros $\mathbf{X}_i(t)$ y el campo de velocidades para el fluido $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$, con el fin de calcular la velocidad de cada uno de los cilindros mediante la condición de no deslizamiento (6) para así determinar $\mathbf{U}_i(t)$.

3. METODOLOGÍA

El desarrollo de esta simulación compromete aplicar el Método del elemento finito para las ecuaciones de Navier-Stokes descrito (Chung, 2010; Rannacher, 2000), de igual manera solucionar la ecuación de Newton de manera explícita, en busca de ilustrar a manera general el procedimiento se diseñó el diagrama de flujo mostrado en la Figura 3.

3.1. Esquema Explícito

El siguiente esquema corresponde al esquema explícito para la solución de las ecuaciones de movimiento de Newton.

1. **Inicio:** Se establecen las condiciones iniciales para el campo de velocidad y la presión del fluido

$$t_0 = 0, \quad n = 0 \quad (\text{donde } n \text{ es el índice para el paso de tiempo.})$$

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}(t_0), 0) = 0, \quad p(\mathbf{x}(t_0), 0) = \rho_f g x(t_0) \quad (11)$$

y se definen los vectores iniciales de posición y velocidad para cada una de las partículas.

$$\mathbf{X}_i(t_0) = \mathbf{X}_{i0}, \quad \mathbf{U}_i(t_0) = 0, \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

ALGORITMO DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA.

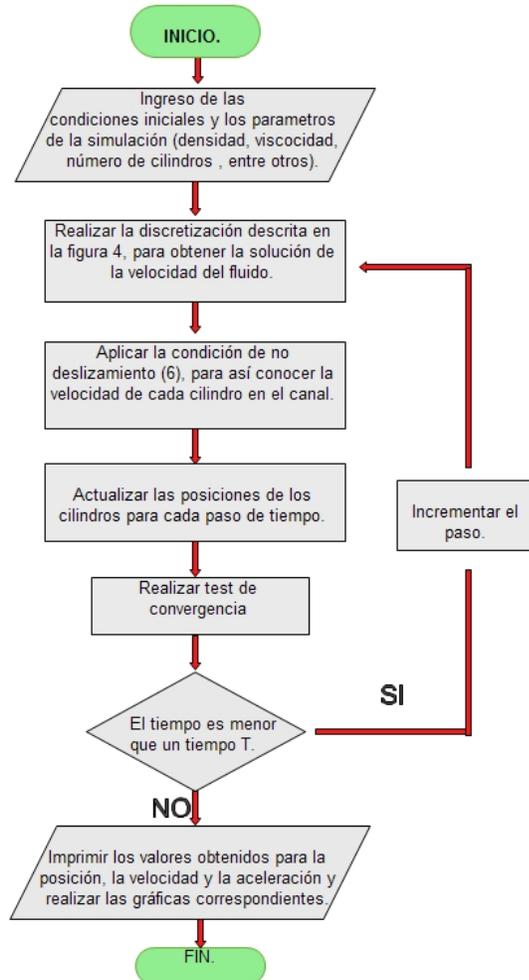


Figura 3: Diagrama de flujo para el esquema numérico. Fuente: Elaboración propia.

2. **Actualización:** Escogiendo un paso de tiempo apropiado Δt_{n+1} .

$$t_{n+1} = t_n + \Delta t_{n+1}$$

$$\mathbf{X}_i(t_{n+1}) = \Delta t_{n+1} \mathbf{U}_i(t_n) \quad (13)$$

y

$$\mathbf{U}_i(t_{n+1}) = \mathbf{U}_i(t_n) + \mathbf{a}_i(t_n) \Delta t_{n+1} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

Donde, $\mathbf{a}_i(t_n)$ representa la aceleración del cilindro i -ésimo, que puede ser obtenida a partir de la ecuación (2) multiplicando por la inversa de la matriz diagonal de masa a ambos lados.

$$\mathbf{a}_i = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F}_i \quad (15)$$

En donde $\mathbf{M}^{-1} = \text{diag} \left\{ \frac{1}{m}, \frac{1}{m}, \frac{1}{I} \right\}$ representa la inversa de la matriz diagonal de masa.

3. **Remallado y proyección:** Al obtener las posiciones $\mathbf{X}_i(t_{n+1})$ de los cilindros, se genera una nueva malla $\mathbf{x}(t_{n+1})$ y el campo de velocidades $\mathbf{u}(\mathbf{x}(t_n), t_n)$ tiene que ser proyectado en el nuevo enmallado $\mathbf{u}(\mathbf{x}(t_{n+1}), t_n)$.
4. En la nueva malla $\mathbf{x}(t_{n+1})$, con $\mathbf{u}(\mathbf{x}(t_{n+1}), t_n)$ como valores iniciales y $\mathbf{U}_i(t_0)$ prescrito en la superficie de los cilindros, se realiza la discretización explicada en la sección 3.2 con el fin de obtener la solución para la velocidad $\mathbf{u}(\mathbf{x}(t_{n+1}), t_{n+1})$, y para que calcule las fuerzas en los cilindros $\mathbf{F}_i(t_{n+1})$.
5. **Convergencia:** Para esta condición, se comparan dos valores de la velocidad para un tiempo fijo, esto es

$$\lambda = \| \mathbf{U}_i^{(k)}(t_{n+1}) - \mathbf{U}_i^{(k-1)}(t_{n+1}) \| \quad (16)$$

Donde $\mathbf{U}_i^{(k)}(t_{n+1})$ es el valor de la velocidad de la partícula a un valor fijo t calculado a partir de un número k de iteraciones, si λ es un valor muy grande comparado con un valor anterior entonces los valores no están presentando convergencia, de tal manera que el programa en este punto se romperá, de lo contrario,

$$\mathbf{U}_i^{(k)}(t_{n+1}) = \mathbf{U}_i(t_{n+1}) \quad (17)$$

el criterio anterior se tiene que realizar para cada una de las partículas y además para el campo de velocidades. En las iteraciones del esquema para las ecuaciones de Newton, las fuerzas que actúan en los cilindros y los residuos de la iteración son monitoreados para así garantizar la convergencia del campo de velocidades en cada paso de tiempo.

La escogencia del paso en el tiempo depende de algunos factores, en particular un criterio para escoger el paso es limitar la distancia que el cilindro pueda desplazarse conforme avanza el tiempo, así como restringir el aumento máximo de las velocidades en los cilindros y evitar las colisiones entre los sólidos y entre ellos con las paredes del canal. Además de eso hay que dar una estimación inicial para la velocidad de los cilindros. Dicha estimación usualmente causa variaciones en la iteración, de modo que se requieren más iteraciones para alcanzar la convergencia, e incluso así en algunos casos los programas se rompen.

6. Si el tiempo es menor que un tiempo T correspondiente a la longitud del intervalo de interés, entonces incrementar n y empezar en el paso dos de nuevo, de lo contrario detener el programa.

Dificultades La simulación numérica conlleva con sigio algunas dificultades, entre ellas se encuentra programar la simulación de tal manera que genere un remallado automático, ya que este se debe

realizar a cada paso de tiempo, y debe corresponder con las posiciones de las partículas en ese instante. Además, aparece la dificultad de proyectar el campo de velocidades en la malla que aparezca de incrementar el paso de tiempo, y por supuesto lograr que los programas creados para discretizar las ecuaciones acopladas de Navier-Stokes y de Newton sean tanto eficientes como estables.

Por otra parte, el programa ROOT, aunque fue creado por físicos, es generalmente usado en física de altas energías en el CERN, y no se cuentan con muchos trabajos en el campo de la dinámica de fluidos, pero dado que está diseñado para ofrecer una gran eficiencia computacional y cuenta con herramientas matemáticas, del álgebra matricial, visualización y análisis de gráficas, es muy útil para este tipo de trabajos que requieren de simulaciones numéricas y del análisis de los datos que se obtengan. De modo que se está usando una herramienta computacional de gran significación creada en uno de los experimentos más importantes de la ciencia e incursionando en un campo en el cual no existen trabajos a la fecha.

3.2. Discretización de las ecuaciones de Navier-Stokes

Se realiza una aproximación unidimensional al problema, implementando el elemento finito, a través de una interpolación de Lagrange (Chung, 2010), asumiendo la simetría de la distribución de los cilindros en el canal, se realiza un mallado que responde a la localización de los cilindros. El canal creado que se muestra en la Figura 4, es uno de los resultados obtenidos a partir de los programas desarrollados en *Root*; éstos permiten crear N partículas dentro del canal y observar su evolución en el tiempo mediante el uso del esquema explicado en la sección 3.1, de igual manera, los cálculos para la ecuación de Navier-Stokes se hicieron en este programa y las gráficas a partir de los datos obtenidos.

Se encontró que para que la simulación fuese más estable, es conveniente aumentar la densidad de los elementos y nodos cerca de las partículas sólidas como se muestra en Figura 4, ya que la mayor interacción entre el fluido y los cilindros se da justamente en su frontera y contorno más cercano; de esta manera también se contribuye a disminuir el error de discretización, ya que la malla está siendo refinada conforme avanza el tiempo.

3.2.1. Método de Galerkin

La idea general de esta formulación de elemento finito es aproximar la variable de la ecuación diferencial como una combinación lineal de funciones de prueba ϕ_i ,

$$\bar{u}(x, y) = \sum_{i=1}^n C_i \phi_i \quad (18)$$

Donde C_i son constantes y las funciones de prueba que se han escogido deben satisfacer todas las condiciones globales de contorno para este problema en cuestión.

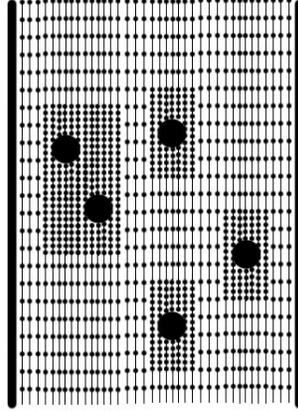


Figura 4: Discretización unidimensional del canal para $N = 5$, resultado de la simulación en Root. Fuente: Elaboración propia.

En este caso particular, la aproximación se realiza sobre la velocidad resultante de la ecuación diferencial de Navier-Stokes, por lo cual aparece un residuo (ε) proveniente de aproximar la solución, la idea básica es entonces construir un proceso matemático en el cual dicho error que aparece se minimice, de tal manera que se haga nulo en el sentido ponderado. Esto se logra mediante una proyección ortogonal o producto interno entre las funciones de prueba ϕ_i y el residuo en el dominio ε , de modo que:

$$\int_{\Omega} \varepsilon \phi_i d\Omega = (\varepsilon, \phi_i) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{19}$$

Uno de los pasos mas cruciales en el análisis del método es la escogencia de las funciones de interpolación, ya que pueden o no converger a la solución de la ecuación diferencial en cuestión; en general, las funciones de interpolación son polinomios de cierto grado o productos de éstos; para este caso se hizo la escogencia de la función de interpolación de Lagrange L_N , la cual se define como:

$$L_N = \prod_{M=1, M \neq N}^n \frac{x - x_M}{x_N - x_M} \tag{20}$$

Aquí el elemento es dividido en segmentos de la misma longitud en n nodos, como se muestra en la figura 5.

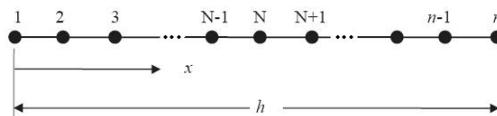


Figura 5: Discretización unidimensional mediante polinomios de Lagrange. Fuente: Elaboración propia.

Los polinomios de Lagrange se eligieron ya que satisfacen las condiciones de contorno, y su grado es de primer orden, debido a que es menester conocer los esfuerzos que aparecen de la interacción entre el fluido y las partículas sólidas, para lo cual basta con conocer la primera derivada de la velocidad, aunque dada esta escogencia se debe aumentar el mallado para que disminuya el error, también es necesario incrementar la densidad de la malla alrededor de los cilindros, porque de otra manera la iteración podría no converger.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el primer cómputo se eligió que el fluido fuese agua, $\rho_f = 1000Kg/m^3$, y por tanto $\mu_f = 1 \times 10^{-2} Poise = 1 \times 10^{-3} N \cdot s/m^2$, además la densidad de los sólidos se escogió tan solo un poco mayor que la del agua $\rho_s = 1100Kg/m^3$. Por otra parte, este cómputo se realizó con tan solo un partícula sólida en el canal ($N = 1$), y los resultados que se obtuvieron tanto para la posición como para la velocidad se muestran gráficamente en las Figuras 6 y 7 respectivamente.

Como se mencionó, para la discretización se usa el mallado descrito en la Figura 5, el diámetro del cilindro es $d = 2cm$ y el ancho del canal es $W = 2m$. En este cómputo el cilindro se dejó caer desde el centro del canal y se obtuvo su posición como función del tiempo, la cual se muestra en la Figura 6, allí se evidencia un movimiento que tiende a mantener una velocidad constante, lo que se sustenta en la Figura 7, la cual muestra que la velocidad aumenta hasta su máximo en unos dos segundos y después de esto propende a mantener un valor constante en el transcurso del tiempo.

Esta tendencia que muestra la velocidad a permanecer constante da buen indicio de los resultados obtenidos para este caso, ya que este comportamiento es justamente el que la Ley de Stokes explica (Kundu *et al.*, 2016), físicamente las fuerzas de arrastre y gravitatoria que actúan sobre el sólido se equiparan, lo que conlleva a que la aceleración del sólido se haga nula, por lo cual la velocidad tiende a ser constante, alcanzando así un valor crítico o máximo al moverse dentro de un fluido, tal como ocurrió en este caso, más aún haciendo uso de dicha ley la velocidad crítica es de $1.9m/s$, obteniendo un error de menos del 1% respecto a la media de los valores obtenidos numéricamente. Otro de los resultados importantes que se obtuvieron mediante las simulaciones realizadas, corresponden al caso de dos partículas sólidas en el canal ($N = 2$), en donde los parámetros que se escogieron fueron; de nuevo agua y la densidad de los sólidos ligeramente mayor a la del agua $\rho_s = 1100Kg/m^3$. El diámetro de los dos cilindros es igual $d_1 = d_2 = 0.5cm$, y el ancho del canal es $W = 20cm$. En este cómputo se ubicó el primer sólido en una posición con un mayor valor de la coordenada x respecto al segundo, es decir, $X_1 > X_2$, análogo a la Figura 2, y a partir de dicha configuración, se estudió el comportamiento de los dos sólidos después que empiezan a moverse dentro del fluido.

Cuando se estudia la interacción de dos cilindros dentro del canal la solución numérica ofrece como

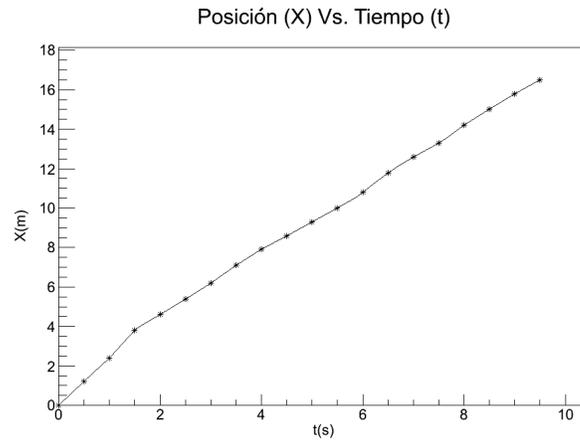


Figura 6: Posición $X(t)$ para un solo cilindro en el canal. Fuente: Elaboración propia.

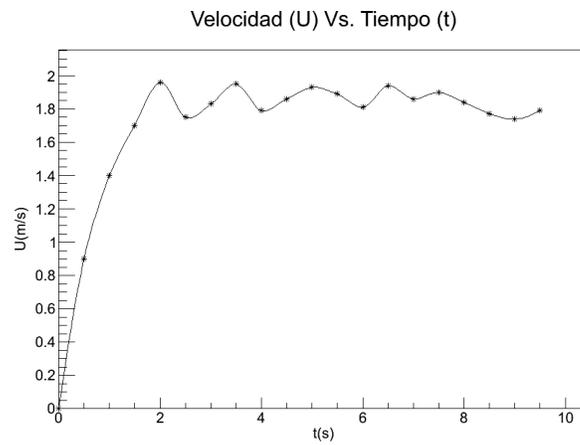


Figura 7: Velocidad $U(t)$, con un solo cilindro en el canal. Fuente: Elaboración propia.

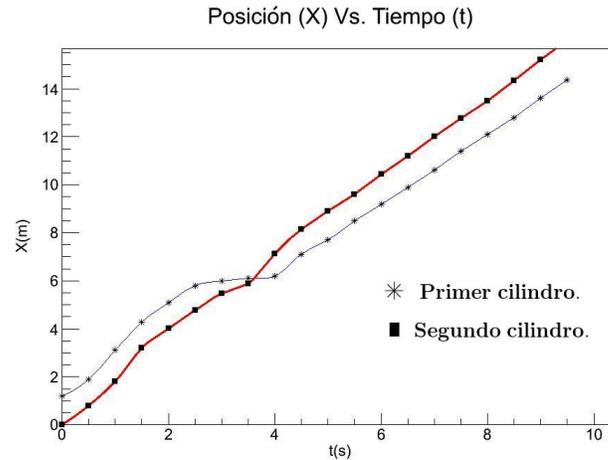


Figura 8: Posición $X(t)$, para dos cilindros dentro del canal. Fuente: Elaboración propia.

resultados las gráficas que se muestran en las Figuras 8 y 9, en donde se presentan los resultados obtenidos para las posiciones y velocidades de cada una de las partículas a medida que se desplazan dentro del lecho fluidizado conforme avanza el tiempo.

El resultado de la velocidad $U(t)$, adquirido mediante la solución numérica se encuentra expuesto en la Figura 9, allí se muestran dos velocidades que corresponden a cada uno de los cilindros por separado. Al indagar en la velocidad del primer cilindro se puede notar que ésta aumenta hasta un máximo en unos dos segundos, y luego de esto decrece hasta hacerse prácticamente cero; esto a simple vista parece ilógico o erróneo porque si dos cilindros se dejan caer en el canal de agua, en este caso no habría de existir algún motivo para que una de estas disminuyera su velocidad.

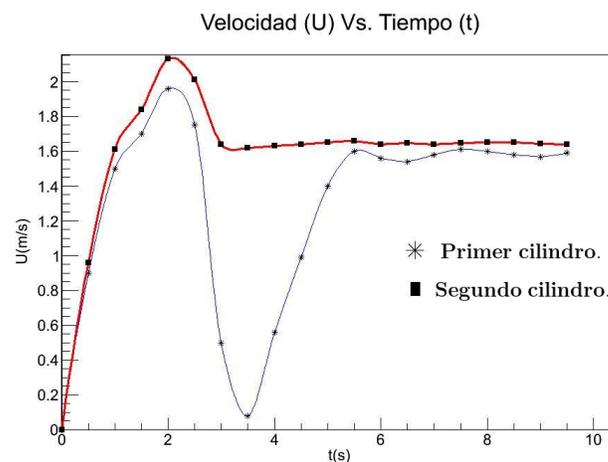


Figura 9: Velocidad $U(t)$, para dos cilindros en el canal. Fuente: Elaboración propia.

Este comportamiento se debe a que cuando se colocan los dos cilindros uno detrás del otro, y se

dejan caer bajo esa configuración, el segundo cilindro es arrastrado en la estela que deja el primero a su paso, y puede decirse que éste le abre paso al de atrás (*tal como los ciclistas en un velódromo*), de tal forma que esta partícula alcanza a la primera y ahí interactúan de modo que el cilindro de atrás pasa al primero, lo cual se evidencia en la gráfica del resultado de la simulación; además esto está acorde con lo que se conoce como *Drafting, Kissing y Tumbling*, los cuales son efectos importantes en la fluidización de camas de partículas con *agua*, así que estos resultados numéricos dan cuenta de los fenómenos descritos en los trabajos experimentales (Fortes *et al.*, 1987).

Lo descrito anteriormente se puede constatar en la gráfica presentada en la Figura 8, ya que justamente en el tiempo en que la velocidad de la primera partícula sólida tiende a hacerse nula es donde las trayectorias mostradas para la posición de las dos partículas se cruzan, lo que indica que fue en ese instante en donde una esfera alcanzó a la otra dando lugar al *kissing*, y después de ese momento la esfera que se encontraba detrás ahora toma la delantera, que es lo que se conoce como *tumbling*, que puede entenderse como un giro o rotación que da un sólido alrededor del otro. En realidad la simulación aún no incluye el caso en el que los cilindros realmente colisionen, físicamente el movimiento relativo entre ellos crea una fuerza de lubricación que los mantiene ligeramente separados, aunque para el caso de números de Reynolds bajos ($Re = \rho_f U d / \mu_f$), donde U es la velocidad del sólido, el número de Reynolds es un número adimensional que resulta de la comparación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas, si se disminuye el diámetro de los cilindros, se encontró que la simulación se rompe, dado que la iteración entre el esquema de Newton y las ecuaciones de Navier-Stokes no converge. Cuando los cilindros están muy cercanos uno del otro, aparentemente para bajos números de Reynolds las partículas realmente colisionan y por un instante permanecen pegadas una con la otra para luego realizar el *tumbling*. Dado esto, hay una restricción en la elección del diámetro de los cilindros, por ejemplo si $d = 0.1\text{cm}$ el número de Reynolds es del orden de $Re = 0.8$ y para este caso no se presenta convergencia según lo explicado, al realizar comparación de muchas simulaciones para diferentes diámetros, se estableció que estos han de ser mayores que 0.4cm , para que haya convergencia.

También se corrieron algunos otros programas con diferentes combinaciones en el diámetro de los cilindros, las densidades y el ancho del canal, y en los resultados arrojados aparecía de nuevo un instante en que ocurría el encuentro entre las partículas sólidas debido al arrastre (*drafting*), y en algunas ocasiones el *kissing*, es decir, el encuentro de dos partículas sólidas dentro del fluido, ocurría más de dos veces, lo que indica que un cilindro alcanzaba al otro y lo pasaba, luego de estar a la delantera canal abajo era alcanzado de nuevo por el otro cilindro y volvía a ocurrir de nuevo el fenómeno de *kissing y tumbling*.

Al colocar gran cantidad de partículas dentro del fluido, se obtienen resultados similares para la velocidad y la posición de cada uno de ellos, aunque el mecanismo de interacción suele presentarse

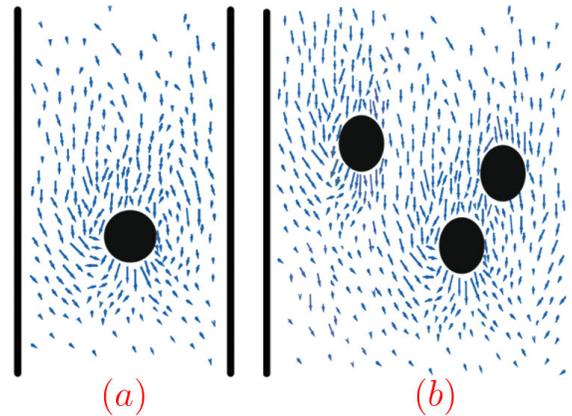


Figura 10: Resultado para el campo de velocidades $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$, (a) para un cilindro, (b) para 3 sólidos. Fuente: Elaboración propia.

de una manera más compleja; allí se siguen presentando intersecciones entre las trayectorias y los resultados para la velocidad se comportan similares a una función que oscila en el tiempo similar a la de la Figura 9, lo que evidencia que las mismas partículas provocan aceleraciones y desaceleraciones entre ellas mismas a lo largo del canal, en la Figura 10 se muestran dos gráficos para el campo de velocidad hallado numéricamente. El resultado mostrado en la Figura 10, manifiesta para un tiempo fijo la forma del campo de velocidades debido a la presencia del movimiento de las partículas en el fluido, y esta alteración del campo de velocidades, a su vez, establece qué trayectorias han de seguir las partículas una vez aumente el paso de tiempo (recuérdese la condición de no deslizamiento (6)). En las Tablas 1 y 2 se muestra el valor de λ , correspondiente al criterio de convergencia (16), ambas tablas muestran la convergencia de la simulación numérica, pero se puede notar que la convergencia es mucho mayor cuando se incrementa el número de elementos (n_{elem}), que para el caso en el que se aumenta el número k de iteraciones. La Tabla 1 presenta la convergencia para un número de iteraciones fija $k = 1000$, mientras se aumenta el número de elementos.

Tabla 1: Convergencia para un número de iteraciones fijo, $k = 1000$.

n_{elem}	λ
100	$7.7361x10^{-3}$
200	$2.8054x10^{-3}$
500	$6.0128x10^{-4}$
1000	$1.4475x10^{-4}$
1500	$3.9318x10^{-5}$
2000	$4.6352x10^{-6}$

En la Tabla 2 se muestra la convergencia para un número de elementos fijo $n_{elem} = 1000$, y se

incrementa el número de iteraciones en la misma tasa que se hizo con el número de elementos en la tabla 1, como resultado se obtiene que la convergencia es más lenta que en el caso anterior.

