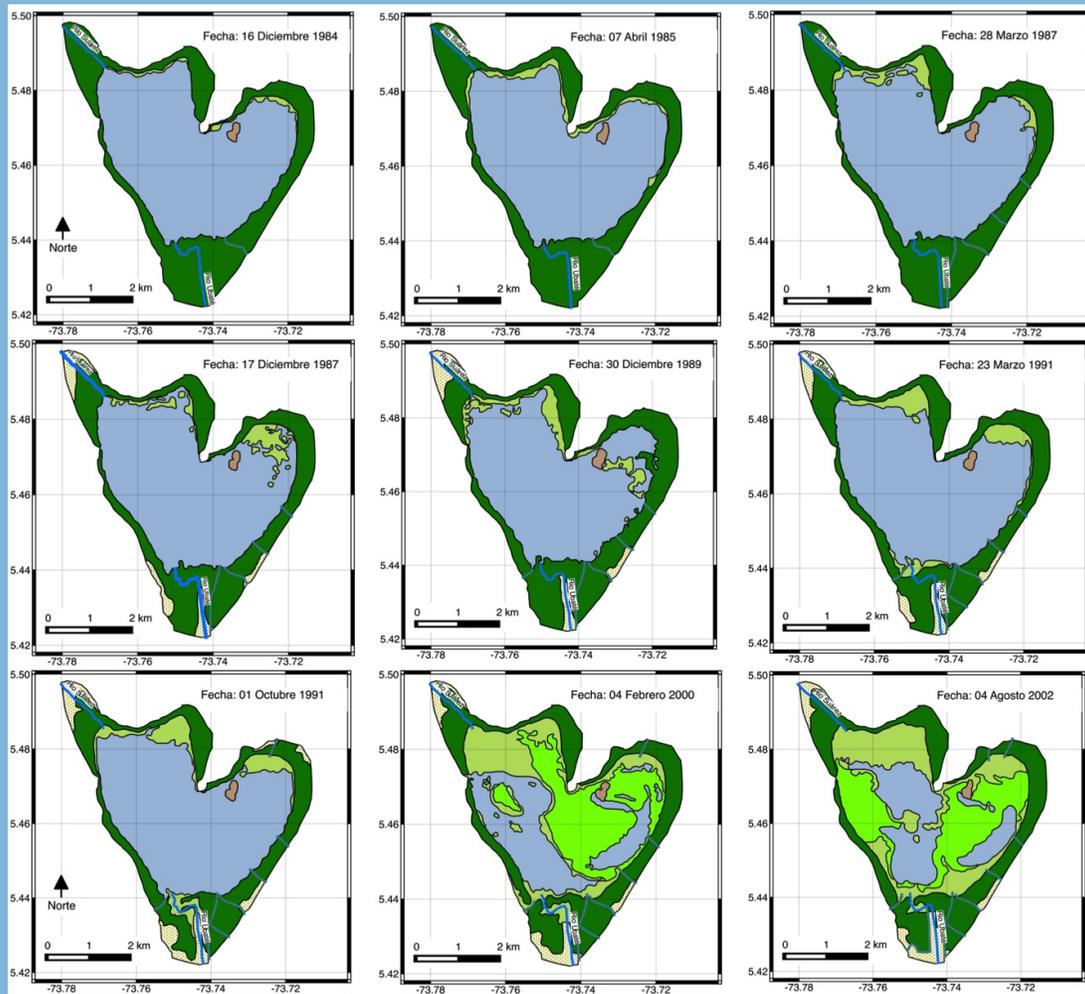


MUTIS

REVISTA ELECTRÓNICA EDITADA POR LA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA



MUTIS, Journal of the Faculty of Sciences and Engineering, Jorge Tadeo Lozano University, is licensed under the Creative Commons 4.0: Attribution - Noncommercial - No Derivative Works



MUTIS

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano
Dirección de Publicaciones
Carrera 4 n° 23-76, Módulo 29, of. 203
Piso 2, Bogotá, D. C., Colombia
Tel: (571) 242 7030, Exts. 3120-3132

ISSN: 2256-1498
DOI: <https://doi.org/10.21789/issn.2256-1498>
revista.mutis@utadeo.edu.co

Rectora
CECILIA MARÍA VÉLEZ WHITE

Vicerrectora Académica
MARGARITA MARÍA PEÑA BORRERO

Vicerrectora Administrativa
NOHEMY ARIAS OTERO

Director de Investigación, Creación y Extensión
LEONARDO PINEDA SERNA

Decano de la Facultad de Ciencias Naturales
e Ingeniería
ISAAC DYNER REZONZEW

Jefe de Publicaciones
DANIEL MAURICIO BLANCO BETANCOURT

Coordinador Editorial
JUAN CARLOS GARCÍA SAENZ

Director de Arte y Diseño
LUIS CARLOS CELIS CALDERÓN

Corrector de estilo
Édgar Ordoñez

Diagramación
MARY LIDIA MOLINA BERNAL



MUTIS, Journal of the Faculty of Sciences and Engineering, Jorge Tadeo Lozano University, is licensed under the Creative Commons 4.0: Attribution - Noncommercial - No Derivative Works

Mutis es una publicación electrónica semestral de ciencia e investigación editada por la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Los artículos publicados son responsabilidad de sus autores y no comprometen la posición editorial de *Mutis*.

Editores

JAVIER HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ
Ciencias Naturales
CÉSAR DÍAZ
Ingeniería

Comité Editorial

ISAAC DYNER REZONZEW
Universidad Jorge Tadeo Lozano
MICHAEL J. AHRENS
Universidad Jorge Tadeo Lozano
LEONARDO MARIÑO RAMÍREZ
NCBI - National Center for Biotechnology Information,
Bethesda MD, EE. UU.
MYRON SPECTOR
Harvard University, EE. UU.

Comité Científico

MÓNICA PUYANA HEGEDUS
Universidad Jorge Tadeo Lozano
ANDRÉS FELIPE SUÁREZ ESCOBAR
Universidad Jorge Tadeo Lozano
JOSÉ HERNEY RAMÍREZ
Universidad Nacional de Colombia
ALBA GRACIELA ÁVILA
Universidad de los Andes
ANDRÉS FELIPE LÓPEZ
Universidad Libre
SILVIO ALEJANDRO LÓPEZ PASOS
Colegio Mayor de Cundinamarca

Actualmente el contenido está indexado e incluido en Publindex, Categoría C, EBSCO, Latindex, DOAJ, CENGAGE learning, Base, Google Scholar, REDIB

CONTENIDO

Vol. 7 n.º 1, enero-junio 2017

Editorial

Tendencias en ingeniería industrial
Luis Rabelo

5

ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN – RESEARCH ARTICLES

Evaluación de la generación de vapor de la fábrica de refrescos 23 de Agosto, en Camagüey

Assessment of the steam generation at 23 de Agosto Soda Factory, in Camagüey

Amaury Pérez-Sánchez, Yenney Fernández Tejeda, Raúl González de la Cruz

7

Dinámica multitemporal de las coberturas y el espejo de agua en la laguna de Fúquene

Multitemporal cover dynamics in the Fúquene lagoon

Ivón Maritza Castillo, Miguel Ángel Rodríguez

20

Gráficos difusos versus gráficos tradicionales para el control de procesos por atributos

Diffuse vs. Traditional Graphics for Control of Processes by Attributes

Vivian Lorena Chud Pantoja, Nathaly Martínez Escobar y Juan Carlos Osorio Gómez

34

Recuperación etnobotánica del uso tradicional no maderable del bosque secundario en el municipio de Nocaima, Cundinamarca

Ethnobotanical recovery of the traditional non-timber use of the secondary forest in Nocaima, Cundinamarca

Luisa María Briceño Fonseca, Aida Gisela Mahecha Garzón, Max Alejandro Triana Gómez

48

Simulación dinámica de una alternativa de generación de energía a partir de residuos

Dynamic simulation of an alternative waste to energy

Giselle Ramírez Flórez, Luisa F. Giraldo Correa, Natalia Tabares Urrea, Juan C. Osorio Gómez

67

Instrucciones para autores

78

EDITORIAL

Vol. 7 (1) pp. 5-6, enero-junio de 2017

Tendencias en ingeniería industrial

A medida que vemos hacia el futuro, el ritmo del desarrollo tecnológico es impresionante. Las oportunidades para nuevas investigaciones que contribuyan a expandir el conocimiento son abundantes. Las tendencias tecnológicas más recientes giran alrededor de varios conceptos, tales como *big data*, analítica avanzada, “internet de las cosas”, optimización en tiempo real, simulación híbrida e ingeniería basada en modelos. La ingeniería industrial está tomando un rol muy importante, y también puede beneficiarse en gran medida con estas tendencias, que siguen desarrollándose. Hay varias tendencias en la ingeniería industrial que nos han llamado la atención y que ya están impactando en estos momentos.

Big data y analítica. La analítica, que se refiere a los métodos y técnicas para extraer patrones y nueva información a partir de datos estructurados, semiestructurados o no estructurados, ahora tendrá que adaptarse a la *big data*. Los grandes datos generados en muchas aplicaciones son enormes en términos de volumen, variedad, velocidad y veracidad. Se ha demostrado que el uso de técnicas de análisis de datos representa ventajas para mejorar los negocios. Varios reportes explican que muchas organizaciones están de acuerdo en que con estas técnicas se puede llegar a la optimización de las empresas. Estos conocimientos permiten alcanzar y gestionar cuatro objetivos que son fundamentales para una organización: rendimiento del capital, crecimiento, gestión de riesgos e innovación. La analítica incluye herramientas de computación evolucionaria, aprendizaje profundo, redes neuronales, máquinas con vectores de apoyo, lógica difusa, árboles de decisiones, sistemas expertos, y las herramientas de la estadística tradicional y el cálculo de probabilidades.