Tabla 2: Convergencia para un número de elementos fijo, $n_{elem} = 1000$.

k	λ
100	$1.3897x10^{-2}$
200	$1.2516x10^{-2}$
500	$1.1034x10^{-2}$
1000	$6.6021x10^{-3}$
1500	$3.5156x10^{-3}$
2000	$7.8229x10^{-4}$

Aún queda por resolver el problema: ¿qué ocurre cuando los cilindros se tocan?, ya que en ese instante las fronteras se encuentran en el mismo lugar del dominio y el programa automáticamente se rompe, igual sucede si algún cilindro toca la pared del canal; también se pretende realizar la simulación para otro tipo de geometrías y estudiar el movimiento de partículas inmersas en vórtices (flujos vorticiales).

5. CONCLUSIONES

Se creó un compendio de programas en *ROOT* que es un entorno orientado a objetos, el cual realiza una discretización unidimensional del dominio conforme avanza el tiempo y además permite variar el ancho del canal, las densidades de los sólidos y del líquido, la viscosidad cinemática, el diámetro de las partículas, su posición inicial y el número N de ellas, con el fin de solucionar las ecuaciones planteadas conforme evoluciona el sistema.

Para dos cilindros ($N = 2$), se obtuvo un resultado que concuerda con los datos experimentales de Fortes *et al.* (1987) conocidos como *drafting, tumbling y kissing*, los cuales desempeñan un papel fundamental en el estudio de los lechos fluidizados bidimensionales, se encontró que aunque los cilindros realmente no se tocan para grandes números de Reynolds, el esquema falla para pequeños números de Reynolds, dado que para esos números las partículas realmente colisionan, haciendo que el programa diverja, queda por tanto incluir en el programa el hecho de que las partículas colisionen. Para el caso $N = 1$ se evidenció un comportamiento que está sustentado en la Ley de Stokes para la velocidad límite hallando un error menor al 1% entre el resultado numérico y el predicho por la teoría.

Mediante la formulación de Galerkin se han discretizado las ecuaciones de Navier-Stokes en una dimensión con los elementos unidimensionales del polinomio de Lagrange, obteniendo así, como resultado las velocidades $U_i(t)$, con la que se mueven cada uno de los cilindros dentro del canal y

ESTUDIO NUMÉRICO DEL MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS EN FLUIDOS MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO
sus posiciones $X_i(t)$, para cualquier N arbitrario.

Se identificaron puntos críticos donde el programa falla, es decir, para diámetros de partículas menores a 0.4cm inmersas en agua, se cree que para estos valores, la fuerza que mantiene a los cilindros alejados unos de otros (fuerza de lubricación) es tan pequeña que estos alcanzan a colisionar, si se cambia la densidad del fluido, es necesario que $Re > 10$, lo cual implica que dependiendo del fluido el diámetro crítico tendrá que cambiar para que ocurran los fenómenos de *drafting*, *kissing* y *tumbling*.

Se crearon programas computacionales que conforme aumenta el paso del tiempo genera una nueva malla que se estructura de acuerdo con el cambio en las fronteras debido al movimiento de las partículas dentro del fluido, y presenta más densidad en el contorno de ellas con el fin de proporcionar mayor estabilidad en la simulación, además que con este esquema se computan todas las fuerzas que actúan sobre las partículas mediante la segunda ley de Newton y que generalmente son despreciadas.

Referencias

- Chen, L. & Huang, M. (2017). A DFFD simulation method combined with the spectral element method for solid-fluid-interaction problems. *Journal of Computational Physics*, 330, 749–769.
- Chung, T. (2010). *Finite Element Analysis in Fluid Dynamics*. New York: Cambridge
- Crowe, T., Schwarzkopf, D., Sommerfeld, M. & Tsuji, Y. (2012). *Multiphase Flows with Droplets and Particles*. London: CRC Press.
- Deen, N., Annaland, M., Van der Hoef, M. & Kuipers, J. (2007). Review of discrete particle modeling of fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, 62 (1), 28–44.
- Donea, J. & Huerta, A. (2003). *Finite Element Methods for Flow Problems*. England: Wiley.
- Fortes, A., Joseph, D. & Lundgen, T. (1987). Nonlinear mechanics of fluidization of beds of spherical particles. *Journal of Fluid Mechanics*, 177, 467–483.
- Hilton, J., Mason, L. & Clearly, P. (2010). Dynamics of gas–solid fluidised beds with non-spherical particle geometry. *Chemical Engineering Science*, 65, 1584–1596.
- Hoomans, B. (2000). *Granular dynamics of gas-solid two-phase flows*. Universiteit Twente.
- Hu, H., Patankar, N. & Zhu, M. (2001). Direct numerical simulations of fluid–solid systems using the arbitrary Lagrangian–Eulerian technique. *Journal of Computational Physics*, 26 (9), 1509–1524.

- Huang, R. F., Hsu, C. M., & Chen, Y. T. (2017). Modulating flow and aerodynamic characteristics of a square cylinder in crossflow using a rear jet injection. *Phys. Fluids*, 29 (1), 015103.
- Kundu, P., Cohen, A. & Dowling, D. (2016). *Fluid Mechanics*. U.S.A: Academic Press.
- Lee, T., Chang, Y., Choi, J., Kim, D, Liu, W. & Kim, Y. (2008). Immersed finite element method for rigid body motions in the incompressible Navier-Stokes flow. *Comput. Methods Appl. Math.*, 197, 2305–2316.
- Patankar, N., Singh, P., Joseph, D., Glowinski, R. & Pan, T. (2000). A new formulation of the distributed Lagrange multiplier-fictitious domain method for particulate flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 26 (9), 1509–1524.
- Rannacher, R. (2000). *Finite element methods for the incompressible Navier-Stokes equations*. Springer.
- Rutger, H.; IJzermans, A.; Hagmeijer, R.; Pieter, J.; (2007), Accumulation of heavy particles around a helical vortex filament. *Phys. Fluids*, 19(10), 107–102.
- Tezduyar, T., Behr, M. & Liou, J. (1992). A new strategy for finite element computations involving moving boundaries and interfaces—the DSD-ST procedure: I. The concept and the preliminary numerical tests. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 94(3), 339–351.
- Tezduyar, T., Behr, M. & Liou, J. (1992b). A new strategy for finite element computations involving moving boundaries and interfaces—the deforming-spatial-domain-space-time procedure: II. Computation of free-surface flows, two-liquid flows, and flows with drifting cylinders. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 94 (3), 353–371.
- The ROOT team. (2014). Suiza, Users guide 5.26, An Object-Oriented Data Analysis Framework. [Consultada en Agosto 31 de 2016]. Disponible en: <https://root.cern.ch/root/html/doc/guides/users-guide/ROOTUsersGuideA4.pdf>
- Werther, J. (1999). Measurement techniques in fluidized beds. *Powder Technology*, 102 (1), 15–36.
- Zhao, X., Glenn, C., Xiao, Z. & Zhang, S. (2014). CFD development for macro particle simulations. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 28(5), 232–249.

GOLD ELECTROLEACHING IN A POROUS BED REACTOR^a

ELECTROLIXIVIACIÓN DE ORO EN UN REACTOR DE LECHO POROSO

LUVER ECHEVERRY VARGAS^b, NÉSTOR ROJAS REYES^c

Recibido 17-02-2017, aceptado 13-03-2017, versión final 28-03-2017.

Artículo Investigación

ABSTRACT: The application of an electric potential difference on the leaching of an auriferous mineral typical of Colombian mining was analyzed in an electroleaching reactor. Electric potentials of 5, 30, and 60 volts were evaluated during 4, 6, and 20 hours. In each of the conditions evaluated, samples of the liquors were taken near the cathode and anode and were analyzed by atomic absorption spectrophotometry. It was observed that there is a direct relation between the applied electric potential and the migrational flow of the gold species to the anode. After the electroleaching process, the used electrodes were analyzed by SEM-EDX, where the presence of gold deposits was detected on the surface of the electrode under all the potential difference conditions applied. Based on the results obtained, a mechanism is proposed to explain the influence on the kinetics of gold cyanidation of the application of an electric potential difference on a column leaching process.

KEYWORDS: Electroleaching; cyanidation; dissolution kinetics; gold extraction.

RESUMEN: En un reactor de electrolixiviación de lecho poroso se analizó la aplicación de la diferencia de potencial eléctrico sobre la lixiviación de un mineral aurífero típico en la minería colombiana. Se evaluaron potenciales eléctricos de 5, 30 y 60 voltios durante 4, 6 y 20 horas, en cada una de las condiciones evaluadas se tomaron muestras de los licores en las inmediaciones del cátodo y del ánodo y se analizaron por espectrofotometría de absorción atómica. Se observa que existe una relación directa entre el potencial eléctrico aplicado y el flujo migracional de las especies de oro hacia el ánodo. Luego del proceso de electrolixiviación los electrodos utilizados fueron analizados por SEM-EDX, donde se detectó la presencia de depósitos de oro en la superficie del electrodo bajo todas las condiciones de diferencia de potencial aplicado. Con base en los resultados obtenidos, se propone un mecanismo para explicar la influencia en la cinética de cianuración de oro al aplicar una diferencia de potencial eléctrico a un proceso de lixiviación en columna.

PALABRAS CLAVES: electrolixiviación; cianuración; cinética de disolución; extracción de oro.

^aEcheverry Vargas, L. & Rojas Reyes, N.(2016). Gold electroleaching in a porous bed reactor. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 6 (1), 57–66. DOI: 10.15446/rev.fac.cienc.v6n1.62744

^bInstituto de minerales CIMEX, Facultad de minas, Universidad Nacional de Colombia, ljecheverryv@unal.edu.co.

^cInstituto de minerales CIMEX, Facultad de minas, Universidad Nacional de Colombia, nrrojasr@unal.edu.co.

1. INTRODUCTION

Gold complexes in an aqueous solution may exist in two oxidation states, aurous (Au^+) and auric (Au^{3+}). Thermodynamically speaking, these cations are stable in an aqueous solution. In order to stabilize these ions, it is necessary to introduce a complexing agent such as cyanide, thiosulfate, or thiourea, among others (Oraby *et al.*, 2015), and employ an adequate oxidizing agent, as no reaction will take place unless both are present in the solution (Nicol *et al.*, 1992). Complex formation due to the association of two or more simple species may give way to the formation of cationic, anionic, or neutral charge species. Depending on the number of charges in the components, the shape of the gold complex with cyanide is the anion $Au(CN)_2^-$. Chemical reactions in the formation of this complex due to a cyanidation process have the following fundamental stages: absorption of oxygen in the solution, transport of cyanide and dissolved oxygen to the solid-liquid interface, absorption of reactants (CN^- and O_2) and the solid surface, electrochemical reactions, desorption of soluble gold-cyanide complexes and other reaction products from the solid phase, and transport of desorbed products to the bottom of the solution (Marsden & House, 2006). The chemical reaction stage is rarely determining in most of the processes of gold complex formation. Therefore, mass transport is usually the stage that limits the reaction (Marsden & House, 2006).

The process of ionic species transport in a solution through a mineral porous bed appears under the application of a electric potential difference, and this is achieved by mass flow due to diffusion, migration, and electroosmosis. The contribution of each type of flow in the total mass flow is affected by factors such as the mineral's mineralogic composition, the solution's composition and conductivity, and the electrochemical properties of the species present in the fluid (Acar *et al.*, 1993). When an electric potential difference is applied on a mineral bed submerged in an electrolyte, the electric current is transported by the ions present in the solution. Electromigration is the term that describes the movement of individual ions in a solution induced by an applied electric current. Direction of ionic electromigration occurs toward the electrode with the opposite charge. Anions will move toward the anode and cations will move toward the cathode. The degree of migration will depend on the mobility of the ionic species (Reddy & Cameselle, 2009).

When an electric field is established throughout a capillary, excess counterions across the region of the electric double layer adjacent to the particles of the medium move toward the electrode with the opposite charge. The movement of these species generates a net tension that is transferred to the molecules of the surrounding fluid through viscous forces, producing a flow in the interstitial fluid known as the electroosmotic flow (Acar *et al.*, 1995; Valenzuela *et al.*, 2016). Under an electric potential difference, the electroosmotic flow depends mainly on the porousness and z-potential, and is independent from the size of the mineral bed pores. Therefore, the transport of species by electroosmosis is a phenomenon that may be significant in a leaching process (Acar *et al.*, 1995).

There are a large number of studies on the use of electro processing in the extraction of metals in solutions, however, the reactions when transferring metals in solutions of different chemical composition by electric current-electrochemical leaching occupy a special place in the studies of electrochemical processes (Kenzhaliyev *et al.*, 2015). This work investigates the influence of an electric potential difference on gold leaching in an auriferous mineral by applying electric potentials of 5, 30, and 60 volts in 4, 6, and 20 hours.

2. EXPERIMENTAL

In order to meet the goal of this study, an electroleaching reactor was built using polyvinyl chloride (PVC), 6 cm in diameter and 30 cm high, following a 5:1 height-diameter ratio (Lin & Luong, 2004; Loong, 2007). The working mineral comes from the northeastern region of the Antioquia department in Colombia (see Figure 1). It has an Au tenor of 41 ppm, composed mainly by Quartz, pyrite, Sphalerite, Zeolite and Argentite and a particle size distribution that guarantees the flow of the leaching solution through the mineral bed without clogging, 80 % of the ore has a particle size between 2000 and 2800 microns and the remaining 20 % is between 150 and 2000 microns.

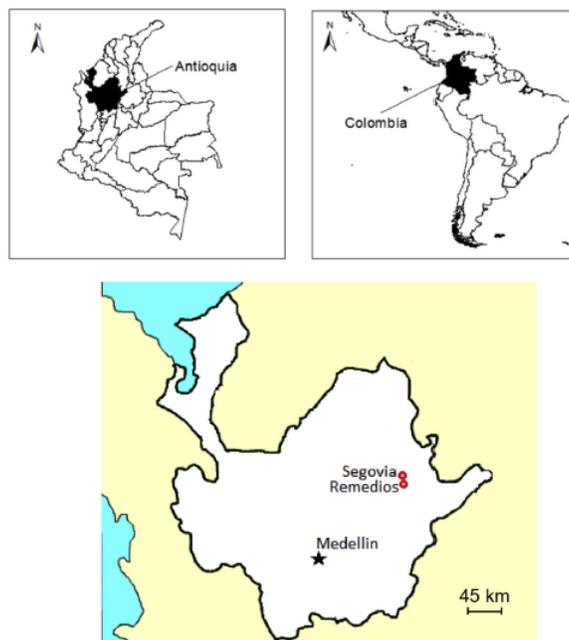


Figure 1: Area of procedure of the working mineral. Fuente: Own elaboration.

In order to determine the effect of the voltage and the time of treatment on gold extrac-

tion, a complete general factorial design was built with three completely randomized levels (Montgomery, 1991) as is shown in Table ???. The response variable was the concentration of gold in the leaching liquor. Based on preliminary tests it was determined that the voltages to be evaluated are 0, 5, 30 and 60 Volts and the times of 2, 4, 6 and 20 hours, The current was adjusted to 4 amperes.

Tabla 1: Experimental design matrix.

Natural variables		
Test	Voltage	Time
1	5	4
2	5	2
3	60	4
4	5	6
5	60	2
6	30	4
7	5	20
8	30	20
9	60	20
10	30	6
11	30	2
12	60	6

The electroleaching reactors were loaded with approximately 1450 g of mineral and were filled with a sodium cyanide solution of 0.04 M. The sodium cyanide used was Merck brand analytic grade. Voltage was applied within the reactor through a feeding source, reference BK PRECISION BK1740A. The distribution of electrodes was established so that the electrode in the lower part of the reactor worked as an anode and the upper electrode worked as a cathode. The leaching liquors were analyzed in an atomic absorption spectrophotometer, reference Thermo Scientific iCE 3000 series. The electrodes were analyzed by SEM-EDX, in a scanning tunneling microscope, reference Phenom XL.

A scheme of the electroleaching reactor is shown in Figure 2. The density, pore volume, and working mineral porosity were respectively determined at 3.14 g/cm^3 , 386 cm^3 , and 0.46. The porosity and pore volume of the working ore in the reactor were determined by the ratios shown in equations 1, 2, 3, 4, the average particle density was determined following the method described by ASTM D854-14 (D854-14, 2014).

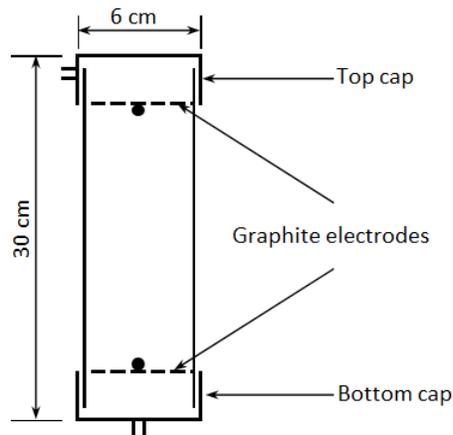


Figure 2: Column electroleaching reactor. Fuente: Own elaboration.

$$Volume = \frac{\Pi * Diameter^2}{4} * Height \quad (1)$$

$$Apparent\ Density = \frac{Mass}{Volume} \quad (2)$$

$$Porosity = 1 - \frac{Apparent\ density}{Particle\ density} \quad (3)$$

$$Poro\ space\ volume = Porosity - Volume \quad (4)$$

3. RESULTS

Samples were taken for each of the evaluated conditions of the liquid found near the anode and the cathode of the reactor. All tests were conducted at room temperature (25 °C). When graphing the variation in gold concentration in accordance to the leaching time in the anode liquor at different voltages, it can be observed that the increase in gold concentration is directly proportional to the increase in the voltage applied (see Figure 3). This implies that the higher the electric potential difference applied, the larger the migrational flow of the $Au(CN_2^-)$ species will be to the anode. Taking into account that the biggest contribution in matter transport under the application of an electric potential difference in a mineral bed is transport by electromigration (Acar *et al.*, 1995), equation 5 can be proposed for $Au(CN_2^-)$ species transport by migration to the anode.

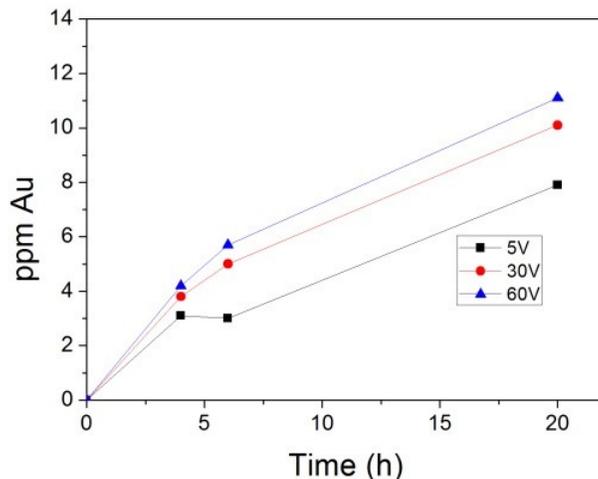


Figure 3: Variation in gold concentration in the anodic liquor at different voltages. Fuente: Own elaboration.

$$J_{Au(CN_2^-)}^m = C_{Au(CN_2^-)}(U_{Au(CN_2^-)}^* + K_e) \frac{\partial E}{\partial x} \quad (5)$$

When graphing the variation in gold concentration in accordance to time in the cathode liquor at different voltages, it can be observed that species concentration decreases as voltage increases. Taking into account the charge of the $Au(CN_2^-)$ gold-cyanide complexes, it is presumed that these ions will be directed toward the anode when applying an electric potential difference; therefore, the gold species near the cathode will tend to travel toward the electrode with the opposite charge, and therefore, its concentration will decrease. The migrational flow of these species will be larger as the potential difference increases, as can be observed in Figure 4. Taking this into account, it is possible to propose equation 6 for $Au(CN_2^-)$ species transport by migration near the cathode.

$$J_{Au(CN_2^-)}^m = -C_{Au(CN_2^-)}(U_{Au(CN_2^-)}^* + K_e) \frac{\partial E}{\partial x} \quad (6)$$

When analyzing the cathodes by SEM-EDX, the presence of gold deposits was detected on the surface of the electrode under all the potential difference conditions applied. Figure 5 shows one of these deposits. According to this, it can be proposed that $Au(CN_2^-)$ gold complexes that are found in proximity to the electric double layer of the cathode lose electromotive force in the electrode's electric field; therefore, the distribution of charges around the cathode is distorted, a diffusion of ionic complexes toward the Helmholtz layer appears, and complexes are divided, liberating the metal in the shape of positively charged metallic cations. These are deposited on the cathode's surface. This mechanism is illustrated in Figure 6. The aforementioned affirmation is supported by Wilkinson's observations (Wilkinson, 1986).

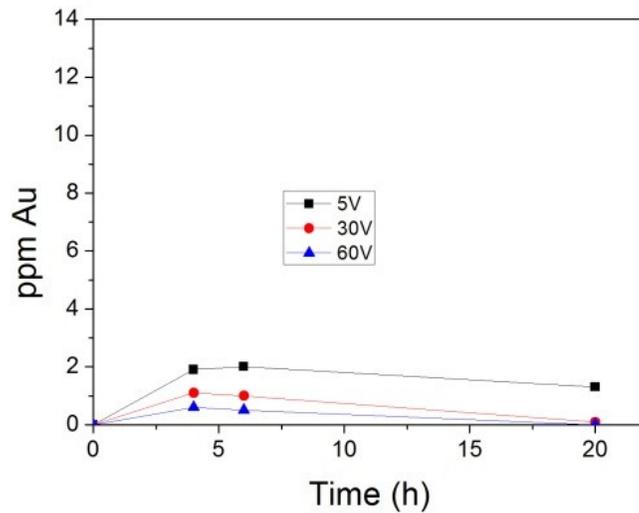


Figure 4: Variation in gold concentration in the cathodic liquor at different voltages. Fuente: Own elaboration.

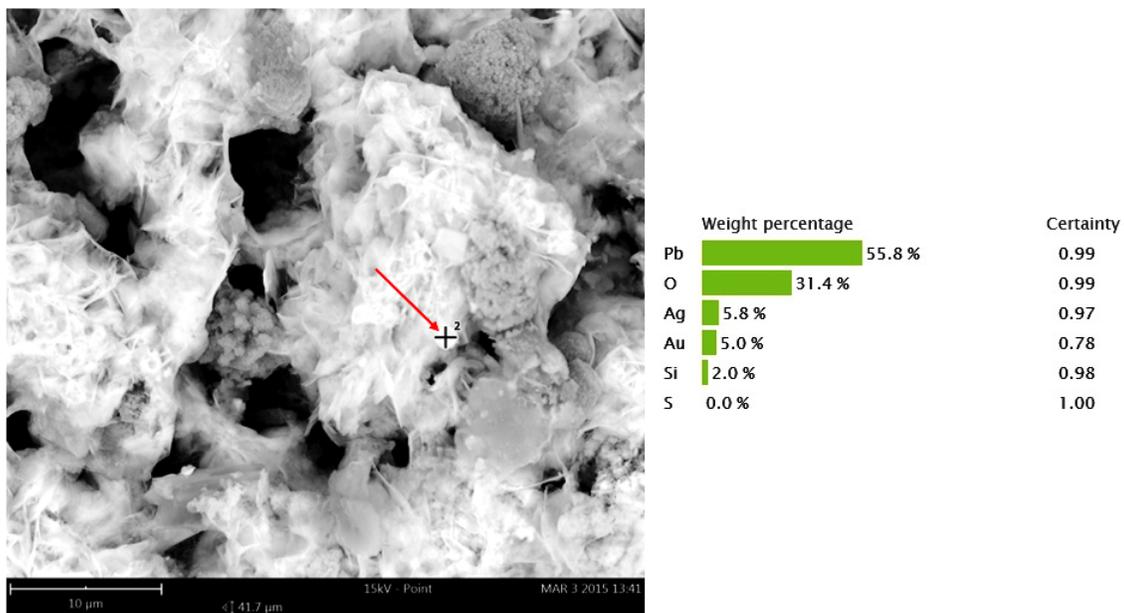


Figure 5: Gold and silver deposit on the cathode's surface. Fuente: Own elaboration.

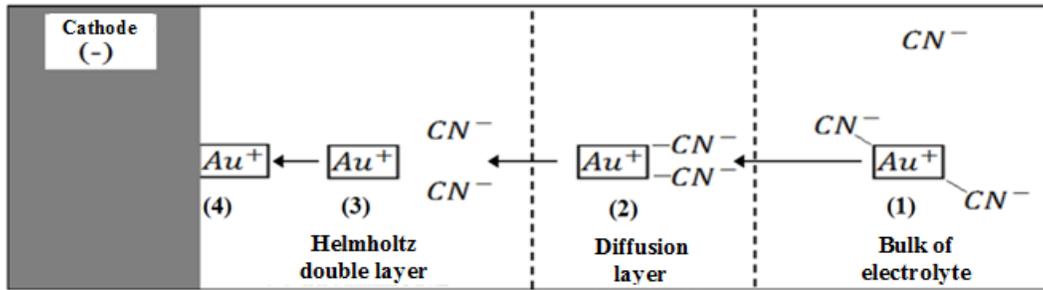


Figure 6: Proposed mechanism for gold deposition in the cathode. Fuente: Own elaboration.

One significant observation is that for the case of anodes, gold deposits were not detected for the evaluated conditions. This possibly implies that the gold complexes present in the liquor close to the anode remain in the solution and are not reduced in the electrode.

Once the electroleaching stages finished, the concentration of gold was determined in the working mineral by fire assay, aiming to establish the percentage of gold recovery under the evaluated conditions. A direct relation can be seen between the applied voltage and the percentage of recovery (see Figure 7).