El internet de las cosas (o internet industrial). El internet de las cosas (IoT, por su sigla en inglés), desde el punto de vista computacional, es la evolución y convergencia del *high throughput computing* (HTC) y el *high performance computing* (HPC) con otros desarrollos, como el *grid computing* y las redes *peer-to-peer* (P2P). El IoT es una visión de una red integrada que cubre objetos físicos capaces de recopilar e intercambiar datos. El IoT permite que dispositivos y aparatos previamente desconectados se conecten a través del equipamiento de dispositivos con tecnología de comunicación, como sensores y etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID, por su sigla en inglés). Para tener una idea de lo omnipresente que es el concepto de internet de las cosas solo tenemos que ver cómo interactuamos con nuestros artículos electrónicos diariamente. Todos nuestros teléfonos y tabletas están vinculados con un ecosistema de numerosas máquinas. Estas máquinas “invisibles” soportan todas las funciones básicas que mantienen las cosas con una mínima intervención humana.

La revolución de compartir. El fenómeno de compartir se ve en la economía compartida. *Economía compartida* es un término general con una serie de significados, a menudo utilizados para describir la actividad económica y social que implica transacciones en línea. También conocido como *share-economy*, un concepto académico que se refiere a un modelo de mercado híbrido. La economía compartida puede adoptar diversas formas,

incluida la utilización de la tecnología de la información para proporcionar a los individuos información que permita la optimización de los recursos mediante la mutualización del exceso de capacidad en bienes y servicios. Una premisa común es que cuando la información sobre los bienes se comparte, el valor de esos bienes puede aumentar para todo el ecosistema y todos los interesados (*stakeholders*).

Optimización en tiempo real para cadenas de suministro. Con la implementación de sensores “inteligentes” ha surgido la manera de predecir, monitorear y coordinar el desempeño de sistemas en tiempo real. Esta transformación requiere metodologías y soluciones capaces de analizar y modelar las señales de estos “sensores” para soportar estrategias óptimas de toma de decisiones. Las técnicas de inteligencia artificial y de optimización permiten tomar decisiones casi de manera instantánea, que observan y afectan entornos de negocios que cambian rápidamente, lo que posibilita ahorros significativos de costos. Por ejemplo, para la denominada *logística de última milla* —el proceso final antes de que las mercancías lleguen a su destino final en una cadena de suministro— se utilizan técnicas de inteligencia artificial para caracterizar a los participantes en las operaciones. Estos sistemas tienen como objetivo evitar retrasos en las operaciones de entrega de mercancías, lo cual mejora el proceso de despacho. Actualmente existe una tendencia en la construcción de herramientas que ayudan a entender y predecir cómo un cliente o un conductor puede causar un retraso en el proceso que afecta a las entregas siguientes. Plataformas de optimización de rutas en tiempo real, alertas en caso de detección de anomalías, opciones de ajustes y rutas dinámicamente cambiantes, que tienen en cuenta el comportamiento de los conductores, de los clientes, los tiempos de viaje y los de servicio, además del tráfico y las condiciones climáticas, son las nuevas tendencias en operaciones logísticas y de cadenas de suministros.

Simulación híbrida y el ciclo de vida de los sistemas con la cadena de suministros. El modelo de simulación híbrida discreto-continuo de la empresa y el ciclo de vida de los sistemas es muy importante. Este conjunto de modelos consiste en modelos de dinámica de sistemas, modelos continuos de niveles jerárquicos superiores y más abstraídos, que están conectados con simulaciones de eventos discretos para funciones operativas, tácticas y fases del ciclo de vida del sistema. Por ejemplo, el modelado de dinámica de sistemas se ajusta mejor a la naturaleza macroscópica de las actividades en los niveles superiores de gestión, mientras que los modelos discretos se ajustan mejor a la naturaleza microscópica de los niveles operativos y tácticos de la empresa. Los modelos de dinámica de sistemas pueden representar la naturaleza de la arquitectura del sistema, mientras que los modelos discretos representan las operaciones de un sistema en particular. En la última década, los ingenieros de sistemas han comenzado a reemplazar el proceso de documentación tradicional con enfoques de modelado de simulación. Los modelos de simulación proporcionan a los ingenieros un medio más riguroso para capturar e integrar los requisitos del sistema, el diseño, el análisis y la información de verificación.

Luis Rabelo

Profesor asociado

Universidad Central de la Florida

DOI: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1197>

Evaluación de la generación de vapor de la fábrica de refrescos 23 de Agosto, en Camagüey

Amaury Pérez-Sánchez^{1*}, Yenney Fernández Tejeda², Raúl González de la Cruz^{3*}

* Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte y Loynaz, Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria, Departamento de Química, carretera Circunvalación Norte, km 5½, e/ camino viejo de Nuevitas y av. Ignacio Agramonte CP 74650, Camagüey, Cuba.

* Autor para correspondencia: amauryps@nauta.cu.

** Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte y Loynaz, Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria, Departamento de Ingeniería Química, carrera de Ingeniería Química, carretera Circunvalación Norte, km 5½, e/ camino Viejo de Nuevitas y av. Ignacio Agramonte, Camagüey, Cuba. CP 74650.

* Autor para correspondencia: raul.gonzalez@reduc.edu.cu

RESUMEN

El presente trabajo se llevó a cabo en la fábrica de refrescos 23 de Agosto, con el fin de evaluar la eficiencia energética del generador de vapor, determinar las pérdidas de calor en las tuberías de vapor que se encuentran sin aislamiento, determinar el impacto medioambiental que producen los gases de combustión generados, evaluar el sistema de tratamiento del agua con que se alimenta la caldera (suavizador de agua), así como efectuar un análisis técnico-económico de dos variantes de mejoras, consistentes en 1) precalentamiento del agua con que se alimenta la caldera hasta los 90 °C, y 2) aislamiento de las tuberías de vapor con el aislante lana mineral. El empleo del aislante lana mineral redujo las pérdidas de calor en las tuberías en un 90 %, aproximadamente. La eficiencia energética del generador de vapor fue de 86.64 %. Se requiere invertir \$ 523.66 pesos cubanos (PC) para adquirir e instalar las cantidades necesarias del aislante lana mineral, que se recuperará al cabo de 122 días. El suavizador opera de forma eficiente y los gases contaminantes alcanzan la máxima concentración a los 87.285 m, estando por encima del valor establecido en las normas cubanas. La aplicación de las dos variantes de mejora propuestas trajo consigo un ahorro total anual de PC 9931.92 por el combustible dejado de consumir en el generador de vapor. Se emplearon programas y herramientas computacionales tales como el Contamín, y hojas de cálculo Excel para el procesamiento de los datos adquiridos.

Palabras clave: evaluación, caldera, medioambiente, agua, pérdidas de calor.

Citation: Pérez Sánchez, A. Fernández Tejeda, F. y González de la Cruz, R. (2017). Evaluación de la generación de vapor de la fábrica de refrescos 23 de Agosto, en Camagüey. *Mutis* 7(1), 7-19, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1198>

Received: Julio 11, 2016. **Accepted:** Marzo 17, 2017. **Published on line:** Mayo 1, 2017.

Copyright: ©2017 Pérez-Sánchez, A. Fernández Tejeda, F. y González de la Cruz, R. This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

Assessment of the steam generation at 23 de Agosto Soda Factory, in Camagüey

ABSTRACT

The present work was carried out in the Factory of Sodas 23 de Agosto, with the aim to evaluate the thermal efficiency of the boiler, determine the heat losses in uninsulated steam pipes; determine the environmental impact of flue gases generated; evaluate the boiler's feedwater treatment system (water softener),



as well as to make a techno-economic analysis of two improvement alternatives, consistent in: 1) Pre-heating of the feeding water to the boiler up to the 90 °C, and 2) Insulation of the steam pipes with mineral wool. The use of the insulating material mineral wool reduced the pipe heat losses in 90 %, approximately. The thermal efficiency of the steam generator was 86.64%. It is required to invest \$523.66 Cuban pesos (CP) to acquire and install the necessary quantities of mineral wool, with a payback period of 122 days. The water softener equipment works efficiently, and the polluting gases reached the maximum concentration at a distance of 87.285 m, which is above the established value by the Cuban standards. The application of the two alternatives of improvement brought about 9931.92 CP of annual total savings due to fuel not consumed in the boiler. Several programs and tools were used to process and analyze the required data, such as the Contamín, and Excel spreadsheets.

Keywords: Assessment, boiler, environment, water, heat losses.

INTRODUCCIÓN

El vapor de agua es uno de los medios de transmisión de calor de mayor efectividad disponibles hoy en día, y su fácil generación y manejo lo han situado como uno de los servicios auxiliares más difundidos en la industria actual. En los diagnósticos energéticos se han encontrado grandes potenciales de ahorro en la generación y distribución de vapor, que van desde 5 hasta 40 % del consumo de combustible (Colciencias, 2009) (Krishnanunni, Paul, Potti & Mathew, 2012). La caldera o generador de vapor no es más que un equipo térmico conformado por un recipiente metálico cerrado de forma hermética y presurizado, destinado a producir vapor o calentar agua u otro fluido mediante un proceso isobárico, a partir del suministro de una fuente de energía primaria (generalmente un combustible), que libera ciertas cantidades de calor que luego es aprovechado de manera indirecta por un fluido (generalmente agua) (Guevara, 2013). El tratamiento del agua de alimentación de un generador de vapor es muy importante para asegurar una larga vida útil de este equipo manteniéndolo libre de problemas operacionales, reparaciones de importancia y accidentes, evitándose así inconvenientes por corrosión e incrustaciones (Morales, 2011). El aislamiento térmico se emplea para reducir las pérdidas térmi-

cas en sistemas termoenergéticos mediante el cerramiento de los equipos, depósitos, tuberías, etc., los cuales, debido a las demandas térmico-mecánicas o a las elevadas temperaturas a las que normalmente están sujetos, son construidos con materiales metálicos con elevadas conductividades térmicas (Isover, 2012). La evaluación energética de calderas pirotubulares ha sido efectuada con anterioridad por varios autores (Colciencias, 2009) (López, 2009) (Krishnanunni *et al.*, 2012) (Guevara, 2013) (Raut, Kumbhare & Thakur, 2014) (Meena & Singh, 2015), empleando diversas metodologías de cálculo disponibles en la actualidad.