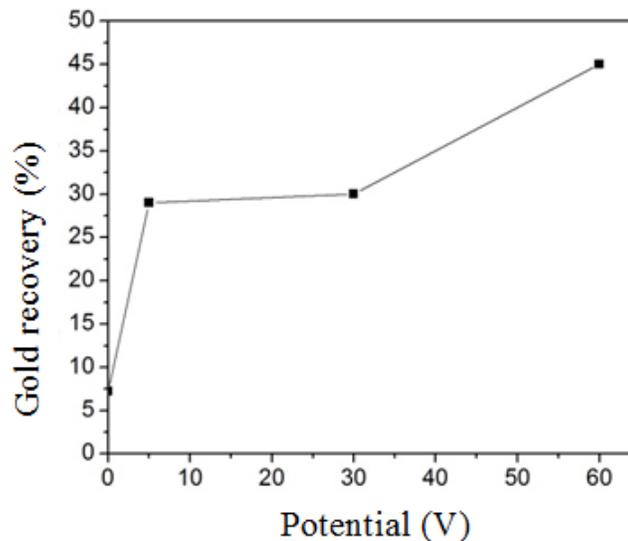


Figure 7: Percentage of gold recovery in accordance to voltage during 20 hours of treatment. Fuente: Own elaboration.

The increase in gold recovery with the applied electric potential could be associated to the fact that once the $Au(CN)_2^-$ complex formation is achieved, the electric potential difference will be affecting the electromotive speed of the gold-cyanide complex through the diffuse layer. The higher the electric potential difference, the stronger the electromotive force acquired by the molecule, and

therefore, molecules will travel faster toward the bottom of the solution. This phenomenon, along with the electromigration transport of the $\text{Au}(\text{CN}_2^-)$ complex in the mineral bed will promote an increase in gold leaching kinetics.

The low recovery rate, may be associated with an inefficient release of the gold particles, taking into account the results obtained, it is proposed that once the $\text{Au}(\text{CN}_2^-)$ ions found inside the electric double layer surrounding the gold particles are affected by the electric potential difference, they are forced to leave the double layer into the bosom of the solution by the electroosmosis phenomenon. At the same time, the $\text{Au}(\text{CN}_2^-)$ ions found at the bottom of the solution are affected by the electric potential difference, which confers them electromotive force and transports them toward the electrode with the opposite charge (the anode, in this case) due to the electromigration phenomenon.

4. CONCLUSIONS

There is a direct relation between the electric potential applied to the leaching bed and the electromotive speed acquired by the $\text{Au}(\text{CN}_2^-)$ species found at the bottom of the solution; therefore, the migrational flow of species to the anode will be larger. This implies that the concentration of species increases in the anodic region, and decreases in the cathodic region.

The molecules of $\text{Au}(\text{CN}_2^-)$ found inside the electric double layer surrounding the gold particles are affected by the electric potential difference and forced to leave the double layer into the bottom of the solution by the electroosmosis phenomenon.

Taking into the account the fact that the largest contribution in matter transport in a mineral bed under the application of a electric potential difference is transport by electromigration, equations for the transport of $\text{Au}(\text{CN}_2^-)$ species to the anodic region and from the cathodic region are proposed.

The $\text{Au}(\text{CN}_2^-)$ gold complexes that are found in proximity to the electric double layer of the cathode lose electromotive force in the electrode's electric field; therefore, the distribution of charges around the cathode is distorted, a diffusion of ionic complexes to the Helmholtz layer appears, and complexes are divided, liberating the metal in the shape of positively charged metallic cations. These are deposited on the cathode's surface.

Referencias

- Acar, Y. B., Alshawabkeh, A. N. & Gale, R. J. (1993). Fundamentals of extracting species from soils by electrokinetics. *Waste Management*, 13 (2), 141–151.
- Acar, Y. B., Gale, R. J., Alshawabkeh, A. N., Marks, R. E., Puppala, S., Bricka, M. & Parker, R. (1995). Electrokinetic remediation: basics and technology status. *Journal of Hazardous Materials*, 40 (2), 117–137.
- D854-14, A. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer 1 (2014). <https://doi.org/10.1520/D0854-10>.
- Kenzhaliyev *et al.* (2015). Investigation into the Use of Electrochemical Extraction to Draw Gold from Refractory Ores. *American Journal of Applied Sciences*, 12 (11), 857–864.
- Lin, H. & Luong, H. (2004). Column Leaching for Simulating Heap and In-situ Soil Remediation with Metallic Fenton Reaction, 3 (2), 91–98.
- Loong Hey, Y. (2007). Electrokinetic Applications in Hydrometallurgical Copper Extraction, (November).
- Marsden, J. O. & House, C. I. (2006). The Chemistry of Gold Extraction (2nd Edition). SME. Retrieved from <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCGEE000D/chemistry-gold-extraction>.
- Montgomery, D. C. (1991). Diseño y análisis de experimentos. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=368608>.
- Nicol, M. J., Fleming, C. & Paul, R. L. (1992). The Chemistry of the Extraction of Gold. The Extractive Metallurgy of Gold. 831–905.
- Oraby, E. A. & Eksteen, J. J. (2015). The leaching of gold, silver and their alloys in alkaline glycine-peroxide solutions and their adsorption on carbon. *Hydrometallurgy*, 152, 199-203.
- Reddy, K. R. & Cameselle, C. (2009). Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater.
- Valenzuela, J. *et al.* (2016). Electroosmotic drainage, a pilot application for extracting trapped capillary liquid in copper leaching. *Hydrometallurgy*, 163, 148-155.
- Wilkinson, P. (1986). Understanding gold plating. *Gold Bulletin*, 19(3), 75-81.

ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ORELLANA MEDIANTE MODELOS GAMLSS^a

ESTIMATION OF ORELLANA YIELD THROUGH GAMLSS MODELS

GIPSY NARANJO DUEÑAS^b, EDGAR MONSALVE LUGO^c, FREDDY HERNÁNDEZ
BARAJAS^d

Recibido 20-11-2016, aceptado 08-03-2017, versión final 28-03-2017.

Artículo Investigación

RESUMEN: En la literatura científica se pueden encontrar estudios sobre la influencia de variables ambientales en la producción de hongos comestibles, sin embargo, esos estudios han utilizado modelos estadísticos donde se asume que la variable producción se distribuye en forma normal, supuesto que no siempre se cumple. En este artículo se usan los modelos GAMLSS (*Generalized Additive Model for Location Scale and Shape*) para estudiar la influencia de las variables humedad, temperatura, tiempo de aireación, tipo de sustrato y cantidad de sustrato sobre la producción del hongo orellana. Los modelos GAMLSS permiten que el investigador asuma distribuciones estadísticas para la variable respuesta diferentes a la normal y que se puedan modelar todos los parámetros en función de las covariables. Al aplicar GAMLSS a los datos de orellana se encontró que sólo las variables temperatura, tiempo de aireación y tipo de sustrato tienen una influencia significativa en la producción de orellana. En particular, se encontró que a mayor temperatura y tiempo de aireación la producción de orellana aumenta, adicionalmente, se estimó que la producción de orellana se duplica si la siembra se realiza en sustrato de higuera molida. Los resultados de este artículo sirven para cuantificar los efectos de las variables ambientales en la producción industrial de orellana y para determinar combinaciones óptimas de los factores que maximicen la producción.

PALABRAS CLAVE: GAMLSS; regresión; modelación; distribución gamma.

ABSTRACT: The influence of environmental variables on the production of edible mushrooms has been previously documented in the scientific literature. However, all these studies have in common the use of statistical models where the variable production is distributed in a normal way, although it is well known this is not always true. In this paper, we have used the GAMLSS (*Generalized Additive Model for Location Scale and Shape*) to study the influence of variables such as humidity, temperature, aeration time, type of substrate and amount of substrate on the production of the Orellana mushroom. GAMLSS allows to assume statistical

^aNaranjo Dueñas, G., Monsalve Lugo, E. & Hernández Barajas, F. (2016). Estimación del rendimiento de Orellana mediante modelos Gamlss. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 6 (1), 67–82. DOI: 10.15446/rev.fac.cienc.v6n1.61119

^bEstudiante de Estadística, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Correo: gtnaranjod@unal.edu.co.

^cEstudiante de Estadística, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Correo: edmonsalvel@unal.edu.co.

^dProfesor asistente. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Correo: fhernanb@unal.edu.co.

distributions for the response variable different from normal and enable modeling all parameters according to variables. When applying GAMLSS to the Orellana data, it was found that only the variables temperature, aeration time and type of substrate were influential on the Orellana production. In particular, the analysis revealed that at higher temperatures and aeration times the production of Orellana rises. Additionally, it was estimated that the production of Orellana would double if ground husk were used. The impact of results derived from this investigation can be utilized not just to quantify the effects of environmental variables on the industrial production of Orellana, but also to determine optimal factor combinations to maximize production.

KEYWORDS: GAMLSS; regression; modeling; gamma distribution.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el consumo de hongos ha impulsado la industria de la fungicultura debido a sus propiedades nutricionales. Uno de estos hongos comestible es el *Pleurotus Ostreatus* u orellana que se desarrolla fácilmente en residuos como troncos, ramas, bagazo de caña, entre otros. El cultivo de orellana se realiza en dos etapas. La primera etapa es la incubación que consiste en la preparación del sustrato, siembra e inducción de primordios; la segunda etapa es la fructificación y se realiza entre 7 y 10 días después de la primera etapa. En la Figura 1 se ilustra la forma de cultivo de orellana en una bolsa con sustrato.



Figura 1: Orellana lista para el corte. Tomada de <http://www.aquinohaygeranios.com/>.

La importancia de la orellana en la alimentación es debido a su alto contenido de carbohidratos, alrededor de un 50% en peso, entre 5 y 9% de fibra, bajo contenido de grasa, posee un efecto antioxidante y alto contenido de polisacáridos que ayudan al sistema inmunológico, la orellana es altamente nutritiva y beneficiosa para el consumo humano, (Sierra & Orozco, 2014). Cardona (2011) afirma que el cultivo casero de hongos en países de Centroamérica ha tenido gran aceptación entre las familias ya que éste contribuye a la producción y disponibilidad de alimentos, no requiere altas inversiones de dinero, es muy fácil de manejar, la demanda es creciente y puede ser una fuente de ingresos extra para las familias. Recientemente, Cervantes (2015) planteó un modelo para la producción industrializada de orellana en Colombia al interior de las viviendas de familias

en condición de vulnerabilidad o víctimas de desplazamiento forzado. Este modelo permite que se usen apropiadamente los recursos de cada región para beneficiar a las familias con la producción de orellana, ya sea por el consumo interno o por ventas del producto.

Estudiar la relación entre los factores de producción para mejorar los rendimientos de orellana es un aspecto importante tanto para el cultivo a escala familiar e industrial. El problema de estimar la producción de hongos en función de variables ha sido abordado en la literatura científica y a continuación se mencionan algunos reportes y las herramientas estadísticas usadas para estudiar esa relación. Hernández *et al.* (2006) usaron pruebas de hipótesis para determinar la influencia del tipo de sustrato (capacho de uchuva, cáscara de arveja y tusa de mazorca) sobre el crecimiento y producción de orellana en Colombia. Bonet *et al.* (2008) usaron modelos lineales mixtos para predecir la producción de tres tipos de hongos silvestres en una región de España en función de la pendiente del terreno, de la altura del nivel mar del terreno y del área de la parcela. Velasco *et al.* (2010) usaron modelos de regresión múltiple para pronosticar la producción de hongos silvestres por parcela en una región de México usando las covariables número de árboles por parcela, diámetro promedio y altura promedio de los árboles en la parcela y cobertura promedio de la parcela. Cañedo (2012) utilizó análisis de varianza para estudiar la influencia del tipo de sustrato (maíz, trigo y frijol) y tres cantidades de sustrato (2, 4 y 6 kg) sobre la producción de orellana en México. Martínez *et al.* (2012) usaron modelos no lineales para predecir la producción anual de tres tipos de hongos silvestres (*Ectomycorrhizal*, *L. group deliciosus* y *B. edulis yield*) en función de las precipitaciones en la región, la altura y edad de los árboles, la altitud, inclinación, densidad y pendiente de la parcela. Tahvanainen *et al.* (2016) usaron modelos mixtos no lineales para predecir la producción de dos tipos de hongos silvestres (*Boletus edulis*, *Lactarius spp*) en Noruega y Finlandia, en función de las precipitaciones, la altura y edad de los árboles, la altitud, inclinación, densidad y pendiente de la parcela.

En este trabajo se abordan estadísticamente los datos de producción de orellana obtenidos de un estudio observacional realizado en la empresa productora de orellana Monterra Productora y Comercializadora Agroindustrial Colombiana S.A.S. ubicada en el municipio de La Palma en Cundinamarca. Los datos se abordan por medio de la metodología GAMLSS (*Generalized Additive Model for Location Scale and Shape*) para cuantificar los efectos de las variables de producción humedad relativa, tiempo de aireación, temperatura, tipo de sustrato y cantidad de sustrato sobre el rendimiento de orellana obtenida de cada bolsa sembrada. Adicionalmente se derivan expresiones matemáticas para la producción media y para la varianza de la producción de orellana.

En la literatura estadística se reporta el uso de modelos GAMLSS en diferentes áreas, algunos de esos reportes son: de Castro *et al.* (2010), usaron la distribución binomial negativa para modelar el tiempo de supervivencia con censura en función de las características de un conjunto de 205 pacien-

tes observados después de la operación para la eliminación de melanoma maligno; Gilchrist *et al.* (2011), por medio de GAMLSS modelaron la probabilidad de padecer una enfermedad respiratoria y la duración en el hospital hasta la recuperación en función de un conjunto de covariables para un grupo personas de la tercera edad; Sandercock *et al.* (2012), construyeron percentiles con GAMLSS con el objetivo de medir la capacidad cardiorespiratoria en pruebas atléticas de 20 metros con niños de 10 a 16 años; Tong *et al.* (2013), aplicaron GAMLSS para modelar las pérdidas en préstamos asumiendo una distribución mixta gamma inflada con ceros (ZAGA) para las pérdidas y usando la información variables relacionadas a los préstamos; Scandroglio *et al.* (2013), usaron GAMLSS para estimar el VaR (*Value-at-Risk*) y ES (*Expected Shortfall*) de los precios del petróleo Brent y WTI y Hernández *et al.* (2015) aplicaron GAMLSS en el área agroindustrial para estudiar el efecto del pH y el tiempo en la obtención de celulosa a partir de desechos de banano.

El presente documento está organizado así: en la sección 2 se hace una descripción breve de los modelos GAMLSS utilizados; en la sección 3 se describe la forma de obtención de los datos, las variables involucradas en el estudio y se presenta el análisis descriptivo; en la sección 4 se muestra la forma como se aplicaron los modelos GAMLSS al problema, los diferentes modelos considerados, los criterios para la elección del mejor modelo y los resultados del mejor modelo; en la sección 5 se presentan las expresiones matemáticas que resumen los efectos y relación entre las variables de producción y el rendimiento de orellana, por último en la sección 6 están las conclusiones del artículo.

2. MODELOS GAMLSS

Los modelos GAMLSS (*Generalized Additive Model for Location Scale and Shape*) propuestos por Rigby & Stasinopoulos (2005), son de gran utilidad ya que permiten modelar todos los parámetros de la variable de interés en función de covariables. En la práctica, muy pocas veces la variable respuesta cumple el supuesto de normalidad requerido para el ajuste de modelos lineales, los modelos GAMLSS son útiles porque permiten elegir la distribución para la variable respuesta entre más de 80 distribuciones diferentes. Los modelos GAMLSS asumen que las observaciones y_i para $i = 1, \dots, n$ son independientes con función de densidad de probabilidad $f(y_i|\boldsymbol{\theta}_i)$ donde $\boldsymbol{\theta}_i = (\mu_i, \sigma_i, \nu_i, \tau_i)^\top$ es el vector de parámetros. Los primeros dos parámetros, μ_i y σ_i , son los parámetros de localización y escala mientras que ν_i, τ_i corresponden a los parámetros de forma; los modelos GAMLSS permiten que cada uno de los parámetros $\mu_i, \sigma_i, \nu_i, \tau_i$ sean explicados en función de covariables. Los modelos GAMLSS permiten incluir en la modelación de los parámetros efectos fijos, términos no paramétricos (funciones suavizadas de las covariables) y efectos aleatorios, la

estructura general de los modelos GAMLSS es la siguiente:

$$g_1(\boldsymbol{\mu}) = \boldsymbol{\eta}_1 = \mathbf{X}_1\boldsymbol{\beta}_1 + \sum_{j=1}^{J_1} \mathbf{Z}_{j1}\boldsymbol{\gamma}_{j1} \quad (1)$$

$$g_2(\boldsymbol{\sigma}) = \boldsymbol{\eta}_2 = \mathbf{X}_2\boldsymbol{\beta}_2 + \sum_{j=1}^{J_2} \mathbf{Z}_{j2}\boldsymbol{\gamma}_{j2} \quad (2)$$

$$g_3(\boldsymbol{\nu}) = \boldsymbol{\eta}_3 = \mathbf{X}_3\boldsymbol{\beta}_3 + \sum_{j=1}^{J_3} \mathbf{Z}_{j3}\boldsymbol{\gamma}_{j3} \quad (3)$$

$$g_4(\boldsymbol{\tau}) = \boldsymbol{\eta}_4 = \mathbf{X}_4\boldsymbol{\beta}_4 + \sum_{j=1}^{J_4} \mathbf{Z}_{j4}\boldsymbol{\gamma}_{j4} \quad (4)$$

donde $g_k(\cdot)$ es una función de enlace conocida para $k = 1, \dots, 4$; $\boldsymbol{\mu}$, $\boldsymbol{\sigma}$, $\boldsymbol{\nu}$, $\boldsymbol{\tau}$ y $\boldsymbol{\eta}_k$ son vectores n -dimensionales; las \mathbf{X}_k son matrices de diseño conocidas de orden $n \times J'_k$ asociadas a los efectos fijos $\boldsymbol{\beta}_k$ de $J'_k \times 1$; y las \mathbf{Z}_{jk} son matrices de diseño conocidas de orden $n \times q_{jk}$ asociadas a los efectos aleatorios $\boldsymbol{\gamma}_{jk}$ de $q_{jk} \times 1$ con distribución normal multivariada. La cantidad J'_k representa el número de covariables usadas en la parte fija del predictor lineal $\boldsymbol{\eta}_k$, mientras que J_k representa el número de efectos aleatorios en $\boldsymbol{\eta}_k$. El modelo dado en (1) a (4) puede ser resumido en forma compacta así:

$$g_k(\boldsymbol{\theta}_k) = \boldsymbol{\eta}_k = \mathbf{X}_k\boldsymbol{\beta}_k + \sum_{j=1}^{J_k} \mathbf{Z}_{jk}\boldsymbol{\gamma}_{jk} \quad (5)$$

Los modelos GAMLSS permiten que la distribución de la variable respuesta y_i sea continua, discreta o mixta, existen varias parametrizaciones para una misma distribución y los detalles de las distribuciones y parametrizaciones usadas en GAMLSS pueden ser consultados en Stasinopoulos, Rigby & Akantziliotou (2008). Los modelos GAMLSS se puede aplicar fácilmente por medio del paquete `gamlss` disponible en R Core Team (2017).

3. ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE VARIABLES Y DATOS

Los datos analizados corresponden a un estudio observacional con 57 unidades muestrales. Cada unidad muestral corresponde a una bolsa con cáscara de higuera en la cual se sembró orellana. De las 57 bolsas, 37 contenían cáscara de higuera entera y las restantes 20 cáscara de higuera molida. El contenido de cascará de higuera por bolsa fue de 4, 5 o 10 kilogramos; la mayoría de las bolsas estuvieron almacenadas en recintos con temperatura controlada a 19 °C o 24 °C y la humedad relativa del recinto fue también controlada con valores de 58 %, 60 % y 85 %. Todos los días las unidades muestrales fueron sacadas del recinto para recibir una cantidad de luz solar que fue de 4 o 6 horas. Aproximadamente 14 días después de haber iniciado la fructificación, la orellana se retiró de la bolsa y se pesó en una balanza para medir el rendimiento en gramos. La definición y unidades de las variables monitoreadas en el estudio se presentan a continuación:

1. Sustrato: tipo de sustrato o cáscara de higuierilla usada en cada bolsa, los niveles de esta variable son molida o entera.
2. Peso: peso o cantidad (en kg) de sustrato utilizado en cada bolsa.
3. Humedad: humedad relativa (en %) del recinto donde se encontraba la bolsa con orellana.
4. Temperatura: temperatura (en °C) del recinto donde se encontraba la bolsa con orellana.
5. Tiempo: tiempo (en horas) de aireación por día al cual fueron sometidas las bolsas fuera del recinto.
6. Rendimiento: corresponde al rendimiento (en gramos) de orellana cultivada por bolsa.

En la Figura 2 se presenta la densidad para la variable respuesta rendimiento de orellana, de esta figura se observa que el rendimiento tiene una distribución asimétrica con sesgo a la derecha. Las marcas o rayas en el eje horizontal representan cada una de las 57 observaciones, el 80% de los rendimientos centrales se encuentran entre 44.2 y 1150.2 gramos (percentiles 10 y 90).

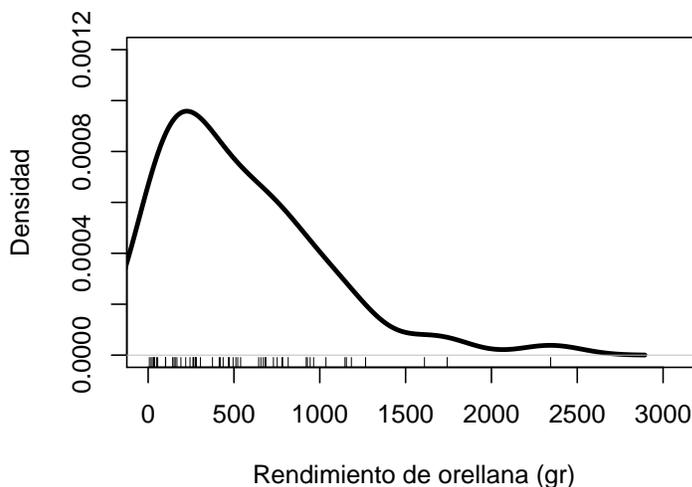


Figura 2: Densidad para el rendimiento de orellana por bolsa. Fuente: Elaboración propia.

Para explorar las distribuciones estadísticas que mejor explican el patrón observado del rendimiento de orellana se utilizó un procedimiento de bondad de ajuste marginal, es decir, sin incluir covariables. En la Figura 3 se presenta el histograma para el rendimiento de orellana acompañado de las cuatro densidades (línea oscura) que mejor se ajustaron y que en su orden fueron exponencial, Weibull parametrización 3, gamma y Pareto parametrización 2. En cada panel de la Figura 3 está

el nombre de la distribución con los parámetros estimados, las expresiones matemáticas para las funciones de densidad de estas distribuciones se pueden consultar en Stasinopoulos, Rigby & Akantziliotou (2008). De esta figura se observa que las cuatro distribuciones logran describir el patrón de variación del rendimiento de orellana, la distribución exponencial lo hace usando un sólo parámetro (μ) mientras que la Weibull 3, gamma y Pareto 2 lo hacen por medio de dos parámetros (μ y σ).

En la Figura 4 se presentan los boxplots que relacionan el rendimiento de orellana con las covariables tiempo de aireación, humedad, temperatura, cantidad de sustrato y tipo de sustrato. De la parte superior de la figura se observa que a mayor tiempo de aireación y a mayor temperatura, el rendimiento de orellana por bolsa aumenta; en la parte superior se observan dos boxplots como líneas debido a que sólo se tiene un registro a humedad de 58 % y un registro a temperatura de 21 °C. En relación a la humedad se nota que los mayores rendimientos sucedieron cuando la humedad fue de 85 %.