La fábrica de refrescos 23 de Agosto se encuentra ubicada en la ciudad de Camagüey, Cuba, y posee una tecnología de procedencia fundamentalmente búlgara, aunque con el transcurso de los años y el deterioro de los equipos y piezas, se ha hecho necesario remodelarla, adquiriendo el equipamiento necesario en otros países, tales como Brasil, Argentina y Rusia. Dados los años de funcionamiento y explotación que lleva esta fábrica, así como también a causa del mantenimiento no adecuado de algunos componentes y equipos del sistema productivo, resulta necesario llevar a cabo una valoración técnico-económica de esta planta con el fin de detectar los problemas de mayor influencia en la eficiencia global del proceso productivo. Con relación a esto, se propuso llevar a cabo, en primera instancia, la evaluación del sistema termoenergético de dicha fábrica, por ser esta área una de las que más deficiencias técnicas presenta y, por consiguiente, una de las de mayor influencia en los costos de producción. Asimismo, se procedió a determinar las pérdidas de calor al ambiente en los tramos de tubería sin aislamiento térmico, la evaluación del sistema de tratamiento de agua que va a la caldera y también la evaluación del impacto medioambiental de los gases de combustión generados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de generación y distribución de vapor

El área de generación de vapor cuenta con una caldera cilíndrica horizontal del tipo pirotubular, cuyos principales parámetros se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Principales parámetros del generador de vapor instalado en la fábrica

Parámetro	Valor	Unidades
Generación máxima de vapor	2500	kg/h
Superficie de calefacción	76.22	m ²
Fecha de fabricación	1983	—
Presión máxima de trabajo autorizada por el fabricante	13 bar	bar
Presión máxima de trabajo actual	8 bar	bar
Volumen de agua a nivel máximo admisible de agua	6.87	m ³
Volumen de vapor a nivel máximo admisible de agua	1.58	m ³
Diámetro del casco	2050	mm
Material	Acero 18 k	—

La caldera es adaptable al consumo de tres tipos de combustibles: gas licuado (fundamentalmente para el encendido de la caldera y posterior precalentamiento del combustible), fuel oil (flujo de alimentación: 121 L/h) y diésel (flujo de alimentación: 57 L/h), siendo el fuel oil el principal combustible que utiliza durante su operación normal. Como material aislante tiene lana de vidrio recubierta por una lámina de acero inoxidable. La temperatura de salida de los gases de combustión oscila entre 190 y 260 °C. El vapor de agua generado por la caldera es consumido en tres áreas del proceso: el tanque de mezcla (disolutor), el precalentador del agua y el pasteurizador (véase la fig. 1).

El agua de alimentación de la caldera proviene del acueducto, y es, generalmente, agua tratada que presenta una calidad uniforme. En este caso, el agua que será consumida por la caldera es bombeada hacia el

suavizador, que emplea una resina intercambiadora catiónica (Lewatit®) con el objetivo de reducir la dureza total de la misma hasta valores según la norma NRIAL 012, "Aguas industriales-aguas de calderas: especificaciones de calidad" (Minal, 1992). Una vez tratada (suavizada), el agua es enviada hacia un tanque recolector de agua suave, antes de ser dirigida al generador de vapor a una presión de 8 kgf/cm² por medio de una bomba centrífuga.

Características de las tuberías por donde circula vapor

En la tabla 2 se exponen los principales datos de los tramos de tuberías por donde circula el vapor de agua en la fábrica, en cuanto a longitudes, diámetros y configuración.

Tabla 2. Datos de los tramos de tubería por donde circula vapor de agua

N.º	Tramo	T (°C)	Diámetro interior (mm)	Diámetro exterior (mm)	Longitud (m)	
					H	V
1	Caldera - calentador de combustible	158	52.5	60.3	12.36	1.55
2	Caldera - disolutor	158	77.9	88.9	17.60	1.40

H: horizontal; V: vertical

En la fig. 1 se muestra el esquema de generación y distribución de vapor (esquema termoenergético) de la fábrica de refrescos 23 de Agosto.

Metodologías utilizadas para los cálculos

Metodología para determinar las pérdidas de calor en la red de tuberías de vapor

Para determinar las pérdidas de calor se pueden emplear varias metodologías de cálculo. La que se propone en este trabajo es un programa Excel basado en metodologías existentes en los textos básicos de transferencia de calor (Isachenko, Osipova & Sukomel, 1973) (Mijéev & Mijeeva, 1979) (Pankrátov, 1987) y el folleto *Cálculo de las pérdidas de calor y del espesor del aislante* (Fonte, Nemiróvich, & González, 1986).

Para utilizar este programa, en principio se realizó un levantamiento hidráulico detallado del sistema de tuberías por donde se transporta el vapor de agua en la fábrica, dividiendo este sistema en tramos (o subtramos), para facilitar los cálculos.

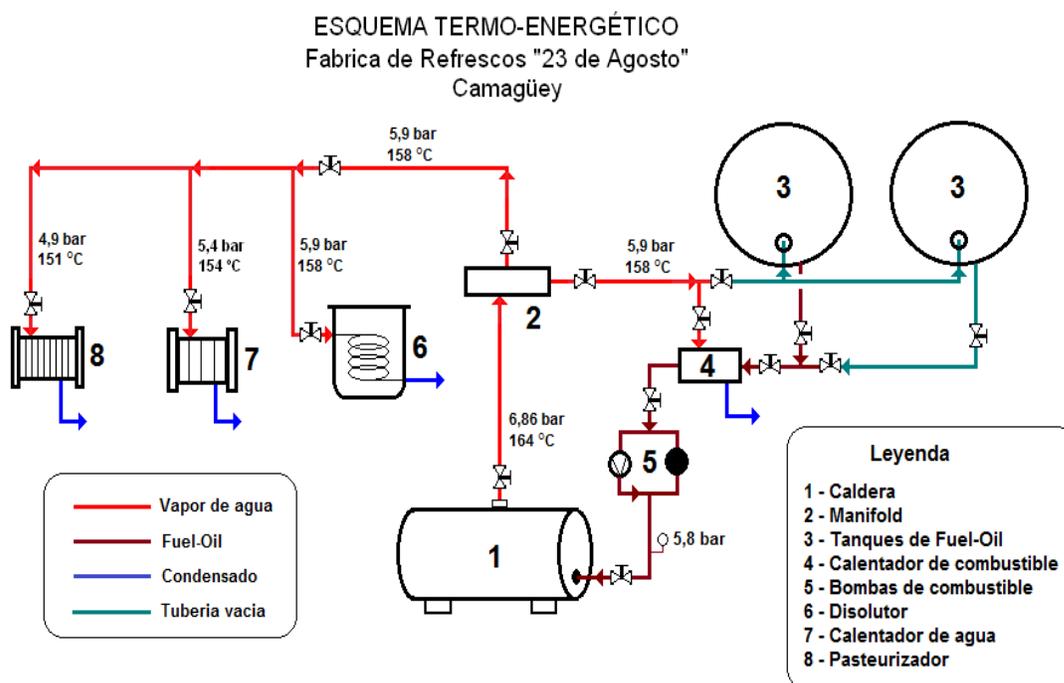


Figura 1. Esquema de generación y distribución de vapor (termoenergético) de la fábrica de refrescos 23 de Agosto

Metodología para determinar el espesor óptimo del aislante

Se propone aislar todas las tuberías por donde circula vapor de agua con lana mineral. En principio se asumirá el diámetro exterior que deberá tener el aislante una vez instalado en la tubería (D_{aisl}), así como también la temperatura de la superficie exterior del mismo (T_{aisl}).

La lana mineral presenta las siguientes propiedades físicas (Calorcol, 2014):

- Conductividad térmica (λ_{aisl}) = 0.036 W/m.K

- Densidad: 60-140 kg/m³

El aislante se recubrirá exteriormente con chapa de aluminio para protegerlo de la corrosión y de humedad.

Metodología de cálculo para determinar la eficiencia energética del generador de vapor

La eficiencia energética del generador de vapor se determinará mediante una hoja de cálculo Excel nombrada "Sistema de análisis de eficiencia para generadores de vapor", versión 2.0, elaborado por el ingeniero Pedro Rodríguez Echemendía, de la Universidad

de Cienfuegos, Cuba, la cual se basa en la metodología de cálculo planteada por Tanquero (1987).

Estimación de la dispersión de los gases contaminantes producto de la combustión

Para la estimación de la dispersión de los contaminantes se utilizó el programa de computación Contamín, que está basado en la norma cubana (NC 39:1999, "Calidad del aire: requisitos higiénico-sanitarios"). Por medio de este programa se puede estimar la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera debido al proceso de combustión.

Análisis de la calidad del agua

Para determinar la calidad del agua de alimentación de la caldera se realizarán análisis de *dureza total* (DT), *conductividad*, *pH* y *concentración de cloruros*, tanto al agua cruda como el agua suavizada, antes de alimentar con ella el generador de vapor. Los resultados serán comparados con las normas de calidad presentes en el laboratorio de la empresa, *NRIAL 012:1992* (Minal, 1992) para aguas de este tipo.