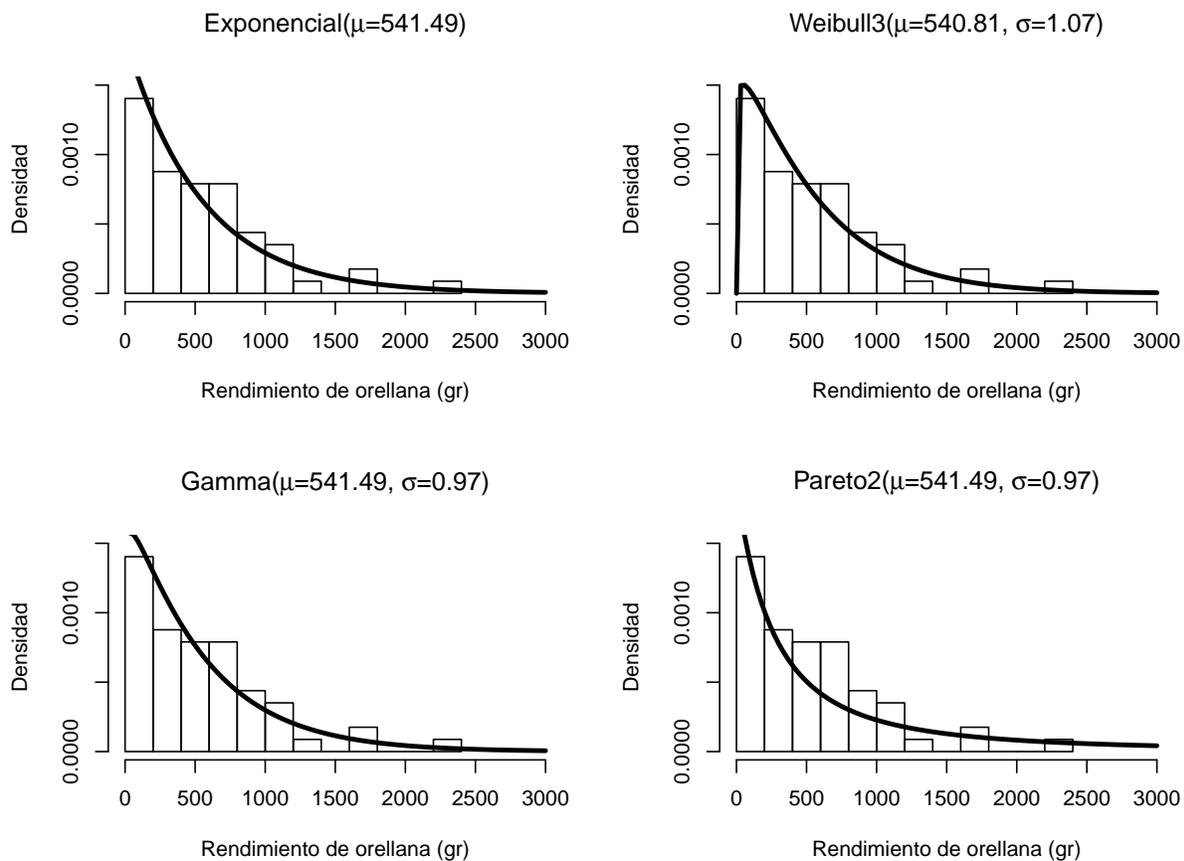


Figura 3: Histograma para el rendimiento de orellana acompañado de las cuatro densidades de probabilidad (líneas oscuras) que mejor se ajustan a la variable respuesta. Fuente: Elaboración propia.

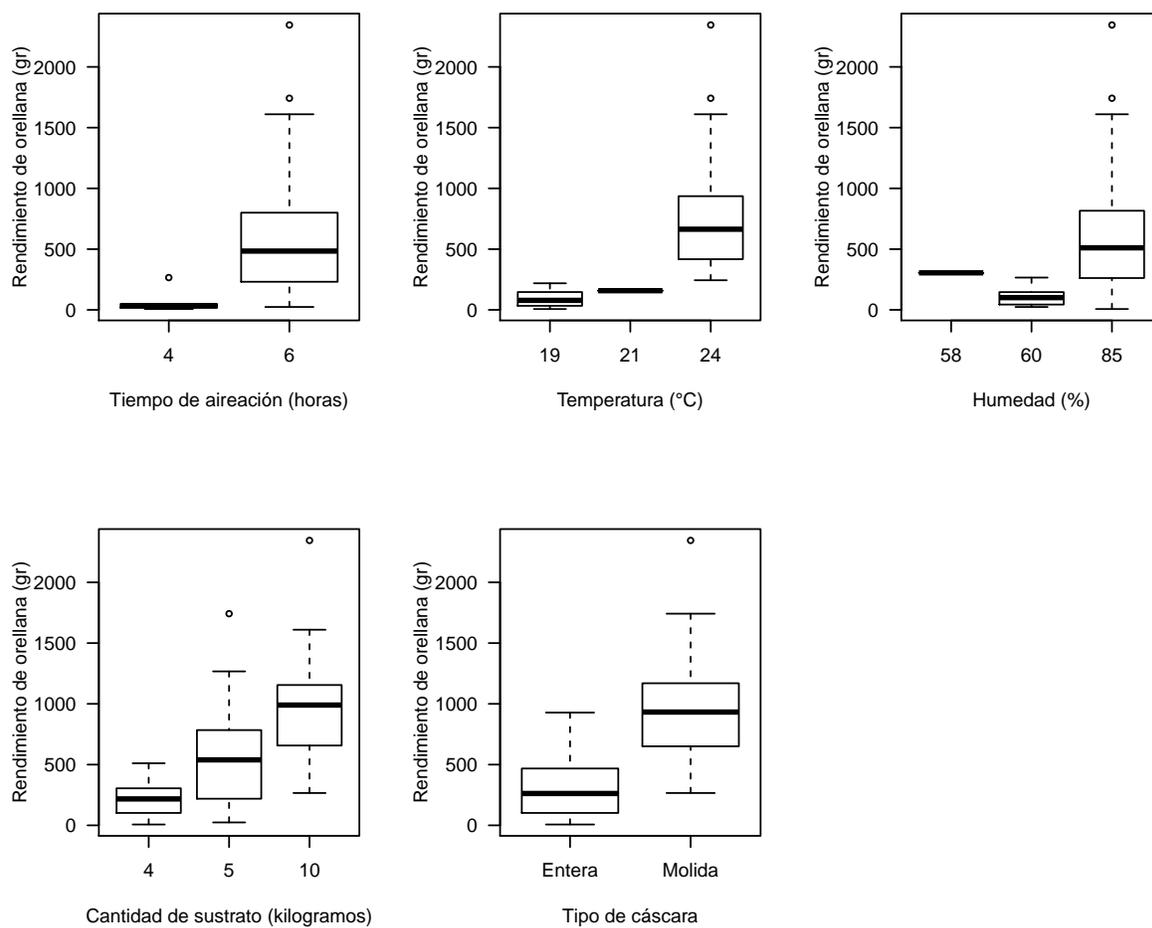


Figura 4: Boxplot para el rendimiento de orellana dado el tiempo de aireación, temperatura, humedad, cantidad de sustrato y el tipo de sustrato o cáscara. Fuente: Elaboración propia.

En la parte inferior de la Figura se muestran los boxplots que relacionan el rendimiento con la cantidad de sustrato y el tipo de sustrato usado en las bolsas donde fueron plantados los primordios. De esta figura se observa que a medida que las bolsas donde se siembran los primordios contienen mayor cantidad de sustrato, el rendimiento obtenido es mayor; se observa también que al usar cáscara molida el rendimiento de orellana aumenta frente al uso de cáscara entera.

4. METODOLOGÍA

En esta sección se presenta la aplicación de los modelos GAMLSS para explicar el rendimiento de la orellana en función de las covariables temperatura, humedad relativa, tiempo de aireación, peso de la bolsa y sustrato (variable cualitativa).

Adicional a las cuatro distribuciones (exponencial, Weibull 3, gamma y Pareto 2) que mejor se ajustaban marginalmente y que fueron identificadas en la Sección 3, se consideraron otras siete distribuciones con soporte en \mathbb{R}^+ para modelar el rendimiento de orellana, esas distribuciones fueron: lognormal (LOGNO), inversa gaussiana (IG), gamma generalizada (GG), Box-Cox Cole and Green (BCCGo), inversa gaussiana generalizada (GIG), Box-Cox t (BCTo), Box-Cox power exponencial (BCPEo). De las distribuciones consideradas sólo la exponencial tiene un parámetro (μ), otras son de dos parámetros (μ, σ) y otras tienen hasta 3 parámetros (μ, σ, ν), para conocer los detalles de las funciones de densidad, valor esperado y varianza de las distribuciones usadas se recomienda consultar Stasinopoulos, Rigby & Akantziliotou (2008).

En cada uno de los once modelos (uno por cada distribución considerada) los predictores lineales (η) incluyeron sólo efectos fijos de la variable cualitativa, términos lineales y cuadráticos de las variables cuantitativas y de las interacciones entre estas mismas variables cuantitativas; también se aplicó un proceso de selección de variables en cada predictor lineal para elegir sólo términos significativos en la modelación.

Para comparar modelos se puede utilizar el *Akaike information criterion* (*AIC*) propuesto por Akaike (1974), que sirve para medir la calidad relativa de los modelos estadísticos, la expresión para calcular el indicador es

$$AIC = -2\hat{l} + 2df,$$

donde \hat{l} corresponde al valor de log-verosimilitud estimada para el modelo y df corresponde al número de parámetros estimados del modelo. Modelos anidados pueden ser comparados por medio del *global deviance* (*GD*) dado por la expresión

$$GD = -2\hat{l},$$

y modelos no anidados por medio del *Generalized Akaike information criterion* (*GAIC*) propuesto

por Akaike (1983) y dado por la expresión

$$GAIC = -2\hat{l} + \# df,$$

siendo $\#$ el valor de penalidad por cada parámetro adicional en el modelo; cuando $\# = 2$, el *GAIC* coincide con el *AIC* y el *Schwarz Bayesian criterion (SBC)* propuesto por Schwarz (1978), se da cuando el valor de penalidad es $\# = \log(n)$, donde n es el número de observaciones del modelo; siempre el modelo elegido es aquel modelo con el menor valor de cualquiera de los criterios de información anteriores. En este trabajo se usó el *SBC* para comparar los modelos construidos.

En el Tabla 1 se presentan los valores de *SBC* para los tres mejores modelos de los once considerados, de esta tabla se aprecia que los modelos con variable respuesta gamma generalizada (GG) y gamma (GA) tienen valores de *SBC* muy similares.

Tabla 1: *SBC* para los tres mejores modelos.

Modelo	Distribución	Grados de libertad	<i>SBC</i>
1	GG	8	765.40
2	GA	7	765.73
3	GIG	8	768.23

En esta aplicación se usaron los residuales *RQR (Randomized Quantile Residuals)* propuestos por Dunn & Smyth (1996) para modelos de regresión donde la variable respuesta no sigue una distribución normal y donde no es posible usar los residuales usuales ($y_i - \hat{y}_i$); los residuales *RQR* se definen como $r_i = \Phi^{-1}(F(y_i | \hat{\theta}))$ donde F representa la función de distribución acumulada asumida para la variable respuesta y Φ es la función de distribución acumulada para una normal estándar. Este tipo de residuales sigue una distribución normal si los parámetros estimados $\hat{\theta}$ del modelo fueron bien estimados (Dunn & Smyth, 1996). Para analizar los residuales r_i , Buuren & Fredriks (2001) propusieron el gráfico de gusano o *Worm plot* que es una modificación del gráfico cuantil cuantil (qqplot), en este nuevo gráfico los valores del eje vertical se reemplazan por la diferencia (*Deviation*) entre la coordenada y y la coordenada x del qqplot usual, esta modificación crea un qqplot sin tendencia estocástica y entre más plana sea la secuencia de puntos indica que el modelo está bien ajustado. Buuren (2001) puede ser consultado para conocer el código en R para la creación de este gráfico.

En la Figura 5 se presenta el *Worm plot* para cada uno de los modelos relacionados en el Tabla 1, de esta figura se observa que los residuales para los tres modelos quedan ubicados en la parte central y que no invaden las hipérbolas, esto indica un buen ajuste de los modelos. Como los tres modelos tiene *BIC* muy similares y buen comportamiento de residuales, se decidió utilizar el modelo gamma (GA) debido a que este tiene menor número de parámetros y la idea es obtener un buen modelo y

parsimonioso.

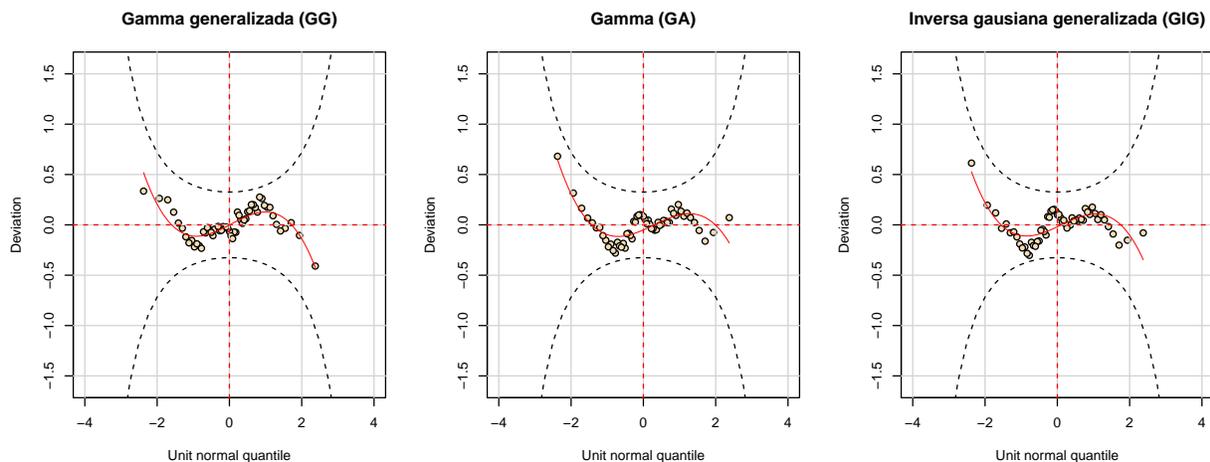


Figura 5: *Worm plot* para cada uno de los modelos ajustados y reportados en el Tabla 1. Fuente: Elaboración propia.

En el Tabla 2 se presentan los parámetros estimados para el modelo en el cual la variable respuesta tiene distribución gamma (GA), de esta tabla se observa que cada una de las variables es significativa a un nivel de 5% para explicar los parámetros μ y σ . Las covariables peso de la bolsa y humedad relativa fueron eliminadas en el proceso de selección de variables y por esta razón no aparecen en el Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros estimados para el modelo GA.

Modelo para $\log(\mu)$	Estimado	Error estándar	Valor t	Valor-P
Intercept	12.430	1.910	6.508	3.54e-08
Temp	-1.355	0.166	-8.185	8.63e-11
Temp ²	0.038	0.004	9.802	3.14e-13
Tiempo	0.690	0.137	5.023	6.86e-06
Cmolida	0.738	0.133	5.550	1.08e-06
Modelo para $\log(\sigma)$	Estimado	Error estándar	Valor t	Valor-P
Intercept	1.106	0.884	1.251	0.217
Temp	-0.082	0.039	-2.105	0.040

A partir de la Tabla 2, y recordando que la función de enlace usada en la modelación fue log, se pueden obtener las expresiones para los parámetros estimados μ y σ como se muestra a continuación:

$$\log(\hat{\mu}) = 12.430 - 1.355 \text{ Temp} + 0.038 \text{ Temp}^2 + 0.690 \text{ Tiempo} + 0.738 \text{ Cmolida} \quad (6)$$

$$\log(\hat{\sigma}) = 1.106 - 0.082 \text{ Temp} \quad (7)$$

El código con las instrucciones en R para replicar los análisis aquí presentados se puede consultar en: <https://raw.githubusercontent.com/fhernanb/orellana/master/Orellana.R>

5. RESULTADOS

En esta sección se presenta la interpretación de los resultados obtenidos del mejor modelo identificado en la sección anterior.

En la parametrización de la distribución gamma con parámetros μ y σ usada en los modelos GAMLSS, el valor esperado está dado por $E(Y) = \mu$ y la varianza por $Var(Y) = \sigma^2 \mu^2$. De esta forma, el valor esperado y varianza estimada para el rendimiento de la orellana se puede escribir como:

$$\widehat{E}(Y) = \hat{\mu} = e^{12.430 - 1.355 \text{ Temp} + 0.038 \text{ Temp}^2 + 0.690 \text{ Tiempo} + 0.738 \text{ Cmolida}} \quad (8)$$

$$\widehat{Var}(Y) = \hat{\mu}^2 \hat{\sigma}^2 = e^{27.072 - 2.874 \text{ Temp} + 0.076 \text{ Temp}^2 + 1.380 \text{ Tiempo} + 1.476 \text{ Cmolida}} \quad (9)$$

De la expresión 8 se observa que el promedio de orellana obtenido de cada bolsa es una función de la temperatura y del tiempo de aireación, a mayor temperatura y mayor tiempo se esperan mayores rendimientos de orellana, estos resultados coinciden con lo observado en los dos primeros paneles de la Figura 4. Para una temperatura constante se espera que por cada hora adicional de aireación, la producción media de orellana casi se duplique (obtenido de $\exp(0.69)=1.994$). De esta misma expresión se observa que para temperatura y tiempos fijos, los rendimientos para bolsas con cascarilla molida se duplican frente a los rendimientos de bolsas con cascarilla entera (obtenido de $\exp(0.738)=2.092$), esto significa que plantar en cascarilla molida favorece la producción de orellana. En la Figura 6 se presentan los gráficos de contornos para el valor esperado del rendimiento de orellana, de esta figura se observa que a mayor temperatura y a mayor tiempo de aireación el valor esperado aumenta. En la Figura 7 se presentan los gráficos de contornos para la varianza del rendimiento de orellana dada en la expresión 9, de esta figura se observa que la varianza crece a medida que la temperatura y el tiempo aumentan, se observa también que la varianza para el rendimiento de orellana cuando se usa cascarilla molida es aproximadamente 4.38 veces mayor frente a la cascarilla entera (obtenido de $\exp(1.476)=4.375$).

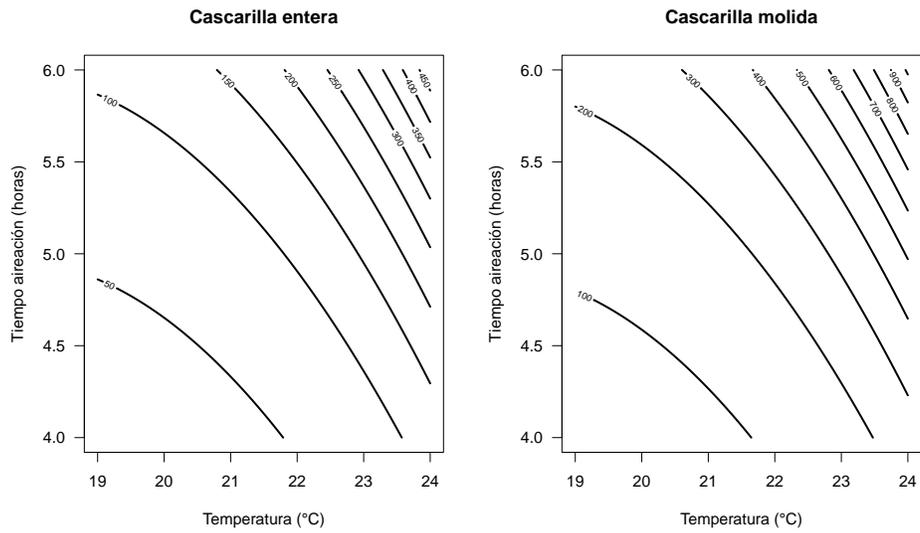


Figura 6: Gráfico de contornos para el valor esperado $\widehat{E}(Y)$ del rendimiento de orellana en función de la temperatura, tiempo y el tipo de cascarilla. Fuente: elaboración propia.

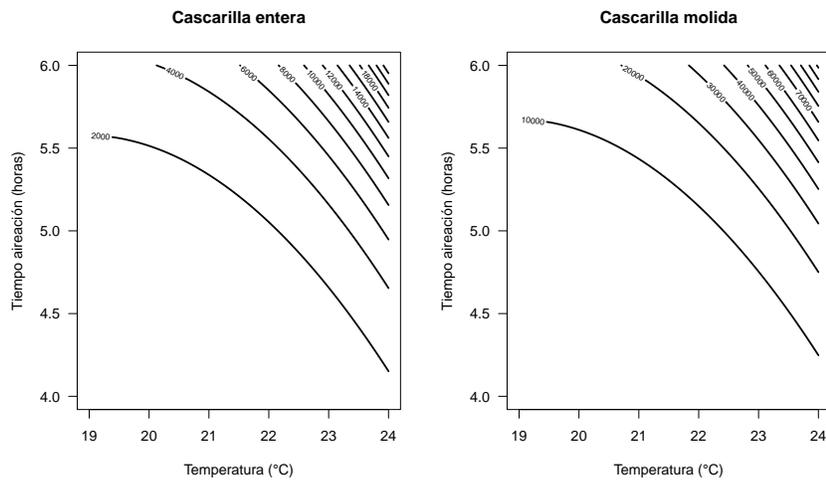


Figura 7: Gráfico de contornos para la varianza esperada $\widehat{Var}(Y)$ del rendimiento de orellana en función de la temperatura, tiempo y el tipo de cascarilla. Fuente: elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

Los modelos GAMLSS son una herramienta muy útil para modelar la relación entre una variable respuesta y un conjunto de covariables ya que permiten que la distribución para la variable de interés sea continua, discreta o mixta. En este artículo se mostró la aplicación de GAMLSS para estudiar los efectos de la temperatura, tiempo de aireación, humedad, cantidad de sustrato y tipo de sustrato sobre la producción industrial de orellana. De los resultados se encontró que la temperatura, el tiempo de aireación y el tipo de cascarilla son las variables que ayudan a explicar de forma significativa la producción de orellana; en particular, a mayor temperatura y a mayor tiempo de aireación la producción de orellana aumenta, se encontró también que la cascarilla molida favorece la producción de orellana duplicándola, frente al uso de cascarilla entera. Teniendo como referencia los rangos de las covariables en el estudio, se encontró que la producción de orellana se maximiza cuando la explotación se dá a temperatura de 24 °C, tiempo de aireación de 6 horas diarias y con cascarilla molida.

Los resultados aquí obtenidos pueden ser de mucha utilidad para las familias, cooperativas y empresas del sector fungicultor, se pueden utilizar para definir la mejor combinación de factores con el objetivo de maximizar la producción de orellana. Adicionalmente, la metodología usada en este artículo puede servir en un futuro como base para analizar datos experimentales de un estudio a mayor escala con covariables adicionales y con mayor número de observaciones.

Referencias

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19 (6), 716–723.
- Akaike, H. (1983). Information measures and model selection. *Bulletin of the International Statistical Institute*, 50, 277-290.
- Bonet, J., Pukkala, T., Fisher, C., Palahí, M., Martínez de Aragón, J. & Colinas, C. (2008). Empirical models for predicting the production of wild mushrooms in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forests in the Central Pyrenees. *Annals of Forest Science, Springer Verlag/EDP Sciences*.
- Buuren, S. (2001). An S Plus Program for drawing the Worm plot. [Consultada en noviembre de 2016]. Disponible en: <http://www.stefvanbuuren.nl/wormplot/wp.SSC.txt>.
- Buuren, S. & Fredriks, M. (2001). Worm plot: a simple diagnostic device for modelling growth reference curves. *Statistics in Medicine*, 20, 1259-1277.

- Cañedo, J. (2012). Cultivo de *Pleurotus ostreatus* en el valle de el Fuerte, Sinaloa: una alternativa de aprovechamiento de esquilmos agrícolas. (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma Indígena de México, Sinaloa, México.
- Cardona, A. (2011). Colección Buenas Prácticas, Hongos tipo ostra. *FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*.
- Cervantes, N. (2015). Cultivando setas de la especie *pleurotus pulmonarius* en el interior de las viviendas como un modelo empresarial que le permitirá a las víctimas del desplazamiento forzado la superación de su vulnerabilidad y propiciar su reinclusión social. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, 27, 80–87.
- de Castro, M.; Cancho, V. & Rodrigues, J. (2010). A hands-on approach for fitting long-term survival models under the GAMLSS framework. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 97 (2), 168–177.
- Dunn, P. K. & Smyth, G. K. (1996). Randomized quantile residuals. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5 (3), 236-244.
- Gilchrist, R.; Stasinopoulos, D.; Rigby, R.; Sedgwick, J. & Voudouris, V. (2011). Forecasting Film Revenues Using GAMLSS. *Proceedings of the 26th International Workshop on Statistical Modelling*. Disponible en: <https://ssrn.com/abstract=1782783>.
- Hernández, R.; López, C. & Suárez, C. (2006). Evaluación de crecimiento y producción de *pleurotus ostreatus* sobre diferentes residuos agroindustriales del departamento de Cundinamarca (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Hernández, F.; Torres, M.; Arteaga, L. & Castro, C. (2015). GAMLSS models applied in the treatment of agro-industrial waste. *Comunicaciones en Estadística*, 8 (2), 245–254.
- Martínez, F., de Miguel, S., Pukkala, T., Bonet, J., Ortega, P., Aldea, J. & Martínez, J. (2012). Yield models for ectomycorrhizal mushrooms in *Pinus sylvestris* forests with special focus on *Boletus edulis* and *Lactarius group deliciosus*. *Forest Ecology and Management*, 282, 63-69.
- R Core Team (2017). *R: A Language and Environmental for Statistical Computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>.
- Rigby, B. & Stasinopoulos, M. (2005). Generalized additive models for location scale and shape. *Applied Statistics*, 54 (3), 507–554.
- Sandercock G., Voss C.; Cohen D., Taylor M. & Stasinopoulos D. M. (2012). Centile curves and normative values for the twenty metre shuttle-run test in English schoolchildren. *Journal of Sports Sciences*, 30 (7), 679–687.

- Scandroglio, G., Gori, A., Vaccaro, E. & Voudouris, V. (2013). Estimating VaR and ES of the spot price of oil using futures-varying centiles. *International Journal of Financial Engineering and Risk Management*, 1 (1), 6–19.
- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *Annals of Statistics*, 6 (2), 461-464.
- Sierra, F. & Orozo, J. (2014). Sistema de cultivo para la gestión de hongos comestibles como complemento alimenticio dirigido a los habitantes de la Comuna 18 de Cali para mejorar la seguridad alimentaria causada por la inaccesibilidad (Tesis de pregrado). Universidad Icesi, Santiago de Cali, Colombia.
- Stasinopoulos, M., Rigby, B. & Akantziliotou, A. (2008). Instructions on how to use the gamlss package in R. [Consultado en noviembre de 2016].
- Tahvanainen, V., Miina, J., Kurttila, M. & Salo, K. (2016). Modelling the yields of marketed mushrooms in *Picea abies* stands in eastern Finland. *Forest Ecology and Management*, 362, 79–88.
- Tong, E. N., Mues, C. & Thomas, L. C. (2013). A zero-adjusted gamma model for mortgage loan loss given default. *International Journal of Forecasting*, 29, 548–562.
- Velasco, E., Zamora, M., Nieto, C., Martínez, J. & Montoya, A. (2010). Modelos predictivos de la producción de hongos silvestres comestibles en bosques de coníferas, Tlaxcala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1 (1), 95–104.

PROPIEDADES ESTRUCTURALES Y MAGNÉTICAS DE ALEACIONES $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ OBTENIDAS POR ALEAMIENTO MECÁNICO^a

STRUCTURAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF ALLOYS OF $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ OBTAINED BY MECHANICAL ALLOYING

MAURICIO GALVIS PATIÑO^b, YEBRAIL ROJAS MARTÍNEZ^b, DAGOBERTO OYOLA
LOZANO^b, HUMBERTO BUSTOS RODRÍGUEZ^b, HUGO MARTÍNEZ SÁNCHEZ^b

Recibido 03-12-2016, aceptado 15-03-2017, versión final 31-03-2017.

Artículo Investigación

RESUMEN: En el presente trabajo se reporta el estudio de las propiedades estructurales y magnéticas de la composición en forma de polvo de $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ con $x=0, 0.1285, 0.257$, preparadas por Aleamiento Mecánico (MA) en atmósfera de argón durante 72 horas mediante un molino planetario de alta energía. La caracterización estructural se realizó por medio de Difractometría de rayos X (XRD), para la caracterización magnética se utilizó la espectroscopía Mossbauer, los ciclos de histéresis de las muestras se obtuvieron utilizando un magnetómetro de muestra vibrante VSM (vibration sample magnetometry) de un sistema PPMS (Physical Property Measurement System). La fase de α -Fe se presenta para todo x mediante un pico característico cuya intensidad permanece ligeramente constante; sin embargo, si se observa una disminución del tamaño de cristalito de la fase α -Fe, resultado que se correlaciona con un aumento de su ancho al sustituir el Gd por el Tb. Los resultados de los espectros Mossbauer a temperatura ambiente indican que el sistema presenta un comportamiento ferromagnético para todas las composiciones y los ciclos de histéresis revelan que presenta un comportamiento magnéticamente semiduro.

PALABRAS CLAVE: aleamiento mecánico; difractometría de rayos X; espectroscopía Mossbauer; sistema GdTbFe.

ABSTRACT: In the present work the study of the structural and magnetic properties of the powder composition of $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ with $x = 0, 0.1285, 0.257$, prepared by Mechanical Alloying (MA) in argon atmosphere during 72 hours using a high energy planetary mill is reported. The structural characterization was performed by means of X-ray diffractometry (XRD), for the magnetic characterization Mossbauer

^aGalvis, M., Rojas, Y., Oyola, D., Bustos, H. & Martínez, H. (2016). Propiedades estructurales y magnéticas de aleaciones $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ obtenidas por aleamiento mecánico. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 6 (1), 83–92. DOI: 10.15446/rev.fac.cienc.v6n1.61394

^bDepartamento de Física, Universidad del Tolima, Barrio Santa Helena Parte Alta | Código Postal Nro. 730006299 Ibagué - Tolima - Colombia. Autor para correspondencia: mauricio.galvisp@udea.edu.co.

spectroscopy was used, the hysteresis cycles of the samples were obtained using the VSM (vibration sample magnetometry) of a PPMS (Physical Property Measurement System). The α -Fe phase is presented for all x by a characteristic peak whose intensity remains slightly constant, however, a decrease in the crystallite size of the α -Fe phase is observed, this result is correlated with an increase of its width when is replaced the Gd by the Tb. The results of the Mossbauer spectra at room temperature indicate that the system exhibits a ferromagnetic behavior for all compositions and the hysteresis cycles show that it exhibits magnetically semi-hard behavior.

KEYWORDS: mechanical alloying; X-ray diffraction; Mossbauer spectroscopy; GdTbFe System.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de almacenamiento de carácter Magneto-óptico (MO) presentan gran ventaja sobre los de carácter magnético, como lo menciona Sánchez (2007); su grabación, lectura y borrado se basan en un proceso termomagnético, el cual utiliza un haz proveniente de un láser de estado sólido para modificar la temperatura de Curie (T_c) del material, lo que produce que el campo coercitivo del mismo desaparezca logrando orientar sus dominios magnéticos de manera vertical en presencia de un campo externo. Los materiales utilizados en esta clase de memorias normalmente son de aleaciones entre un metal de transición (MT) y las tierras raras (TR), estas aleaciones se caracterizan por presentar propiedades magnéticas, eléctricas, magnetoópticas singulares; y además, presentan alta anisotropía magnética perpendicular uniaxial (AMP) con el eje de fácil magnetización (sin campo magnético externo) orientado perpendicularmente al plano de la película; estas propiedades son objeto de estudio desde hace décadas hasta nuestra época. Chaudari *et al.* (1973) mostraron que, al cambiar la composición de TR en blancos pulverizados, variaba considerablemente la magnetización de saturación a temperatura ambiente; éste cambio fue atribuido al acoplamiento antiferromagnético entre los sistemas de espines de los MT y las TR, asimismo la T_c y la magnetización varían en función de la temperatura. Avignant *et al.* (1998) mencionan que gracias a la alta resistividad de estas aleaciones su conductividad térmica no es muy elevada, lo que permite regiones de calentamiento local, requisito para lectura y escritura de medios magnéticos. Sallica *et al.* (2009) determinaron que compuestos de TR-MT presentan AMP, alta coercitividad, alta magnetización de saturación, gran efecto Kerr magneto óptico polar, elevada T_c . Soliman & Abu-Zied (2009) mencionan que como la temperatura de compensación de estos materiales es próxima a la temperatura ambiente se anula la imanación, logrando un campo coercitivo alto, lo que garantiza la estabilidad de los dominios magnéticos, siendo este un requisito para el almacenamiento de información por medios magneto-ópticos. Arrabal *et al.* (2012) demostraron que la utilización de TR como el Gd o el Nd mejoran las propiedades anticorrosivas de la aleación AM50. Rojas *et al.* (2012) estudiaron la composición en forma de polvo de $Tb_{0.257-x}Nd_xFe_{0.743}$ con $x=0, 0.125, 0.257$, aleada de manera mecánica y reportaron una fase amorfa al disminuir la temperatura, presentando un comportamiento ferromagnético y tendencia al paramagnetismo con el incremento

de la temperatura. Dada la importancia del estudio de aleaciones de TR-MT en ciencia y tecnología, nosotros reportamos en este estudio las propiedades magnéticas y estructurales de la composición en forma de polvo del sistema $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ con $x=0, 0.1285$ y 0.257 aleado por AM.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema en forma de polvo de alta pureza (99,9 %) de $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ con $x=0, 0.1285, 0.257$ fue aleado mecánicamente durante 72 horas en presencia de atmósfera de argón (Ar), con una frecuencia de 280 rpm, utilizando un molino planetario de alta energía FRITSCHE PULVERISETTE 7, con jarros y esferas de acero inoxidable de 50 ml de volumen y 11 mm de diámetro respectivamente; la relación entre masa de bolas y masa de polvo fue de 20:1. La caracterización estructural se llevó a cabo mediante la técnica de Difractometría de rayos X a temperatura ambiente, utilizando un difractómetro con radiación Cu $k\alpha$, marca X' Pert PRO MRD de PANalytical, los patrones de difracción fueron refinados usando el método Rietveld con el software MAUD (Lutterotti & Scardi, 1990). Los espectros Mossbauer se obtuvieron a temperatura ambiente usando un espectrómetro Mossbauer de transmisión con una fuente radioactiva de ^{57}Co inmersa en una matriz de Rodio (Rh). Los espectros Mossbauer fueron ajustados con un sextete, un doblete, un singlete y una distribución de campo hiperfino (HFD) utilizando el programa MOSFIT (Teillet & Varret, 1976). Los ciclos de histéresis se realizaron a temperaturas de 5K, 77K y 300K mediante PPMS con módulo VSM (Vibrating Sample Magnetometer) el cual permitió medir magnetización en función de campo magnético y graficarlos con el programa de análisis de datos ORIGIN.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 1 muestra el patrón de difracción de las muestras en forma de polvo de la composición de $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ para $x=0, 0.1285, 0.257$ obtenidas por AM durante 72 horas. La fase de α -Fe se presenta en las tres composiciones mediante un pico característico cuya intensidad permanece ligeramente constante, sin embargo, se observa un aumento en su ancho, el cual se puede correlacionar con la disminución del tamaño del cristalito de esta fase a medida que se va sustituyendo el Gd por el Tb como puede observarse a partir de los parámetros mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros obtenidos mediante DRX de la composición en forma de polvo de $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ con $x=0, 0.1285, 0.257$ molida durante 72 horas.

Muestras	Fases	Parámetros de Red	Tamaño del cristalino (nm)	Fracción de volumen
			\pm	
$Gd_{0.257}Fe_{0.743}$	Fe	a=2.865	14	62
	FeGd	a=4.805 c=4.063	24	4
	Gd ₂ O ₃	a=9.909	6	34
$Gd_{0.1285}Tb_{0.1285}Fe_{0.743}$	Fe	a=2.858	10	41
	FeGd	a=4.606 c=4.092	11	5
	FeTb	a=5.870 b=12.18 c=6.488	3	54
$Tb_{0.257}Fe_{0.743}$	Fe	a=2.860	8	52
	FeTb	a=5.804 b=12.13 c=6.686	3	48

El primer difractograma de la Figura 1 muestra que cuando $x = 0$, se presenta la fase α -Fe con parámetro de red $a = 2.865 \text{ \AA}$, en los picos correspondientes a los ángulos $2\theta=44.54^\circ, 64.95^\circ, 82.34^\circ$ y 98.97° , para ángulos distintos se presentan las fases: FeGd con estructura hexagonal y parámetros de red $a = 4.805 \text{ \AA}$ y $c = 4.063 \text{ \AA}$ y la fase Gd₂O₃ que tiene una estructura cúbica con parámetro de red $a = 9.909 \text{ \AA}$, la presencia de óxidos se asocia a una pequeña contaminación en el proceso, al contenido de oxígeno(O) y nitrógeno(N) dentro del Ar utilizado como atmósfera y a la tendencia de las TR a sufrir procesos de oxidación. El segundo difractograma para $x = 0.1285$ presenta la fase α -Fe con parámetro de red $a = 2.858 \text{ \AA}$, en los picos correspondientes a los ángulos $2\theta=44.36^\circ, 64.97^\circ, 82.21^\circ$ y 99.04° , para ángulos diferentes presenta las fases: FeGd que tiene una estructura hexagonal con parámetros de red $a = 4.606 \text{ \AA}$ y $c = 4.092 \text{ \AA}$, la fase FeTb con estructura ortorrómbica y parámetros de red $a = 5.870 \text{ \AA}$, $b = 12.18 \text{ \AA}$ y $c = 6.488 \text{ \AA}$. En el último difractograma cuando $x = 0.257$ observamos la fase α -Fe con parámetro de red $a = 2.860 \text{ \AA}$, en los picos correspondientes a los ángulos $2\theta=44.61^\circ, 64.98^\circ, 82.38^\circ$ y 99.11° y una fase correspondiente a FeTb con estructura ortorrómbica con parámetros de red $a = 5.804 \text{ \AA}$, $b = 12.13 \text{ \AA}$ y $c = 6.686 \text{ \AA}$.

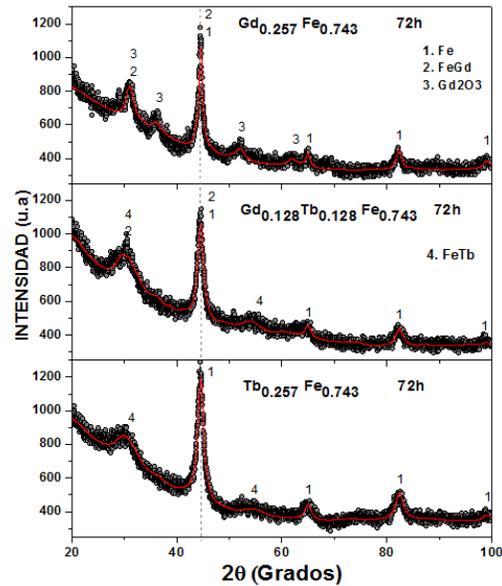


Figura 1: Difractogramas de rayos X de la composición en forma de polvo de $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ con $x = 0, 0.1285, 0.257$ molida durante 72 horas. Fuente: Elaboración propia.

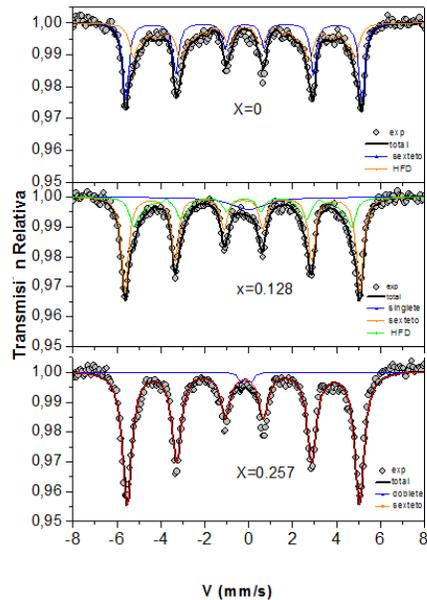


Figura 2: Espectros Mossbauer de la composición en forma de polvo de $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ con $x = 0, 0.1285, 0.257$ molida durante 72 horas. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2 presenta los espectros Mossbauer a temperatura ambiente del sistema de $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ con $x = 0, 0.1285, 0.257$ en forma de polvo, aleados mecánicamente durante 72 horas; en la Tabla 2 se presentan los parámetros hiperfinos donde el campo hiperfino (HF)

Tabla 2: Campo coercitivo (H_c), Magnetización remanente (M_r) y Magnetización de saturación (M_s) de la composición en forma de polvo de $Gd_{0,257-x}Tb_xFe_{0,743}$ con $x=0, 0.1285, 0.257$ molida durante 72 horas.

Muestra	Componente	δ	$\Gamma/2$ (mm/s)	QS	HF (T)	%
$Gd_{0,257}Fe_{0,743}$	Sexteto	0.004 ± 0.074	0.163 ± 0.010	-0.041 ± 0.007	33.3 ± 0.5	46
	HFD				30.4 ± 0.5	54
$Gd_{0,1285}Tb_{0,1285}Fe_{0,743}$	Singlete	0.252 ± 0.004	0.944 ± 0.137	—	—	10
	Sexteto	0.026 ± 0.002	0.195 ± 0.006	-0.044 ± 0.005	33.4 ± 0.5	61
	HFD				29.2 ± 0.5	29
$Tb_{0,257}Fe_{0,743}$	Doblete	0.162 ± 0.063	0.150 ± 0.001	0.400 ± 0.001	—	2
	Sexteto	0.046 ± 0.004	0.256 ± 0.007	-0.044 ± 0.008	33.1 ± 0.5	98

está dado en teslas, el ancho de línea ($\Gamma/2$) al igual que el desdoblamiento cuadrupolar (QS) y el desvío isomérico (δ) vienen dados en mm/s, parámetros propios de cada componente con la que se realizó el ajuste del sistema. El espectro para $x = 0$ se ajustó con dos componentes: Un sexteto con un HF de 33T asociado a la fase α -Fe y una distribución de campo hiperfino (HDF) con una área espectral de 54% y HF de 30T, la cual se asocia a la fase FeGd de acuerdo a los resultados obtenidos por DRX. Para $x = 0.1285$ la muestra se ajustó con tres componentes: Una fase paramagnética representada por un singlete de área espectral 10% asociado a sitios de Fe con presencia de átomos de Tb como vecindario; un sexteto con un HF de 33T y área espectral de 61% asociado a la fase α -Fe y una HFD con área espectral 29% y HF de 29T asociada a la fase FeGd encontrada por XRD. Para $x = 0.257$ el espectro fue ajustado con dos componentes: Un doblete de área espectral 2% asociado a unos pocos sitios de Fe con presencia de átomos de Tb y un sexteto con área espectral mayoritaria de 98% y HF de 33T correspondiente a sitios ricos de α -Fe.

La Figura 3 muestra los ciclos de histéresis de las muestras en polvo de la composición $Gd_{0,257-x}Tb_xFe_{0,743}$ con $x = 0, 0.1285, 0.257$ molida durante 72 horas, a temperaturas de $5K(-268.15^\circ C)$, $77K(-196.15^\circ C)$ y $300K(26.85^\circ C)$, de donde se observa que la disminución de la temperatura favorece el aumento de las propiedades extrínsecas como el campo coercitivo y la magnetización remanente mostrados en las Figuras 4 y 5 respectivamente. El campo coercitivo de la composición estudiada está en el rango de 77.57 (para la muestra $x = 0.257$ con $T = 300K$) a 493.85 Oe, (para la muestra $x = 0$ con $T = 5K$), mostrando tendencia a un valor constante a partir de los 77 K para las composiciones de GdFe ($x = 0$) y TbFe ($x = 0.257$); la magnetización remanente presenta valores entre 3.20 emu/g (para la muestra $x = 0.257$ con $T = 300K$), y 15.35 emu/g (para la muestra $x = 0.1285$ con $T = 5K$).

Se observa a partir de las Figuras 4 y 5, un comportamiento inversamente proporcional a la temperatura tanto del campo coercitivo como de la magnetización remanente, lo que indica que al

disminuir la temperatura se favorece el carácter ferromagnético de la composición estudiada.

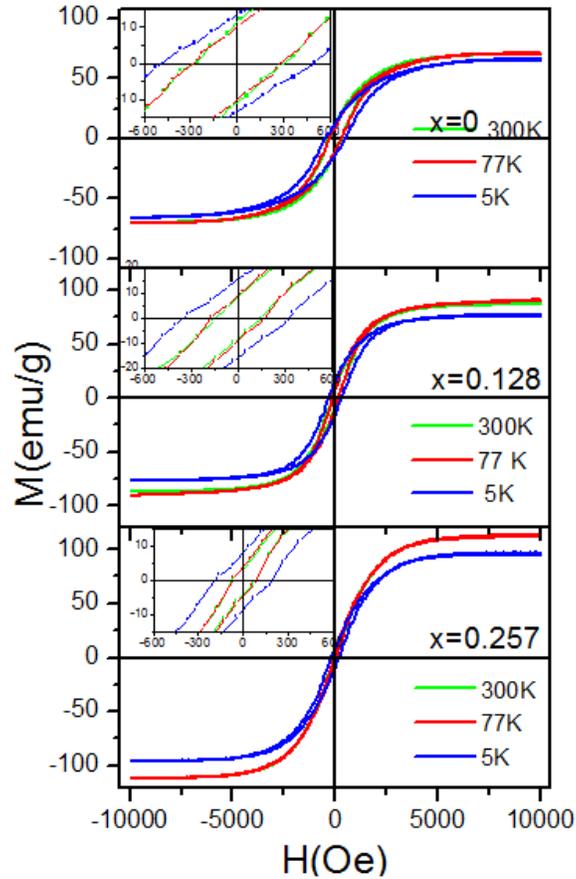


Figura 3: Ciclos de histéresis de la composición en forma de polvo de $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ con $x = 0, 0.1285, 0.257$ molida durante 72 horas. Fuente: Elaboración propia.

Con los datos mostrados en la Tabla 3 se concluye que la aleación presenta un comportamiento magnéticamente semiduro.

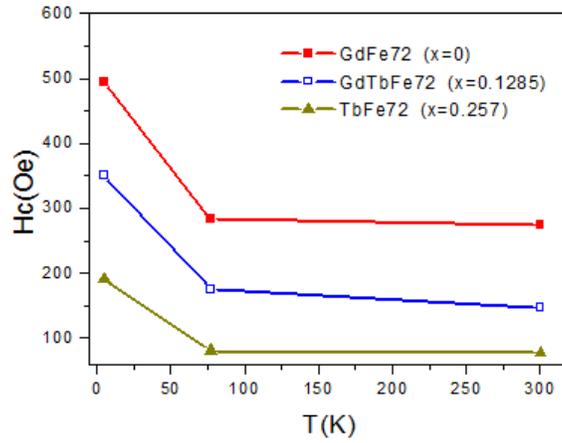


Figura 4: Campo coercitivo (HC) en función de la temperatura de la composición en forma de polvo de $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ con $x = 0, 0.1285, 0.257$ molida durante 72 horas. Fuente: Elaboración propia.

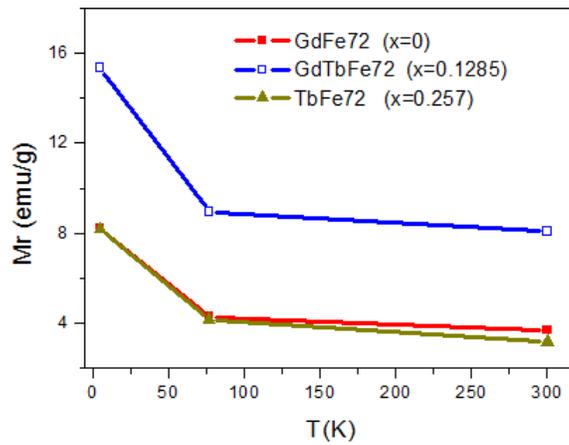


Figura 5: Magnetización remanente (Mr) en función de la temperatura de la composición en forma de polvo de $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ con $x = 0, 0.1285, 0.257$ molida durante 72 horas. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3: Campo coercitivo (H_c), Magnetización remanente (M_r) y Magnetización de saturación (M_s) de la composición en forma de polvo de $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ con $x = 0, 0.1285, 0.257$ molida durante 72 horas.

Muestra	Variables	Temperatura (K)		
		5	77	300
$Gd_{0.257}Fe_{0.743}$	$-H_c$ (Oe)	493.85	282.84	274.96
	M_r (emu /g)	8.22	4.30	3.69
	M_s (emu /g)	66.11	70.10	70.52
$Gd_{0.1285}Tb_{0.1285}Fe_{0.743}$	$-H_c$ (Oe)	350.41	175.05	146.99
	M_r (emu /g)	15.35	8.96	8.08
	M_s (emu /g)	76.01	85.98	90.44
$Tb_{0.257}Fe_{0.743}$	$-H_c$ (Oe)	190.46	80.21	77.57
	M_r (emu /g)	8.17	4.18	3.20
	M_s (emu /g)	96.52	111.39	112.01

4. CONCLUSIONES

El sistema en forma de polvo de $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ con $x = 0, 0.1285, 0.257$, preparada por AM durante 72 horas en atmósfera de argón, presenta un comportamiento ferromagnético.

El sistema $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ con $x = 0, 0.1285, 0.257$, preparada por Aleamiento Mecánico durante 72 horas en atmósfera de argón, presenta una estructura cristalina con un comportamiento magnéticamente semiduro, lo que permite su utilización como materia prima en la fabricación de películas para almacenamiento MO a excepción de la composición TbFe a 77 K y 300 K.

Cuando se sustituye el Gd por el Tb en el sistema $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ se observa que el campo coercitivo tiende a disminuir cuando aumenta la concentración de Tb independientemente de la temperatura.

El Gd favorece el orden magnético del Fe permitiendo que haya aleación.

La caracterización estructural y magnética del sistema $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ con $x = 0, 0.1285, 0.257$ obtenido por AM a 72 horas, revela que las propiedades estructurales y magnéticas de aleaciones de Fe-TR varían con la composición de la TR y la temperatura.

Se debe seguir el estudio con tiempos de molienda distintos que permita establecer la influencia de éste sobre las propiedades estructurales y magnéticas del sistema $Gd_{0.257-x}Tb_xFe_{0.743}$ con $x = 0, 0.1285, 0.257$.

5. AGRADECIMIENTOS

Se le agradece a la oficina de investigaciones de la Universidad del Tolima y a COLCIENCIAS contrato 110671250407, por el apoyo económico para la realización de este proyecto.