Influencia del uso de aislante en la reducción del consumo de combustible en el generador de vapor, y su posterior impacto económico

Se evaluará el ahorro económico que se obtendría por concepto de combustible que se deja de quemar en la caldera a causa del aislamiento de las tuberías de vapor de agua con lana mineral. El costo de adquisición y montaje de este aislante fue obtenido a partir de datos suministrados por la empresa Alastor, y asciende a PC 15 el metro. El consumo anual de combustible fuel oil en la caldera fue proporcionado por el Departamento de Economía y Contabilidad de la propia fábrica, y asciende a 115 721 L/año. A partir del uso de una hoja de cálculo Excel se determinarán los siguientes indicadores económicos: *valor actual neto* (VAN) y *tasa interna de retorno* (TIR) para un tiempo de 3, 6, 9, 12 y 15 meses, con respecto al ahorro económico que se obtendría por concepto de combustible dejado de quemar en la caldera a causa del aislamiento de las tuberías de vapor con lana mineral. También se calculará el *periodo de recuperación de la inversión* (PRI) con relación a la inversión inicial ejecutada.

Influencia del incremento de la temperatura del agua de alimentación en varios parámetros técnico-económicos de la caldera

El agua de alimentación de la caldera es suministrada a temperatura ambiente (25-35 °C). Sin embargo, se desea conocer el impacto que tendría el precalentamiento de esta agua hasta los 90 °C, en los siguientes parámetros técnico-económicos de la caldera:

- Consumo de combustible (kg/h)
- Índice de generación de vapor ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{comb}}$)
- Eficiencia energética de la caldera (%)
- Cantidad de combustible ahorrado por año (t/año) y su correspondiente resultado económico (\$/año)

Esto se efectuará empleando la hoja de cálculo Excel "Sistema de análisis de eficiencia para generadores de vapor", versión 2.0.

Impacto económico global relacionado con al aislamiento de las redes de tuberías e incremento de la temperatura del agua de alimentación

Se procederá a determinar el ahorro económico total obtenido por concepto de ahorro de consumo de combustible en el generador de vapor, al aplicar las dos variantes de mejoras propuestas, esto es: 1) aislamiento de las redes de tuberías de vapor con el aislante lana mineral, y 2) incremento de la temperatura del agua de alimentación a la caldera hasta 90 °C (precalentamiento), lo cual nos dará una visión cercana acerca de las posibilidades reales de mejoras técnico-económicas en esta sección tan importante de la fábrica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de las pérdidas de calor en las tuberías de vapor y diámetro óptimo al utilizar el aislante de lana mineral

De acuerdo con los resultados obtenidos (tabla 3), el promedio de reducción de las pérdidas de calor al ambiente al emplear el aislante de lana mineral fue de 89.97 % para las tuberías *horizontales*, mientras que para las *verticales* se obtuvo un valor de 90.12 %, los cuales se encuentran en el rango establecido por la bibliografía consultada (Isachenko, Osipova & Sukomel, 1973) (Fonte, Nemiróvich & González, 1986), que es de 75-95 %.

Tabla 3. Resultado de las pérdidas de calor empleando el aislante lana mineral

Tramo	Pérdidas de calor (aislada) [W/m]		Pérdidas de calor (aislada) [W]		Reducción de pérdidas de calor (%)		Espesor del aislante (mm)		Diámetro de tubería con aislante (mm)	
	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V
1	47.96	64.80	592.79	100.44	89.9	89.9	12.24	12.39	84.77	114.00
2	63.29	61.60	1113.90	86.24	90.0	90.4	13.11	13.46	115.12	116.00
Total	111.25	126.40	1706.69	186.68						

1. Caldera-calentador de combustible
2. Caldera-disolutor

Análisis de los resultados obtenidos para la eficiencia energética del generador de vapor

En la figura 2 y la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos al aplicar la metodología de cálculo seleccionada para determinar la eficiencia energética del generador de vapor, mientras que en la figura 3 se muestra el diagrama de Sankey obtenido.