Referencias

- Arrabal, R., Matykina, E., Pardo, A., Merino, M.C., Paucar, K., Mohedano, M. & Casajús, P. (2012). Corrosion behaviour of AZ91D and AM50 magnesium alloys with Nd and Gd additions in humid environments. *Corrosion Science*, 55, 351-362.
- Avignant D., Largeau E., Gaumet V., Dugat P. & El-Ghozzi, M. (1998). Recent progress in tetravalent terbium chemistry. *Journal of alloys and compounds*, 275, 1-5.
- Chaudari, P., Cuomo, J. J. & Gambino, R. J. (1973). Amorphous Metallic Films for Magneto-optic Applications. *Applied Physics Letters*, 22 (7), 337-339.
- Lutterotti L. & Scardi P. (1990). *J. Appl. Crystallogr.* 23, 246-252.
- Rojas, Y., Oyola, D., Bustos, H., Pérez, G. & Greneche, J. (2012). Study of the Magnetical and Structural Properties of Powders of Tb_{0.257-x}Nd_xFe_{0.743} Mechanically Alloyed. *Revista Colombiana de Física*, 44 (2), 155-158.
- Sallica, E., Peña Rodríguez, V. A., Vásquez Mansilla, M. & Butera, A. (2009). Dependencia de las propiedades magnéticas con el espesor en películas delgadas de FePt. *Revista de Investigación de Física*, 12 (2), 22-29.
- Sánchez Villarejo, N. (2007). Del soporte papel perforado y cinta magnética al disco 3d holográfico anatómico nanotecnológico: nuevos soportes magneto-ópticos y ópticos de almacenamiento masivo de información. *Revista Anales de Documentación*, 10, 429-450.
- Soliman, S. A. & Abu Zied, B. M. (2009). Thermal Genesis, Characterization, And Electrical Conductivity Measurements Of Terbium Oxide Catalyst Obtained From Terbium Acetate. *Thermochimica Acta*, 49 (1), 84-91.
- Teillet, J. & Varret, F. (1976) MOSFIT program, Unpublished. Université du Maine, Le Mans, France.

**DIAGNÓSTICO DE LA COLECCIÓN DE ESCARABAJOS
COPRÓFAGOS (SCARABAEIDAE: SCARABAEINAE) DEL
MUSEO ENTOMOLÓGICO FRANCISCO LUIS GALLEGO,
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, CAMPUS
MEDELLÍN^a**

**DIAGNOSIS OF THE DUNG BEETLES COLLECTION
(SCARABAEIDAE: SCARABAEINAE) WITHIN THE
ENTOMOLOGICAL MUSEUM FRANCISCO LUIS GALLEGO,
NATIONAL UNIVERSITY OF COLOMBIA, CAMPUS
MEDELLÍN**

DIEGO ESTEBAN MARTÍNEZ REVELO ^b, CLAUDIA A. MEDINA^c

Recibido 20-02-2017, aceptado 19-04-2017, versión final 08-05-2017.

Artículo Investigación

RESUMEN: Se presenta el diagnóstico del estado de organización y conservación de la colección de escarabajos coprófagos (Scarabaeidae: Scarabaeinae) del Museo Entomológico Francisco Luis Gallego, de acuerdo con los diferentes niveles de curaduría del índice de Salud de Colecciones (ISC). Se evaluó la calidad de la información, montaje, resolución taxonómica, representatividad geográfica y taxonómica y se asignaron niveles curatoriales a 2406 especímenes, con el fin de obtener información sobre el perfil de organización de la colección y las prioridades de gestión de la misma. 964 especímenes se encuentran determinados a nivel de especie, 790 en nivel de género y 652 en subfamilia. El mayor porcentaje de especímenes corresponden a los niveles dos (30.6%): ausencia de un proceso curatorial y taxonómico adecuado; y cinco (30.2%): curaduría completa, pero sin nomenclatura taxonómica actualizada. El índice de salud muestra que el 68.9% de la colección requiere actividades curatoriales. Las prioridades de manejo se enfocan en los niveles dos y tres, referentes a la organización física y determinación taxonómica. Se hace urgente concentrar esfuerzos en la determinación de los géneros y especies, que puede ser apoyado por revisión de especialistas. Además, es necesario catalogar, sistematizar e incorporar especímenes en la colección taxonómica central.

^aMartínez Revelo, D. & Medina, C. (2017). Diagnóstico de la colección de escarabajos coprófagos (Scarabaeidae: Scarabaeinae) del museo entomológico Francisco Luis Gallego, Universidad Nacional de Colombia, campus Medellín *Revista de la Facultad de Ciencias*, 6 (1), 93–106. DOI: 10.15446/rev.fac.cienc.v6n1.62794

^bGrupo de investigación en sistemática molecular, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. diemartinez-re@unal.edu.co.

^cInstituto de Investigación en Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, Villa de Leyva, Boyacá. camedina@humboldt.org.co.

PALABRAS CLAVE: curaduría; gestión de colecciones; índice de salud; representatividad geográfica y taxonómica.

ABSTRACT: Here we present a diagnosis of the organization and conservation of dung beetles collection (Scarabaeidae: Scarabaeinae) within the Entomological Museum Francisco Luis Gallego, according to the different curatorship levels of the collection health index (CHI). The information quality, preparation, taxonomic resolution, geographic and taxonomic representation were evaluated and curatorial levels were assigned to 2406 specimens, in order to obtain information on the collection profile and the management priorities. 964 specimens are determined at the species level, 790 at the genus level and 652 at the subfamily. The highest percentage of specimens were found in levels two (30.6 %): absence of a suitable curatorial and taxonomic process; and five (30.2%): specimens that present complete curatorship, but without updated taxonomic nomenclature. The health index shows that 68.9 % of the collection requires curatorial activities. Management priorities are focused in levels two and three, related to physical organization and material accessibility by specialists. There is an urgent need to focus efforts on the determination of genera and species, which can be supported by expert review. In addition it is necessary to catalogue, systematize and incorporate specimens in the central taxonomic collection.

KEYWORDS: curatorship; collection management; health index; geographical and taxonomic representativity.

1. INTRODUCCIÓN

Las colecciones biológicas resguardan especímenes, testigos del patrimonio natural de un país. Además, contienen gran cantidad de información sobre la diversidad biológica que puede ser verificada mediante la observación directa de los especímenes preservados, generando información y conocimiento fundamental, no solo en disciplinas de la biología (sistemática, taxonomía, biogeografía, entre otras), sino que también contribuye en diferentes aspectos de la sociedad, por sus valores históricos, estéticos y su función en procesos de apropiación de la ciencia (Suárez & Tsutsui, 2004; Bradley *et al.*, 2014). Las colecciones son una fuente insustituible de información científica (Wiggins *et al.*, 1991), donde se generan importantes insumos y herramientas que aportan en la gestión y conservación de la biodiversidad (Medina *et al.*, 2016); es así como a partir de registros biológicos de especímenes de colección, se producen catálogos y/o listados de especies locales y regionales, revisiones taxonómicas, estadísticas y mapas de distribución, así como se identifican vacíos de información.

El proceso para transformar un insecto recolectado en un espécimen de museo, y posteriormente en un registro biológico público y disponible, requiere de una serie de pasos curatoriales que comprenden la preparación, montaje, etiquetado, determinación taxonómica, catalogación, sistematización, ubicación en los cuartos de almacenamiento y publicación de la información asociada a cada ejemplar. Uno de los procesos principales en una colección biológica es la determinación taxonómica, esto requiere una organización adecuada de los especímenes para que sean accesibles a

los investigadores y así su proceso de clasificación en especies o morfoespecies sea eficiente. Cuando los ejemplares de museo son determinados taxonómicamente a especie adquieren un mayor valor, ya que se convierten en registros biológicos fundamentales para la investigación en diferentes campos de la ciencia. De igual manera, son referencia para identificar mediante comparación ejemplares provenientes de otros campos de investigación como la agricultura, silvicultura, salud pública y docencia (Suárez & Tsutsui, 2004). En los procesos actuales de pérdida y transformación acelerada de los ecosistemas naturales, las colecciones han recobrado importancia en el ámbito mundial (Bradley *et al.*, 2014), siendo útiles para documentar cambios en las comunidades y ecosistemas, así como una fuente importante de datos en evaluaciones de cambio climático, especies invasoras e identificación de especies amenazadas (Deslisle *et al.*, 2003; Robbirt *et al.*, 2011; Darrigan, 2012).

Aunque el proceso curatorial y la taxonomía son actividades fundamentales para mantener con vida las colecciones, son igualmente importantes los procesos de administración y de gestión que involucran entre otras: obtención de recursos, manejo de personal, formación de taxónomos, revisión de especialistas en los diferentes grupos, movilidad e intercambio de especímenes, así como proyección en cuanto al crecimiento y prioridades de la colección. En algunos casos, por la falta de recursos constantes e infraestructura necesaria para un buen funcionamiento de las colecciones (Arbeláez *et al.*, 2015), no se tiene la capacidad de realizar todas las actividades, ni procesar de manera óptima el material proveniente de expediciones biológicas, lo cual se traduce en acumulación de ejemplares recolectados y dificultades en el manejo de la colección. Por estas razones, se hace evidente la necesidad de generar estrategias de organización y establecer medidas cuantitativas que determinen el estado de salud de las colecciones y así priorizar esfuerzos, gestionar adecuadamente las colecciones y obtener apoyo financiero para su buen funcionamiento (Danks, 1991).

McGinley (1993) propone un sistema de codificación numérica y comparable, que identifica el estado de curación de las unidades de almacenamiento, útil en colecciones de insectos. Este sistema define un índice de salud que fue adaptado y aplicado en colecciones de vertebrados (Williams *et al.*, 1996), herpetológicas (Waller & Simmons, 2003) y paleontológicas (Hollis *et al.*, 2010), entre otras. Fernández *et al.* (2005) adaptó y aplicó el sistema en las colecciones del Instituto Alexander von Humboldt y en el Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, proporcionando un modelo de referencia replicable en otras colecciones del país, como en la colección de anfibios de la Pontificia Universidad Javeriana (Corredores, 2009).

El Museo Francisco Luis Gallego hace parte de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, su infraestructura se ubica en el bloque 11 del campus universitario el Volador y tiene como misión coleccionar, investigar, conservar, preservar y difundir el conocimiento derivado del estudio de las colecciones entomológicas de los insectos de Colombia. Se considera uno de los museos más antiguos del país, fue fundado en el año 1937 con la iniciativa del profesor Francisco Luis Gallego que inició

una colección de insectos a la cual llamó “Archivo Entomológico”. Con el objetivo de contribuir con el proceso curatorial y establecer prioridades para el mejoramiento de la calidad de la colección de escarabajos coprófagos (*Coleoptera: Scarabaeidae: Scarabaeinae*) del Museo, en este artículo se presenta el diagnóstico de salud, perfil de organización y prioridades de gestión, de acuerdo con los diferentes niveles de curaduría propuesto por McGinley (1993) y adaptados por Fernández *et al.* (2005).

2. METODOLOGÍA

Para realizar el presente estudio, se utilizó información proveniente de los especímenes depositados en la colección pertenecientes al grupo de escarabajos coprófagos (*Coleoptera: Scarabaeidae: Scarabaeinae*). Cada espécimen fue evaluado en su calidad información, montaje y resolución taxonómica, siendo asignados a un nivel curatorial de acuerdo con el sistema de codificación numérica propuesto por McGinley (1993) y modificado por Fernández *et al.* (2005). Posteriormente se determinó la representatividad geográfica y taxonómica de los registros. Los datos se organizaron en una tabla en Microsoft Excel para el cálculo del perfil, índice de salud y prioridades de manejo de la colección, de la siguiente manera:

PERFIL DE ORGANIZACIÓN: El perfil de la colección se obtuvo mediante la sumatoria del número de especímenes por cada nivel curatorial que se codifican de 0 a 10, donde el nivel 0: indica la ausencia de material; nivel 1: material de conservación; niveles 2 - 4: organización física; niveles 5 - 6: accesibilidad a los ejemplares; niveles 7 - 9: rescate de información y nivel 10: material científico depositado.

ÍNDICE DE SALUD (ISC): El índice de salud de la colección se calculó sumando la cantidad de especímenes presentes en los niveles 3 y 6 a 10, mediante la siguiente fórmula según Corredores (2009):

$$ISC = \left[\frac{\sum N3 + \sum N6 - N10}{Total\ registros} \right] \quad (1)$$

N= Especímenes asignados a los niveles de curación específicos (N3, N6 a N10).

Se tuvo en cuenta la proporción de los niveles 3 y 6 a 10 como un indicador de salud debido a que en una situación hipotética, el perfil de una colección saludable sería bimodal, con la mayor cantidad de especímenes por encima del nivel 6, así como también, por la incorporación de nuevos especímenes que necesitan ser clasificados (Nivel 2) y que resultan en especímenes accesibles a especialistas (Nivel 3), por lo que una gran parte de los especímenes también se concentraría en este nivel (McGinley, 1993). Especímenes en el nivel 3 indica que la colección está en crecimiento, mientras la concentración de valores en niveles superiores al 6, refleja una buena capacidad de procesamiento e incorporación de especímenes a la colección. El índice se puede expresar en porcentaje

con un rango de 0-100, donde los valores obtenidos de 80-100 serán de un perfil óptimo, mientras los valores entre 0-79 indicarán que el perfil de la colección está por optimizar (Corredores, 2009).

PRIORIDADES DE GESTIÓN: Las prioridades de gestión se determinaron en porcentajes por cada nivel; en la prioridad uno, se sumaron los registros que se presentan en los niveles cero a uno, dividido por el total de registros de la colección por 100. Para la prioridad dos, se sumaron los niveles del dos al cuatro. Para la prioridad tres, se sumaron los niveles del cinco al seis y se realizó la suma de los niveles siete al nueve para la prioridad cuatro. Se utilizaron las siguientes fórmulas según Corredores (2009):

$$\text{Prioridad 1} = \left[\frac{\sum_{N=0}^1 N}{\text{total de registros}} \right] \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Prioridad 2} = \left[\frac{\sum_{N=2}^4 N}{\text{total de registros}} \right] \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Prioridad 3} = \left[\frac{\sum_{N=5}^6 N}{\text{total de registros}} \right] \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Prioridad 4} = \left[\frac{\sum_{N=7}^9 N}{\text{total de registros}} \right] \times 100 \quad (5)$$

N= Especímenes asignados a los niveles cada nivel curatorial.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se evaluaron en total 2406 especímenes, 1684 depositados en dos gabinetes de madera y nueve cajas entomológicas Cornell incluidas en la colección taxonómica central y 722 especímenes de miscelánea en la sección de curaduría. La conservación de los especímenes se realiza mediante manejo preventivo, controlando el ambiente de almacenado a una temperatura de $17 \pm 1^\circ\text{C}$ y humedad relativa del 53 %.

CALIDAD DEL MONTAJE: Todos los especímenes se encuentran preservados en seco y cuentan con las principales estructuras morfológicas para su determinación, algunos especímenes presentan pérdida de algunas partes corporales como tarsos y tibias. No se detectó la presencia de agentes de deterioro de colecciones, sin embargo, un bajo porcentaje de especímenes se encuentra montado en agujas (2 %), el 98 % restante en alfiler entomológico. 1748 especímenes cuentan con rótulos de localidad e información específica de departamento, municipio, localidad, georeferencia, altitud, método de captura, recolector y fecha. 503 especímenes presentaron rótulo de localidad, sin embargo, la información asociada está incompleta; en algunos casos, brinda la ubicación geográfica a

nivel de país o departamento, localidad, recolector y fecha. Por último, 155 especímenes no tienen rótulo.

Se observaron dos sistemas de rótulos para asignar la determinación taxonómica y el número de catálogo en la colección: 1342 especímenes tienen rotulo de determinación de manera individual, mientras que la determinación taxonómica para 1064 especímenes, se encuentra en una etiqueta general asignada a la caja Ward. Así mismo, 139 especímenes tienen asignado un número de catálogo individual, 1398 especímenes tienen asignado un número de catálogo general y 869 especímenes no se encuentran catalogados.

RESOLUCIÓN TAXONÓMICA: la resolución taxonómica en el que se encuentran determinados los especímenes de escarabajos coprófagos del museo, corresponde a 964 especímenes en nivel de especie, 790 en nivel de género y 652 en subfamilia.

PERFIL DE ORGANIZACIÓN: El perfil de la colección muestra una distribución bimodal con los niveles dos y cinco en alto porcentaje. Los valores indican que un 30.6% de los especímenes no se encuentran correctamente separados (ubicados en misceláneas), ni el tratamiento taxonómico es adecuado, no están incorporados en la colección y son inaccesibles para los especialistas; sin embargo, un 30.2% tienen un montaje adecuado, están determinados a nivel de especie y se encuentran incluidos en la colección, aunque necesitan una actualización en la nomenclatura taxonómica respectivamente. El 21% de los especímenes se encuentra en el nivel tres, tienen un montaje completo, están clasificados y accesibles para los especialistas, pero el material no se ha determinado a nivel de especie. Un último porcentaje importante se observa en el nivel seis, el 11% de los especímenes cuentan con un proceso curatorial y taxonómico completo, pero no se encuentran catalogados ni sistematizados (Figura 1). La ausencia de especímenes en el nivel cuatro se debe principalmente a que en la colección no se encontró material determinado a especie que deba ser ingresado al museo, así mismo, ningún espécimen cumple con los criterios para ser asignado a los niveles 7 a 10, que involucran el inventario de especies, sistematización y publicación de los registros.

La colección de escarabajos coprófagos presenta una curación incompleta, el 89% de los especímenes se ubica por debajo del nivel cinco, es decir, existe material mezclado en cajas de miscelánea, los especímenes se encuentran determinados en diferentes categorías taxonómicas (Subfamilia, género y especie), no son fácilmente accesibles y no se ha realizado rescate de información. Resultados similares se obtuvieron en la colección entomológica del Instituto Smithsonian (NMNH) en su evaluación de 1992 donde el 72.9%, de los especímenes fueron asignados por debajo del mismo nivel (Figura 1). Aunque los perfiles de estas colecciones muestran diferencias debido a sus diferentes historias y necesidades, reflejan problemas comunes como la inadecuada determinación taxonómica a nivel de género y especie, falta de catalogación y sistematización de los registros biológicos, imprecisión en

las localidades y la ausencia de curadores en los diferentes taxones evaluados (McGinley, 1993; Fernández *et al.*, 2005).

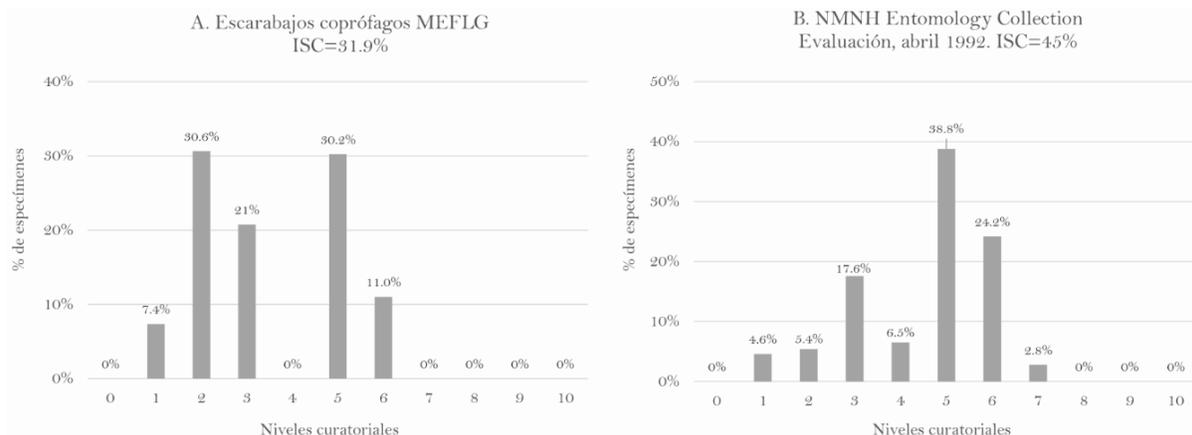


Figura 1: Comparación de perfiles de colección de diferentes instituciones. Fuente: A. Elaboración propia, B. McGinley, 1993.

Se observaron diferencias en la asignación de los niveles entre los géneros de escarabajos coprófagos depositados en la colección: Los niveles curatoriales más bajos fueron ocupados por géneros con alto nivel de incertidumbre en la determinación a nivel de especie, *Ateuchus*, *Canthon*, *Canthidium*, *Onthophagus* y *Uroxys*, que corresponden a géneros que carecen de revisiones taxonómicas recientes. Mientras que los niveles curatoriales más altos fueron ocupados por géneros que cuentan con herramientas taxonómicas para su determinación, en este grupo se encuentran especímenes pertenecientes a los géneros *Coprophanaeus*, *Diabroctis*, *Eurysternus*, *Ontherus*, *Oxysternon*, *Phanaeus* y *Sulcophanaeus* (Tabla 1), sin embargo, en algunos casos la nomenclatura está desactualizada (Nivel 5).

ÍNDICE DE SALUD (ISC): El índice de salud de la colección fue del 31.2%, valor bajo teniendo en cuenta que el índice varía de 0 a 100%. El resultado está relacionado a la ausencia de especímenes en los niveles por encima de siete, correspondientes a material utilizado en investigaciones con información sistematizada y usada en estudios faunísticos. El índice muestra que falta un 68.8% del material por optimizar, principalmente en la separación de los especímenes en diferentes cajas de almacenamiento (Organización física), determinación taxonómica de géneros y especies, sistematización y catalogación. En un perfil e índice de salud ideal, el 75% del material debería ser encontrarse por encima del nivel siete, lo que resulta en un índice de salud cercano al 100%.

PRIORIDADES DE GESTIÓN: Los niveles de prioridad se presentan en la figura 2. El 30% de los especímenes se encuentran en prioridad tres, son accesibles pero se necesita trabajo de identifi-

Tabla 1: Niveles curatoriales asignados por género de escarabajos coprófagos depositados en el MEFLG, Universidad Nacional de Colombia, campus Medellín.

Género	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 5	Nivel 6	Total
<i>Anomiopus</i>	1	0	1	0	0	2
<i>Ateuchus</i>	3	9	17	0	0	29
<i>Canthidium</i>	18	42	135	57	0	252
<i>Canthon</i>	5	26	109	275	0	415
<i>Canthonella</i>	0	0	1	0	0	1
<i>Copris</i>	0	0	1	0	0	1
<i>Coprophanaeus</i>	0	3	1	62	24	90
<i>Deltochilum</i>	7	4	19	28	18	76
<i>Diabroctis</i>	2	0	0	0	7	9
<i>Dichotomius</i>	2	8	47	74	0	131
<i>Digithontophagus</i>	0	6	0	0	4	10
<i>Eurysternus</i>	4	8	0	7	105	124
<i>Gromphas</i>	0	0	0	0	2	2
<i>Homocopris</i>	0	0	0	3	0	3
<i>Ontherus</i>	1	0	0	2	39	42
<i>Onthophagus</i>	8	79	95	160	11	353
<i>Oruscatus</i>	0	0	0	0	3	3
<i>Oxysternon</i>	3	0	0	1	37	41
<i>Phanaeus</i>	1	5	2	18	8	34
<i>Scatmius</i>	0	1	0	0	0	1
<i>Scybalocanthon</i>	0	0	11	0	0	11
<i>Sulcophanaeus</i>	0	0	0	4	7	11
<i>Trichillidium</i>	0	1	3	4	0	8
<i>Uroxys</i>	5	10	58	32	0	105
Total general	60	202	500	727	265	1754

cación taxonómica a nivel de género y especie, proceso que puede ser facilitado por la revisión de especialistas. El 21 % de los especímenes se encuentran en prioridad dos, relacionado a la organización física, por lo tanto hay que enfocar esfuerzos en la separación de los especímenes ubicados en cajas de miscelánea, incorporar los especímenes en su respectiva caja Cornell al interior de la colección taxonómica central, catalogar y sistematizar la información asociada. Fernández *et al.* (2005) presenta un perfil de prioridades para una colección ideal (Figura 2), a diferencia de la colección del Museo Entomológico Francisco Luis Gallego, los mayores porcentajes deben encontrarse en las prioridades cuatro (inventario de especies) y dos (organización física).

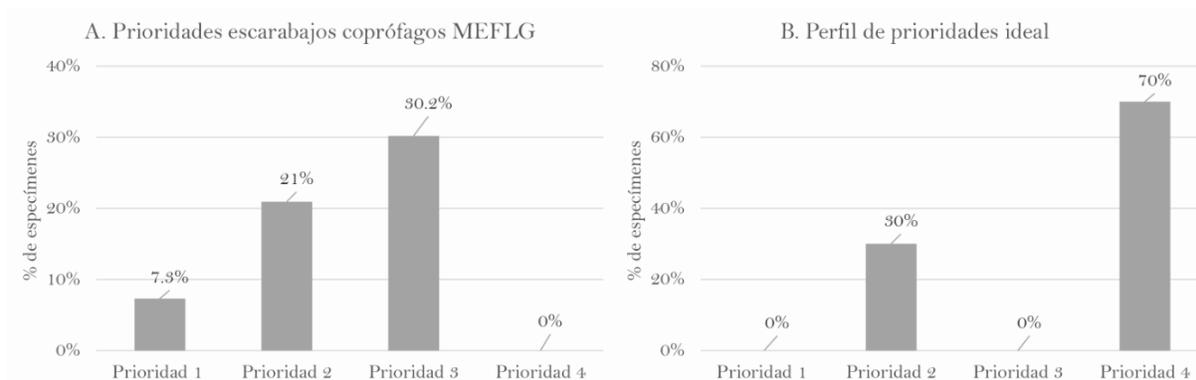


Figura 2: Prioridades de gestión de la colección de escarabajos coprófagos del MEFLG. Fuente: A. Elaboración propia, B. Perfil ideal, Fernández *et al.* 2005.

A pesar de que tanto el perfil como las prioridades de gestión de la colección reflejan la necesidad de aumentar esfuerzos en la identificación de los especímenes, la taxonomía de los escarabajos coprófagos no está completamente resuelta. Se carece de revisiones recientes para géneros con alta diversidad en Colombia como *Canthon*, *Canthidium*, *Deltochilum* subgénero *deltohyboma*, *Onthophagus* y *Uroxyis*, lo que se constituye en un impedimento taxonómico para la correcta determinación de las especies y el avance en la curaduría de los niveles 2 y 3. Una alternativa para avanzar en la determinación de los Scarabaeinae al menor nivel taxonómico posible y que puede contribuir al aumento de la calidad de la colección, fue propuesta por el Instituto Alexander von Humboldt, con la creación de una colección de referencia de los escarabajos coprófagos de Colombia (CRECC) en Villa de Leyva, Boyacá, con el fin de centralizar esfuerzos y unificar las determinaciones a nivel de morfoespecies verificadas taxonómicamente, separadas con base en el estudio exhaustivo de la morfología externa e interna de la genitalia del macho e identificadas con un codificador de morfoespecie único (Medina & Gonzáles, 2015).

REPRESENTATIVIDAD GEOGRÁFICA: La cobertura de los registros corresponde a 13 departamentos, 67 municipios y aproximadamente 76 localidades: la aproximación al número de localidades se debe a que la información geográfica contenida en el rotulo de localidad no ha sido refinada, por lo que posiblemente diferentes nombres hagan referencia a una misma localidad.

Tabla 2: Representatividad geográfica con base en el número de especímenes y municipios por departamento en Colombia, de la colección de escarabajos coprófagos del MEFLG.

Departamento	Especímenes	Porcentaje	Municipios	Porcentaje
Antioquia	1707	70.9	39	58.2
Bolívar	134	5.6	2	3.0
Atlántico	99	4.1	4	6.0
Caldas	97	4.0	4	6.0
Chocó	33	1.4	2	3.0
Cundinamarca	17	0.7	4	6.0
Meta	13	0.5	3	4.5
Santander	13	0.5	2	3.0
Córdoba	11	0.5	1	1.5
Magdalena	4	0.2	1	1.5
Valle del Cauca	3	0.1	2	3.0
Norte de Santander	2	0.1	1	1.5
Tolima	2	0.1	1	1.5
Sucre	1	0.04	1	1.5
Sin datos	270	11.22	0	0.0
Total	2406	100	67	100

Antioquia es el departamento con mayor representatividad en número especímenes (1707) y municipios (39). 134 especímenes provienen del departamento de Bolívar, 99 de Atlántico y 97 de Caldas. Los demás departamentos se encuentran representados por menos de 33 especímenes (Tabla 1). Los 39 municipios con registros de escarabajos coprófagos provenientes de Antioquia representan el 31.2% del total de municipios en el departamento, Atlántico, Caldas y Cundinamarca están representados por cuatro municipios, seguidos por el departamento del Meta con tres, los demás departamentos se encuentran representados por menos de dos municipios (Tabla 2).

REPRESENTATIVIDAD TAXONÓMICA: los especímenes de escarabajos coprófagos depositados en el museo se agrupan en 96 especies y 24 géneros que representan el 33.9% de las especies y 68.6% de los géneros registrados en Colombia (Medina *et al.*, 2001). Según la información obtenida en el presente estudio, para el departamento de Antioquia se reconocen 19 géneros y 67 especies, cifras de cobertura taxonómica importantes, teniendo en cuenta que hasta el año 2001, en el listado de escarabajos coprófagos de Colombia solo se registraban 12 géneros y 35 especies para el departamento (Medina *et al.*, 2001).

Los géneros con mayor representatividad en número de especímenes fueron *Canthon*, *Onthophagus* y *Canthidium*, los géneros *Dichotomius* y *Eurysternus* estuvieron representados por el 7% de los

especímenes, el género *Uroxys* con el 6 % y 18 géneros incluida la tribu Phanaeini (*Coprophanaeus*, *Oxysternon*, *Phanaeus*, *Sulcophanaeus*) se encuentran escasamente representados con menos del 5 % de los especímenes (Figura 3).

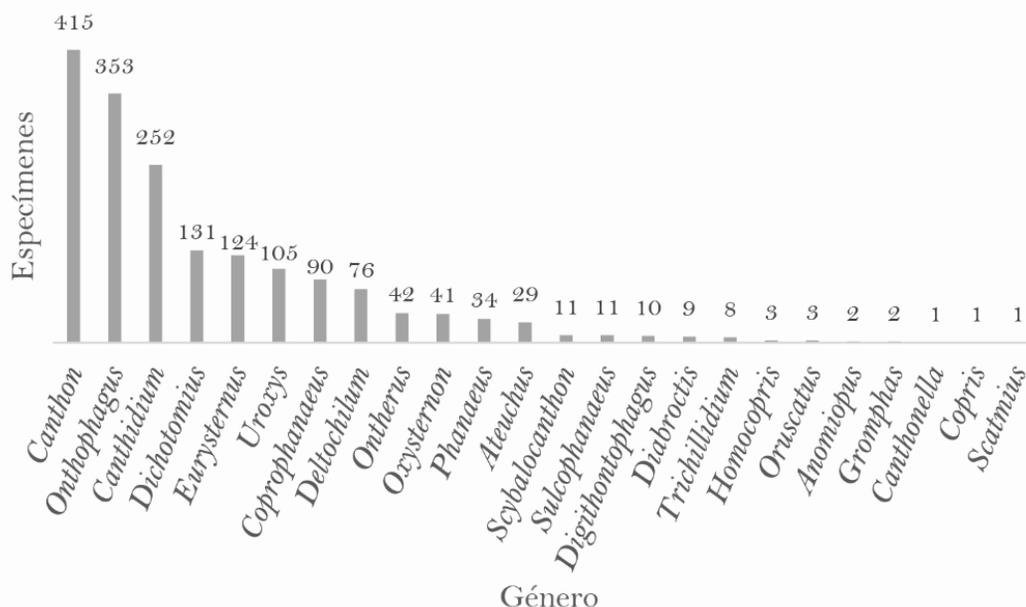


Figura 3: Número de especímenes por género de escarabajos coprófagos depositados en el MFLG. Fuente: Elaboración propia.

VALOR PATRIMONIAL: Hasta el momento la colección no cuenta con especímenes tipo correspondientes a descripciones taxonómicas, sin embargo, se encuentran registros con valor temporal; 69 especímenes fueron recolectados entre los años 1937 y 1950 por el profesor Francisco Luis Gallego en los departamentos de Antioquia, Atlántico, Bolívar, Cundinamarca y Santander.

4. CONCLUSIONES

La colección de escarabajos coprófagos del Museo Francisco Luis Gallego se considera representativa a nivel regional, cubriendo un considerable porcentaje de los municipios del departamento de Antioquia, además, conserva especímenes antiguos correspondientes a recolecciones desde el año 1937 en diferentes departamentos de Colombia. Se cuenta con un espacio físico adecuado para el crecimiento de especímenes que aporten a la representatividad geográfica y taxonómica del grupo, sin embargo, es necesario implementar políticas institucionales de crecimiento y apoyo e inversión al museo. Además, se requiere establecer un protocolo de incorporación de material desde la recepción hasta la inclusión de los especímenes en la colección taxonómica central. Así mismo, es indispensable la adquisición de gabinetes, cajas Cornell y Ward, para que el crecimiento pueda llevarse a cabo.

El perfil de la colección indica que es imperioso el procesamiento de los especímenes que no se han incorporado formalmente en el museo y que están incluidos en cajas de miscelánea, se requiere realizar una organización física que integre todo el material presente en la colección, lo que permitiría disminuir el porcentaje de especímenes en el nivel dos. Es evidente la necesidad un curador encargado de implementar estrategias para profundizar en la determinación taxonómica y actualización en la nomenclatura de los especímenes incluidos en la colección. Además incentivar estudios taxonómicos regionales y la revisión de especialistas en los diferentes géneros, para contribuir con el aumento de nivel de curaduría taxonómica de los especímenes, que actualmente se encuentra en el nivel tres y cinco.

Debido al impedimento taxonómico para la determinación de las especies en algunos géneros que carecen de revisiones actuales, se recomienda continuar el procesamiento taxonómico de los especímenes siguiendo la alternativa presentada por el Instituto Alexander von Humboldt, que consiste en asignar códigos únicos de morfoespecie con base en el estudio de la morfología externa y de la genitalia del macho, con el fin de estandarizar las determinaciones de escarabajos coprófagos de Colombia. Esto permitiría avanzar en la curaduría de la colección que actualmente se encuentran en los niveles 2 y 3.

Las prioridades de la colección se enfocan en conocer el número de géneros y especies presentes en la colección, optimizar la organización física y la accesibilidad de los especímenes. Aumentar el esfuerzo en los procesos curatoriales y taxonómicos: separación, determinación taxonómica, actualización de la nomenclatura e incorporación del nuevo material proveniente de donaciones e investigaciones desarrolladas por docentes de la universidad Nacional.

Se considera importante actualizar el sistema de catálogo y los rótulos de determinación de algunos especímenes antiguos, se debe asignar rótulos de determinación y números de catálogo a cada espécimen incluido en la colección.

Es urgente implementar el proceso de sistematización de la colección mediante el formato estandarizado de registros biológicos establecido por el Sistema de Información en biodiversidad (SiB Colombia), lo cual permitirá tener la colección en un sistema interoperable y público. De la misma manera, se recomienda actualizar el sistema de tarjetas de información asociada de los especímenes a una base de datos (preferiblemente Specify) para facilitar la administración de los registros biológicos, su búsqueda y disponibilidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a María Adelaida Gaviria y John Albeiro Quiroz por el acceso a la colección de escarabajos coprófagos del Museo Francisco Luis Gallego y facilitar el desarrollo de este estudio. A los jurados evaluadores por sus valiosos aportes en el mejoramiento de la calidad del manuscrito.

Referencias

- Arbeláez Cortés, E., M. F. Torres, D. López-álvarez, J.D. Palacio Mejía, Á. Mendoza & C.A. Medina. (2015). Colombian frozen biodiversity: 16 years of the tissue's collection of the Humboldt Institute. *Acta Biológica Colombiana*, 20 (2), 163–173.
- Bradley, R. D., Bradley, L. C., Heath, J. G. & Baker, R. J. (2014). Assessing the value of natural history collections and addressing issues regarding long-term growth and care. *BioScience*, 64 (12), 1150–1158.
- Corredores, L. M. (2009). Diagnóstico de la colección de referencia de anfibios de la pontificia universidad Javeriana. Tesis de grado. Departamento de biología, facultad de Ciencias. Pontificia universidad Javeriana. Bogotá D. C. 125.
- Danks, H.V. (1991). Museum collections: fundamental values and modern problems. *Collection Forum*, 7 (2), 95-111.
- Darrigan, G. (2012). Las colecciones biológicas: ¿Para qué?. *Boletín Biológica*, 23, 28–31.
- Delisle, F., Lavoie, C., Jean, M. & Lachance, D. (2003). Reconstructing the spread of invasive plants: taking into account biases associated with herbarium specimens. *Journal of Biogeography*, 30, 1033–1042.
- Fernández, F. Muñoz Saba, Y., Simmons, J. & Samper, C. (2005). La gestión en la administración de las colecciones biológicas. En: Cuidado, manejo y conservación de las colecciones biológicas. Simmons, J. & Muñoz, Y Eds. Conservación Internacional, Serie Manuales para la conservación, Bogotá D., Colombia. 288.
- Hollis, K. A., Simith, D. M & Spence, C. R. (2010). Conducting collection assessments with an emphasis on paleontological collections. *Collection Forum*, 24 (1-2), 72–79.
- McGinley, R. (1993). Where's the management in collection's management? Planning for improved care, greater use, and growth of collections. Int. Syrn. & First World Congress on Pres. and Cons. of Nut. Hkt. Col., 3, 309–338.
- Medina, C.A., Lopera-Toro, A., Vítolo, A & B. Gill. (2001). Escarabajos Coprófagos (Coleoptera: Scarabaeidae: Scarabaeinae) de Colombia. *Biota Colombiana*, 2 (2), 131–144.

- Medina, C. A. & A. González. (2015). Escarabajos coprófagos de la subfamilia Scarabaeinae. En: Pizano, C. y H. García (Eds.). El bosque seco tropical en Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH), Bogotá, Colombia.
- Medina, C.A., E. Arbeláez-Cortés, K. Borja, F. A. González, C. DoNascimento, A. R. Acosta, H. Mendoza & D. Espitia-Reina. (2016). Las colecciones biológicas del Instituto Humboldt. Ficha 102. En Gómez, M. F., Moreno, L. A., Andrade, G. I. y Rueda C. (Eds.). Biodiversidad 2015. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia. Instituto Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., Colombia.
- Robbirt, K., Davy, A., Hutchings, M. & Roberts, D. (2011). Validation of biological collections as a source of phenological data for use in climate change studies: a case study with the orchid *Ophrys sphegodes*. *Journal of Ecology*, 99, 235–241.
- Suárez, A. V. & Tsutsui, N. D. (2004). The Value of Museum Collections for Research and Society. *BioScience*, 54, 66-74.
- Waller, R. & Simmons, J. E. (2003). An exploratory assessment of the state of a fluid-preserved herpetological collection. *Collection Forum*, 18, 1–37.
- Wiggins, G. B., Marshall, S. A. & Downes, J. A. (1991). Importance of research collections of terrestrial arthropods. A brief prepared by the Biological Survey of Canada (Terrestrial Arthropods). *Bulletin of the Entomological Society of Canada*, 23 (2), 16.
- Williams, S. L., Monk, R. R. & J. Arroyo-Cabrales. (1996). Applying McGinley's model for collection assessment to collections. *Collection Forum*, 12, 21–35.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA APLICADO A LA PRODUCCIÓN PANELERA TRADICIONAL EN COLOMBIA^a

LIFE CYCLE ASSESSMENT FOR THE TRADITIONAL PRODUCTION OF PANELA IN COLOMBIA

JUAN CASTAÑEDA^b, ANTONIO GONZÁLEZ^c, CRISTIAN USMA^d, NATALIA ANDREA
CANO LONDOÑO^e

Recibido 14-03-2017, aceptado 12-05-2017, versión final 23-05-2017.

Artículo Investigación

RESUMEN: Teniendo en cuenta la gran producción y demanda panelera en Colombia, es necesario cuantificar las cargas ambientales del proceso productivo con el fin de identificar los componentes del ciclo que requieren una optimización, y así lograr una producción panelera más eficiente y sostenible. Dado que existen pocos estudios de análisis de ciclo de vida sobre la panela en el mundo, y ninguno con suficiente difusión en Colombia, se conoce poco acerca de las cargas ambientales de la producción de este alimento a nivel técnico. En este artículo se presenta el análisis de ciclo de vida como una herramienta necesaria y competente para lograr dicho fin, con el objetivo general de cuantificar las cargas ambientales asociadas a la producción de panela hasta el momento en que está lista para ser empacada, y adicionalmente, determinar la conveniencia de ciertas mejoras tecnológicas en la fase de manufactura.

PALABRAS CLAVE: análisis de ciclo de vida; panela.

ABSTRACT: Taking into account the large production and demand of panela in Colombia, it is necessary to quantify the environmental burdens of its production process, in order to identify the cycle components that require optimization, with the final purpose of achieve a more efficient and sustainable panela production. Because of the lack of available literature about life cycle assessment applied to panela in the world, and the absolute absence of large-diffusion studies in that field in Colombia, the knowledge about environmental burdens of the production of that meal is limited, at least in technic levels. This paper presents life cycle assessment as a necessary and capable tool to achieve that purpose, with the overall goal of quantify the environmental burdens associated with the production of panela until the moment of packaging, and also, determine the suitability of certain technological improvements in the manufacture phase.

^aCastañeda, J., González, A., Usma, C. & Cano, N. (2017). Análisis de ciclo de vida aplicado a la producción panelera tradicional en Colombia. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 6 (1), 107–122. DOI: 10.15446/rev.fac.cienc.v6n1.63316

^bFacultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. jecastanedas@unal.edu.co

^cFacultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. amgonzalezd@unal.edu.co

^dFacultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. causmar@unal.edu.co

^eFacultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. nacanol@unal.edu.co.

KEYWORDS: life cycle assessment; panela.

1. INTRODUCCIÓN

La panela es un producto de uso generalizado y habitual para los colombianos, cuya utilización es única, es decir, el producto solamente se puede usar una vez después de elaborado. Esta situación crea una alta demanda representada en el consumo per cápita de panela anual en el país (34.2 *kg/hab*), el cual es el más alto del mundo, (Gualanday, 2013). Las condiciones ambientales para la producción de la panela en Colombia son óptimas, de manera que su materia prima se puede producir en diversas regiones. Un indicador que refleja lo anterior, es el hecho de que el país sea el segundo productor de panela a nivel mundial, sólo por detrás de la India, (Corpoica, Sf; Observatorio Agrocadenas Colombia, 2005). Como cualquier otro proceso, la industria panelera trae consigo varias cargas ambientales asociadas a cada fase de su ciclo de vida, que son además potenciadas por la alta demanda del producto. Estas fases pueden ser analizadas con el fin de evaluar el grado de afectación al medio ambiente.

El proceso cuenta con varias fases bien definidas, en las cuales hay entradas y salidas de materia y energía que pueden ser cuantificadas para hallar datos que arrojen información objetiva y útil acerca de las cargas ambientales y demandas de recursos del mismo. Aprovechando las características mencionadas anteriormente, se aplica la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) al proceso de producción panelera con el fin de obtener una aproximación a estas cargas.

La aplicación del análisis de ciclo de vida a la producción panelera hasta el momento ha sido nula. Este fenómeno quizá se deba a la concentración de la producción en unos pocos países y en condiciones poco tecnificadas en general (Soto, 2012; González, 2013). Por esta razón, se considera pertinente realizar este estudio, dado que es pionero en el país y permite hacer un acercamiento preliminar a la identificación y cuantificación de impactos ambientales asociados a este proceso, y encontrar soluciones que permitan optimizar el mismo. Dada la falta de literatura sobre análisis de ciclo de vida aplicado a la producción de panela, este documento se plantea como una primera aproximación general hacia la cuantificación de las cargas ambientales del proceso, que permita y promueva futuros esfuerzos con resultados cada vez más amplios y útiles al respecto.

De acuerdo con lo anterior, en este estudio se busca identificar y cuantificar los impactos asociados a la producción de panela en cada una de sus fases utilizando el ACV, explorando también opciones de mejora que permitan optimizar etapas altamente impactantes del proceso, de acuerdo con los principios del análisis de ciclo de vida consecucional. Para lograr tal propósito, se incluyen en el estudio las categorías de análisis de: ocupación de tierras agrícolas, agotamiento de metales, agotamiento de combustibles fósiles, ecotoxicidad terrestre, cambio climático, toxicidad humana y

formación de material particulado.

La metodología utilizada es ReCiPe, presente en el software alemán Umberto NXT, con la base de datos Ecoinvent 3 (v3.1), además se utiliza como unidad funcional una tonelada (1 *T*) de panela, ya que esta es una magnitud estándar de producción utilizada en los trapiches colombianos. Se sigue además la estructura metodológica propuesta en la norma de estandarización ISO 14041.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO DE LA PANELA

El proceso de elaboración tradicional de la panela se muestra de manera esquemática en la figura 1, y sus fases principales se describen a continuación, con base en una guía técnica elaborada por Fedepanela y el Ministerio de Agricultura de Colombia, (Fedepanela, 2011).

2.1. Siembra y cultivo de la caña de azúcar

La siembra y cultivo de la caña se realiza por un periodo de 3 a 4 meses, e incluye el acondicionamiento y tratamiento químico y físico del suelo, para garantizar el adecuado crecimiento y desarrollo de la planta, (Fedepanela, 2011).

2.2. Corte de la caña

Una vez se determina que la planta de caña panelera alcanzó su madurez y una concentración de azúcares óptima, se corta y se organiza, de manera que se remueven las hojas y el cogollo de caña dejando el tallo completamente limpio. Tras esto, los tallos son alzados y dispuestos en el medio de transporte que se utilizará para llevarlos al lugar de procesamiento, (Fedepanela, 2011).

2.3. Transporte de la caña

La caña es llevada hacia el trapiche o ramada, ya sea a lomo de mula o caballo. Se asume que el cultivo está situado a escasos metros del trapiche, por lo cual el transporte no es ambientalmente significativo, (Fedepanela, 2011; Carrillo *et al.*, 2015). El estiércol producto de los animales que utilizan para transportar la caña suele emplearse en el manejo de lombricultivos, para la producción de humus y para la realización de procesos de compostaje. El bagazo y la ceniza producto de etapas posteriores pueden ser utilizados en procesos similares, (Osorio, 2007).

2.4. Recepción, acopio y pesaje

Los tallos de caña son dispuestos en un lugar especial a la entrada del trapiche, donde son organizados y pesados, (Fedepanela, 2011).

2.5. Extracción del jugo

Una vez se ha pesado la cantidad de caña a usar, esta se pasa por un molino en el cual se extrae el jugo, que se dispone en un recipiente receptor, (FedePanela, 2011).

Tabla 1: Inventario en la fase de extracción de jugo.

Materiales	Cantidad
Entra: Gasolina	11.70 <i>kg</i>
Entra: Caña de azúcar	8.064 Toneladas
Sale: Bagazo	3.63 Toneladas

2.6. Filtración y pre-limpieza del jugo

El jugo obtenido se hace pasar por un filtro que retiene las impurezas grandes que se encuentran suspendidas. El filtro debe ser lavado varias veces en el día para garantizar la salubridad de la panela y el buen funcionamiento del sistema. Tras ser filtrado, el jugo pasa a un sistema de recipientes, tuberías y decantadores cuyo diseño varía de acuerdo al nivel de tecnificación del trapiche, y en el cual se busca retirar la mayor cantidad de impurezas posible mediante sedimentación de partículas pesadas o acumulación del ‘bagacillo’ por flotación. Este sistema es el que realiza la pre-limpieza del jugo, (FedePanela, 2011).

Tabla 2: Inventario en la fase de filtración y pre-limpieza.

Materiales	Cantidad
Sale: Bagazo	3.63 <i>kg</i>

2.7. Descachazado

El jugo filtrado y pre limpiado pasa a una primera hornilla, en la cual se le aplica una solución aglutinante que permite retirar las impurezas disueltas en el jugo, es decir, la cachaza. Esta cachaza se dispone en otro recipiente y se seca, para así producir un subproducto llamado melote. En esta fase se revisa el pH del jugo, para establecer si su acidez es la correcta o si se requiere aplicar algún regulador de pH, (FedePanela, 2011).

Tabla 3: Inventario en la fase de descachazado.

Materiales	Cantidad
Entra: Aglutinante	10.5 <i>g</i>
Entra: Cachaza	0.322 Toneladas
Sale: Jugo limpio	4.27 Toneladas

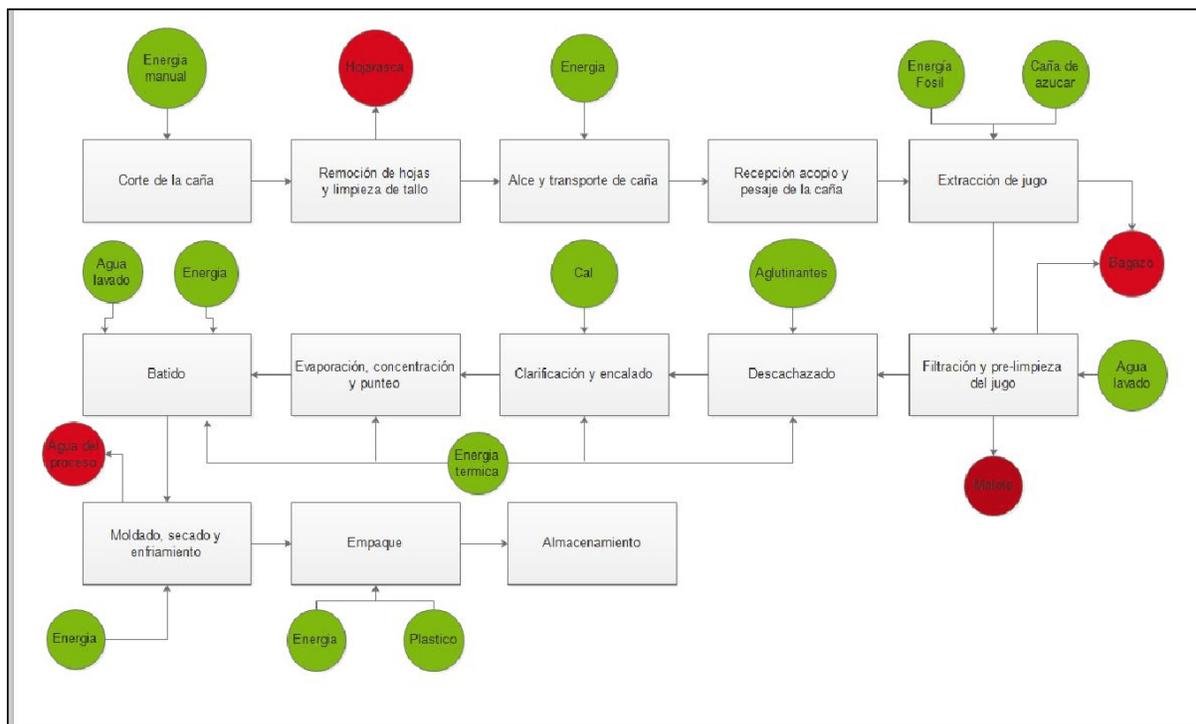


Figura 1: Descripción del proceso. Fuente: Elaboración propia

2.8. Clarificación y encalado

La miel descachazada se pasa a otra hornilla, en la cual se le aplica cal y se mezcla, (Fedepanela, 2011).

Tabla 4: Inventario en la fase de clarificación encalado.

Materiales	Cantidad
Entra: Cal	89 g
Entra: Energía Térmica	12546211.6 kJ

2.9. Modelado, secado y enfriamiento

La miel se hace pasar por varias hornillas sucesivas, en las cuales el calor recibido produce la evaporación de gran parte del agua contenida en el jugo, hasta llegar al ‘punto’ en el cual la miel es lo suficientemente viscosa y se encuentra en un estado adecuado para ser moldeado, (Fedepanela, 2011).

Tabla 5: Inventario en la fase de evaporación, concentración y punteo.

Materiales	Cantidad
Entra: Jugo clarificado	3.95 Toneladas
Entra: Leña	3.63 Toneladas
Sale: Agua	2.944 Toneladas

2.10. Batido

La miel punteada se lleva a otro recipiente, en el cual se bate hasta lograr una consistencia deseada, (FedePanela, 2011).

2.11. Evaporación, concentración y punteo

La mezcla batida es llevada a los moldes, en los cuales se seca y se deja enfriar hasta lograr una temperatura razonable, (FedePanela, 2011).

Otros insumos y datos necesarios para el correcto cálculo de las cargas ambientales en el proceso de producción panelero, se recurrió a la siguiente información: Calor específico del jugo de caña (Arias *et al.*, 2016), verificación de la pureza del jugo y cantidad de sólidos suspendidos (Armas & Ramón, 2012), cantidad de gasolina/diesel consumida por hora en el funcionamiento del motor (Royal Condor, 2015).

3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Como se dijo anteriormente, la bibliografía existente acerca del análisis de ciclo de vida aplicado a la panela no es lo suficientemente completa para realizar comparaciones, no siendo posible formar una base bibliográfica sólida a partir de la cual ejecutar estudios en este tema.

Por otro lado, el producto más similar a la panela, del cual se tiene un estudio ambiental disponible es el azúcar. Aunque este estudio no va más allá de la descripción netamente cualitativa en las dimensiones de análisis de la gestión ambiental, promueve un acercamiento a la comprensión de las cargas ambientales producto del procesado de la caña de azúcar. Sin embargo, para los objetivos de este estudio, el entendimiento de la producción del azúcar no aporta nada al entendimiento de la producción de panela, pues estos procesos se desarrollan igual hasta la concentración del jugo de la caña; diferenciándose fuertemente en las fases siguientes, limitando de esta manera el campo y certeza de aplicación de las medidas de mejora que se deseen desarrollar, (Trujillo, 2011).

3.1. Materiales y métodos

Como se dijo anteriormente, se siguen los lineamientos de la metodología estandarizada por la norma ISO 14041. Inicialmente se seleccionaron la totalidad de las categorías de impacto disponibles, con

el fin de hacer un análisis lo más completo posible. Tras correr el software, se seleccionaron para el análisis únicamente las categorías cuya carga ambiental fuera superior a 1 punto. Las categorías de impacto contempladas son las siguientes:

- Ocupación de tierras agrícolas.
- Agotamiento de metales.
- Agotamiento de combustibles fósiles.
- Ecotoxicidad terrestre.
- Cambio climático.
- Toxicidad humana.
- Formación de material particulado.

3.2. Alcance y objetivo

El objetivo de este estudio es la cuantificación de la carga ambiental asociada al proceso de producción de panela de manera tradicional mediante la aplicación del análisis de ciclo de vida (ACV), comenzando desde la producción de la caña hasta la solidificación de la panela, excluyendo fases posteriores como el empaquetado y el transporte hasta el distribuidor y el consumidor final, esto debido a la gran variabilidad de métodos que existen para la ejecución de estas etapas, que representan en general una diferencia en la magnitud de los impactos y dificultades para su cuantificación, alejándose también del objetivo principal del estudio. A pesar de que las cargas ambientales se evalúan a lo largo de todo el proceso desde la producción de la caña, sólo se proponen mejoras para la fase de manufactura.

3.3. Unidad funcional

La unidad funcional conveniente para los objetivos del estudio es una tonelada de panela. La decisión de seleccionar esta unidad se tomó dada la facilidad y practicidad para el levantamiento de la información apropiada, además de que esta se aproxima a las unidades de producción estándar del trapiche.

3.4. Inventario de ciclo de vida

En las Tablas 1 a 5 se presentan las cantidades de materiales y emisiones asociadas a la producción de la unidad funcional del estudio (una tonelada de panela) para cada etapa del proceso. Es de anotar que no se incluyen los materiales y emisiones asociados a la producción de algunos componentes como la caña y el diesel que alimenta el trapiche, debido a que su inclusión en el ciclo de vida en

Umberto NXT LCA se hizo por medio de la herramienta ‘expandir’, a través de la cual se incluyeron una gran cantidad de entradas y salidas que no sería conveniente listar en el presente estudio para efectos de practicidad y claridad.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados del proceso

Los resultados, normalizados y ponderados, de la evaluación del proceso de producción de panela a través del ACV se resumen en la tabla 6 y se muestra gráficamente en la figura 2. Según los datos obtenidos, las cargas ambientales del proceso de producción panelera se concentran de manera preponderante en la fase de extracción de materias primas, y presentan un mínimo aporte de la fase de manufactura.

Tabla 6: Resultados del ACV para el proceso sin modificar en Endpoints.

Categoría de agrupación	Categorías de impacto	Resultados totales	Materias primas	Manufactura
Calidad ecosistémica	Ocupación de tierra agrícola	51.79	51.27	0.51
	Cambio climático	7.02	6	1.02
	Ecotoxicidad terrestres	1.32	1.32	0
60.76				
Salud humana	Cambio climático	11.1	9.49	1.61
	Toxicidad humana	1.8	1.78	0.02
	Formación de material particulado	9.12	6.72	2.4
22.3				
Recursos	Agotamiento de combustibles fósiles	11.95	8.84	3.12
	Agotamiento de metales	1.56	1.54	0.02
Total	Proceso de producción de panela	96.57		

Lo anterior se verifica observando la carga ambiental obtenida para la categoría de impacto Ocupación de tierras (51.79 puntos) en contraste con los resultados de las demás. En cuanto a la fase de manufactura, se puede apreciar que las dos categorías más impactadas son Agotamiento de combustibles fósiles (3.12 puntos) y Formación de material particulado (2.4 puntos). Lo primero se puede explicar por el uso de combustibles fósiles para el funcionamiento del motor del trapiche que realiza la extracción del jugo de la caña, (Carrillo *et al.*, 2015) y lo segundo debido a la utilización de leña y/o bagazo para el funcionamiento de las hornillas que evaporan el agua del jugo que pasará a ser panela.

Como se mencionó anteriormente, Umberto NXT LCA asigna al proceso más categorías de impacto de las que fueron analizadas, sin embargo, estas no fueron tomadas en cuenta puesto que sus cargas no fueron significativas comparadas con la carga ambiental total del proceso y con las cargas específicas de las categorías seleccionadas.

El criterio de selección fue la comparación en términos de Endpoints (unidades de impacto ponderadas y normalizadas) de las diferentes categorías. Es de anotar que la carga ambiental total del proceso corresponde a 96.57 puntos, incluyendo las categorías de impacto que fueron omitidas debido a su poco peso en comparación con el impacto ambiental total del proceso.

4.2. Optimización del proceso: Etapa de evaporación y concentración

Como se mencionó en la sección 2.9, la evaporación y concentración del jugo se realiza en hornillas que reciben calor proveniente del proceso de combustión del bagazo de la caña y se complementa con la utilización de otros productos de fácil combustión.

En este proceso se libera calor y cenizas al ambiente que se traducen en un aumento de la carga ambiental del proceso, especialmente en la categoría de impacto de Formación de material particulado.

Teniendo en cuenta lo anterior, se propuso utilizar hornillas cuya fuente de calor sea la combustión del gas propano. La selección de dicho gas se fundamenta en su poder calorífico (mayor que el del gas natural) lo cual lo hace apto para el uso industrial, a pesar de su mayor costo. El gas propano debería reducir la emisión de material particulado al ambiente. Para determinar la certeza de esta hipótesis y saber qué tan conveniente era realizar el cambio, se evaluó en Umberto NXT LCA nuevamente el proceso y se hizo el respectivo análisis de los resultados, tanto para esta misma categoría como para el resultado global del proceso.

4.3. Optimización del proceso: Resultados gas propano

Como se puede apreciar en la Tabla 7, aunque la carga ambiental para la categoría Formación de material particulado se redujo sustancialmente con la utilización de gas propano como fuente de calor para las hornillas, la carga total del proceso creció en 0.34 puntos con respecto a la carga asociada al proceso sin modificaciones (Tabla 6). Además, las categorías de impacto que fueron omitidas anteriormente sufrieron un aumento en su carga ambiental, sin embargo, son también despreciables. Esta situación tiene sentido porque aunque el cambio a gas propano signifique una mejora en la calidad ambiental medida en una categoría (Formación de material particulado), esto no significa que el proceso sea más óptimo visto de manera global. De hecho, comparando las Tablas 6 y 7 se puede observar que la carga ambiental aumentó sobre varias categorías, como Cambio climático.

Tabla 7: Resultados del ACV para el proceso modificado con gas propano.

Categorías de agrupación	Categorías de impacto	Resultados totales	Materias primas	Manufactura
Calidad ecosistémica	Ocupación de tierra agrícola	51.79	51.78	0.0051
	Cambio climático	8.02	5.995	2.0243
	Ecotoxicidad terrestres	1.32	1.31	0.0039
61.76				
Salud humana	Cambio climático	12.69	9.49	3.1966
	Toxicidad humana	1.80	1.78	0.0017
	Formación de material particulado	6.88	6.72	0.1565
21.65				
Recursos	Agotamiento de combustibles fósiles	11.65	8.84	3.1011
	Agotamiento de metales	1.56	1.542	0.0174
13.51				
Total	Proceso de producción de panela	96.91		

4.4. Agotamiento de combustibles fósiles

En conclusión, en términos generales la mejor opción es usar bagazo pese a que es el insumo cuya utilización es la que conlleva cierta contaminación, pues la disminución del impacto en la Formación de material particulado mediante el uso de gas propano se neutraliza con el aumento en otras categorías de impacto.

Por otro lado, si se analizan los resultados en unidades equivalentes, todas las cantidades emitidas permanecieron iguales, a excepción de las categorías de Cambio climático y Formación de material particulado, esto se puede constatar en las Tablas 9 y 10.

4.5. Optimización del proceso: Etapa de extracción del jugo de caña

En la fase de molienda actualmente se utilizan motores diesel para el funcionamiento del trapiche que extrae el jugo de la caña. Las cargas asociadas a la combustión de este derivado del petróleo se manifiestan especialmente en categorías de impacto como la Formación de material particulado, Cambio climático y Agotamiento de combustibles fósiles. Para optimizar esta fase se propuso el reemplazo del motor diesel por un motor eléctrico.

4.6. Optimización del proceso: Resultados motor eléctricos

En la Tabla 8 se resume la carga ambiental del proceso de producción de panela con la modificación propuesta en la fase de la extracción del jugo de caña.

La carga ambiental total del proceso se redujo en 3.82 puntos. Esto indica que el uso un motor

eléctrico para la extracción del jugo de caña en general mejora la eficiencia del proceso en términos ambientales, lo cual se manifiesta en la reducción de la carga ambiental para las categorías que se mencionaron anteriormente.

Nuevamente se hizo el proceso de descartar las categorías que no tuvieran un aporte significativo a la carga ambiental del proceso, resultando ser las mismas categorías descartadas al comienzo y con la modificación del gas propano.

Se concluye entonces que el uso de un motor eléctrico para el funcionamiento del trapiche hace más eficiente en términos ambientales al proceso de producción panelera.

4.7. Resultados combinación motor eléctrico - gas propano

Como es posible observar en la Tabla 13, las mayores mejoras se obtuvieron cuando se combinaron las dos alternativas, el gas propano, y el motor eléctrico, pasando de un impacto total de 96.57 a 90.48 puntos, es decir, una reducción de 6.09 puntos en el impacto ambiental total con respecto a la producción tradicional.

4.8. Unidades equivalentes

En las Tablas 9 a 12 se presentan los resultados en términos de unidades equivalentes para cada categoría de impacto estudiada en el proceso. Esto con el fin de visualizar el aporte de cada una en sus unidades de medida propia. Es importante resaltar que en ningún momento se descartaron las otras categorías que Recipe arroja por criterio de comparación, pues hacerlo sería cometer un error ya que así se estaría menospreciando la posibilidad de que un valor pequeño en Midpoints pueda terminar en una gran carga ambiental en Endpoints.

Tabla 8: Resultados del ACV para el proceso sin modificar en Endpoints.

Categoría de agrupación	Categorías de impacto	Resultados totales	Materias primas	Manufactura
Calidad ecosistémica	Ocupación de tierra agrícola	51.78	51.78	0
	Cambio climático	6.83	6.0047	0.8253
	Ecotoxicidad terrestres	1.32	1.32	0
60.45				
Salud humana	Cambio climático	10.80	9.4963	1.3037
	Toxicidad humana	1.79	1.7883	0.0017
	Formación de material particulado	8.79	6.5363	2.2537
21.82				
Recursos	Agotamiento de combustibles fósiles	8.92	8.8429	0.0771
	Agotamiento de metales	1.54	1.5368	0.0032
10.46				
Total	Proceso de producción de panela	92.75		

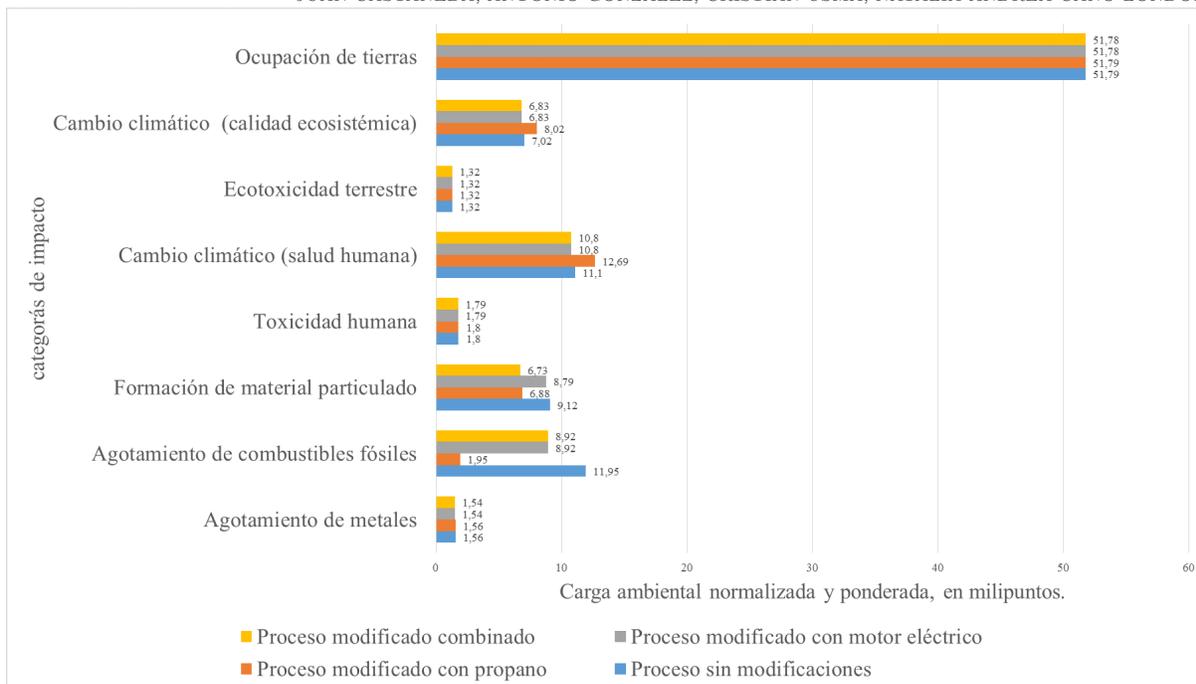


Figura 2: Carga ambiental para la fase de manufactura, para los 4 escenarios posibles.

Tabla 9: Resultados en unidades equivalentes (Midpoints) para el proceso sin modificar.

Categoría de impacto	Carga ambiental (Midpoints)
Ocupación de tierras agrícolas	1,138.20 m2a
Cambio climático	314.08 kg CO ₂ -Eq
Ecotoxicidad terrestre	4.31 kg 1,4-DCB-Eq
Toxicidad humana	1,329.91 kg 1,4-DCB-Eq
Formación de material particulado	1.77 kg PM10-Eq
Agotamiento de combustibles fósiles	93.76 kg oil-Eq
Agotamiento de metales	33.54 kg Fe-Eq

Tabla 10: Resultados en unidades equivalentes (Midpoints) para el proceso modificado con propano.

Categoría de impacto	Carga ambiental (Midpoints)
Ocupación de tierras agrícolas	1,138.20 m2a
Cambio climático	371.51 kg CO ₂ -Eq
Ecotoxicidad terrestre	4.31 kg 1,4-DCB-Eq
Toxicidad humana	1,329.91 kg 1,4-DCB-Eq
Formación de material particulado	1.34 kg PM10-Eq
Agotamiento de combustibles fósiles	93.76 kg oil-Eq
Agotamiento de metales	33.54 kg Fe-Eq

Tabla 11: Resultados en unidades equivalentes (Midpoints) para el proceso modificado con motor eléctrico.

Categoría de impacto	Carga ambiental (Midpoints)
Ocupación de tierras agrícolas	1,138.20 m2a
Cambio climático	303.98 kg CO ₂ -Eq
Ecotoxicidad terrestre	4.30 kg 1,4-DCB-Eq
Toxicidad humana	1,241.21 kg 1,4-DCB-Eq
Formación de material particulado	1.74 kg PM10-Eq
Agotamiento de combustibles fósiles	69.77 kg oil-Eq
Agotamiento de metales	33.23 kg Fe-Eq

Tabla 12: Resultados en unidades equivalentes (Midpoints) para el proceso modificado con propano y motor eléctrico.

Categoría de impacto	Carga ambiental (Midpoints)
Ocupación de tierras agrícolas	1,138.20 m2a
Cambio climático	303.98 kg CO ₂ -Eq
Ecotoxicidad terrestre	4.30 kg 1,4-DCB-Eq
Toxicidad humana	1,241.21 kg 1,4-DCB-Eq
Formación de material particulado	1.31 kg PM10-Eq
Agotamiento de combustibles fósiles	69.77 kg oil-Eq
Agotamiento de metales	33.23 kg Fe-Eq

Tabla 13: Resultados del ACV para el uso de motores eléctricos.

Categoría de agrupación	Categorías de impacto	Resultados totales	Materias primas	Manufactura
Calidad ecosistémica 60.45	Ocupación de tierra agrícola	51.78	51.78	0
	Cambio climático	6.83	6.0035	0.8265
	Ecotoxicidad terrestre	1.32	1.32	0
Salud humana 19.57	Cambio climático	10.80	9.4963	1.3037
	Toxicidad humana	1.79	1.7883	0.0017
	Formación de material particulado	6.73	6.7166	0.0134
Recursos 10.46	Agotamiento de combustibles fósiles	8.92	8.8429	0.0771
	Agotamiento de metales	1.54	1.5368	0.0032
Total	Proceso de producción de panela	90.48		

5. CONCLUSIONES

En primer lugar, se hace evidente que la fase de materias primas (producción de la caña) concentra la mayoría de las cargas ambientales del proceso. Sin embargo, las mejoras propuestas de modificaciones inicialmente se canalizaron hacia la etapa de manufactura.

A partir de los resultados obtenidos del análisis de ciclo de vida del proceso con mejoras, se demostró que el proceso de producción de la panela no es completamente eficiente. Las cargas ambientales de la fase de manufactura se concentraron en la extracción de la caña y en la evaporación y concentración. Por esta razón, se decidió proponer medidas de optimización en estos procesos.

Se pudo observar que un hipotético reemplazo del uso de bagazo por el uso de gas propano para realizar esta evaporación no sería conveniente ambientalmente, pues la carga ambiental total terminaría aumentando. Por ejemplo, la categoría de impacto de Cambio climático en la categoría de análisis de calidad ecosistémica se pasaría de 7.02 puntos a 8.02; y en la categoría de impacto de Cambio climático en la categoría de análisis de salud humana se pasaría de 11.1 puntos a 12.69. Además, la utilización de gas propano implicaría la compra de este insumo, lo que generaría un aumento en los gastos económicos y un problema respecto a la disposición final del bagazo generado.

Se concluye entonces que es preferible seguir utilizando el bagazo de caña en vez de cambiar a gas propano. Por otro lado, se propuso el cambio del motor diesel por un motor eléctrico para el funcionamiento del trapiche que extrae el jugo de la caña. Con esta optimización se obtuvo una reducción en las cargas ambientales de todas las categorías de impacto relevantes y de la carga ambiental global. La mayor mejora en este aspecto se vio en la categoría de impacto de Agotamiento de combustibles fósiles, en la cual se pasó de 11.95 puntos a 8.92, sin ningún aumento en las cargas sobre las otras categorías analizadas. Se concluye entonces que esta optimización es ambientalmente conveniente.

Existen muchas otras modificaciones que se pueden hacer al proceso de producción panelera y pueden traer beneficios, por ejemplo, en algunas zonas de Colombia se utilizan sistemas de evaporación múltiple para un mayor ahorro de vapor y combustibles fósiles.

La fase de producción de la caña, la cual concentra la mayoría de las cargas ambientales, merece también recibir atención en materia de cuantificación de la reducción en los impactos tras involucrar mejoras en las prácticas agrícolas. En aplicaciones futuras del análisis de ciclo de vida a la producción de panela, sería conveniente tener en cuenta estas modificaciones para determinar cuantitativamente su efecto e impacto ambiental en el marco de la cadena productiva.

Referencias

- Arias, S., Ceballos, A., Gutiérrez, L. (2016). Experimental determination of thermal and physical properties for cane juice, cane syrup and panela. *23*, S145-S148.
- Armas, F., Ramón, A. (2012). Rendimiento agroindustrial en la producción de panela granulada de variedades certificadas de caña de azúcar, de origen cubano y nacionales sembradas desde los 400 hasta los 1000 msnm en la provincia de Morona, Santiago, Ecuador. [En línea]. MAGAP, Ecuador. [Consultada en octubre de 2016]. Disponible en: <http://es.slideshare.net/INGPAKOWPN/rendimiento-agro-industrial-en-la-produccion-de-panela-granulada-de-variedades-certificadas-de-caa-de-azcar>.
- Carrillo, D., Ocampo, J., Serna, V. (2015). Balance de materia y energía, proceso industrial: elaboración de la panela. [En línea]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. [Consultada en noviembre de 2016]. Disponible en: <http://docslide.us/documents/descripcion-del-proceso-y-memorias-de-calculo-produccion-de-la-panela-balance.html>.
- CORPOICA. (Sin fecha). Estudio de mercado de la panela en Colombia y el mundo. [En línea]. Panela Monitor. [Consultada en septiembre de 2016]. Disponible en: <http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/estudio-del-mercado-de-la-panela-en-colombia-y-el-mundo.pdf>.
- FedePanela. (2011). Guía Técnica para Producción de Panela. [En línea]. YouTube. [Consultada en septiembre de 2016]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=to6UzIgrQsQ>.
- González, L. (2013). Gestión en la producción panelera, municipio de Villeta Cundinamarca. Bogotá. Pontificia Universidad Javeriana.
- Gualanday, Trapiche panelero en Yolombó. (2013). La Panela. [En línea]. Yolombó. [Consultada en septiembre de 2016]. Disponible en: <http://www.trapichepanelerogualanday.com/panela.html>.
- Observatorio Agrocadenas Colombia. (2005). La cadena agroindustrial de la panela en Colombia, una mirada global de su estructura y dinámica (1991-2005). [En línea]. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. [Consultada en septiembre de 2016]. Disponible en: <http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/la-cadena-agroindustrial-de-la-panela-en-colombia.pdf>
- Osorio, G. (2007). Manual: Buenas Prácticas Agrícolas -BPA- y Buenas Prácticas de Manufactura -BPM-en la Producción de Caña y Panela. [En línea]. FAO. [Consultada en noviembre de 2016]. Disponible en: <http://www.fao.org/co/manualpanela.pdf>.
- Royal Condor. (2015). Ficha técnica motores a gasolina y diesel. [En línea]. [Consultada en noviembre de 2016]. Disponible en: <http://www.royalcondor.com/motores>.

Soto, M. (2012). Análisis del impacto ambiental y del desarrollo humano y social, producto del procesamiento de la caña panelera en las veredas Salen, Idolos y Betania en el municipio de Isnos departamento del Huila. Universidad de Manizales.

Trujillo, M. (2011). Impacto ambiental de la actividad azucarera y estrategias de mitigación. Orizaba.

Velásquez, H., Janna, F., Agudelo, A. (2005). Diagnóstico exergético de los procesos productivos de panela en Colombia. [En línea]. Universidad Nacional de Colombia. [Consultada en septiembre de 2016]. Disponible en: <http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/diagnostico-exergetico-de-los-procesos-productivos-de-la-panela-en-colombia.pdf>.