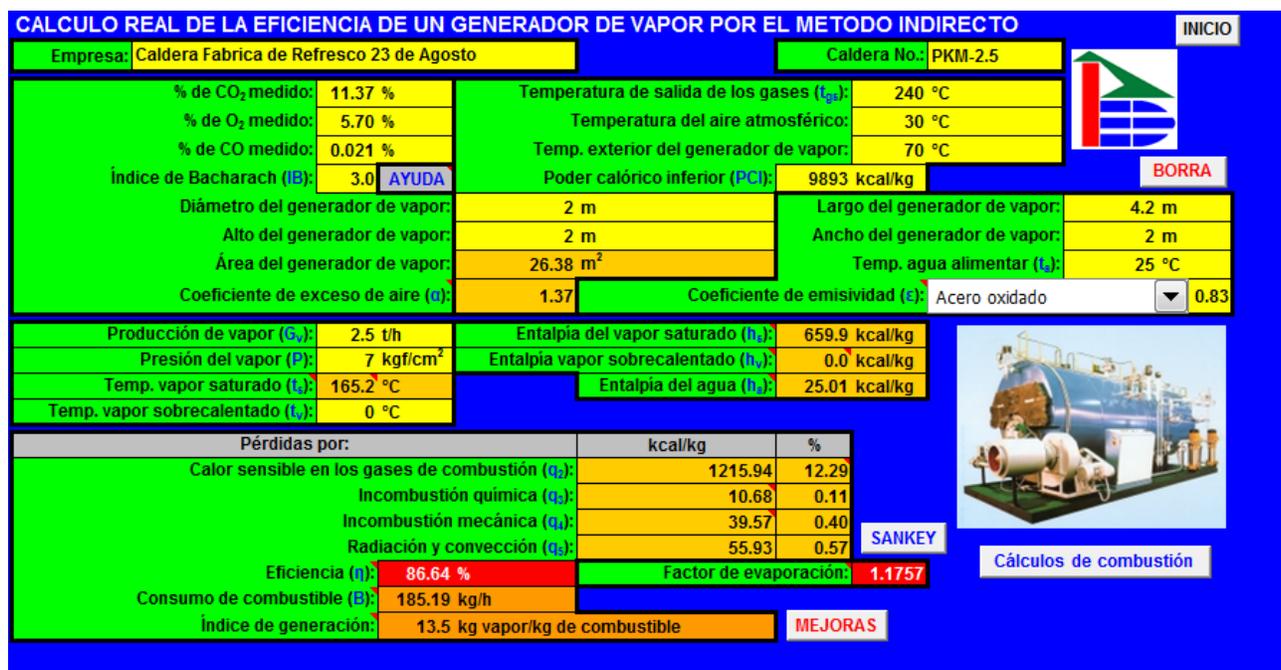


Figura 2. Resultados obtenidos al evaluar la eficiencia energética de la caldera

Según se puede observar en la tabla 4, la eficiencia energética tuvo un valor de 86.85 %. Este resultado se encuentra dentro del rango recomendado (75-88 %) por la bibliografía consultada (Colciencias, 2009) (Morales, 2011) para una caldera de este tipo. Entre las

posibles causas que posibilitan la reducción de la eficiencia energética de una caldera se encuentran, según Krishnanunni *et al.* (2012) y Morales (2011):

- Tratamiento deficiente o no adecuado del agua de alimentación, lo cual origina la formación de depo-

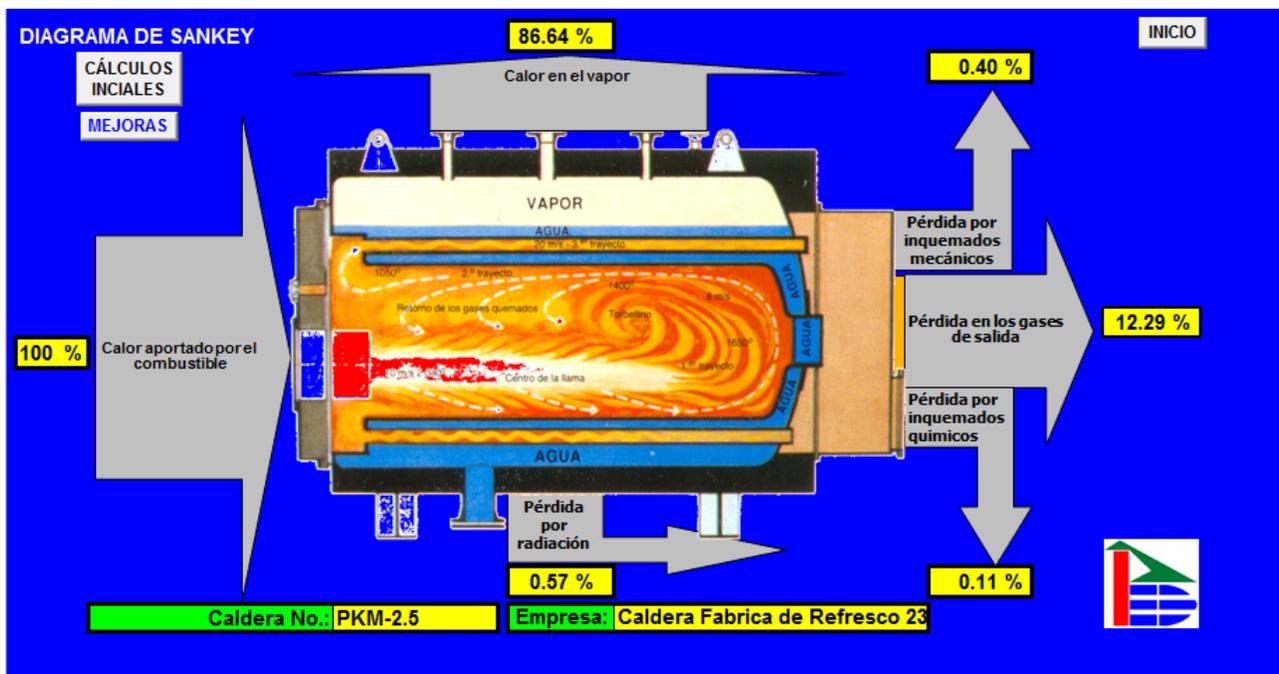


Figura 3. Diagrama de Sankey de la caldera evaluada

Tabla 4. Resultados obtenidos en cuanto a la eficiencia energética de la caldera

Parámetro	Valor	Unidades
Pérdidas de calor sensible en los gases de combustión	12.29	%
Pérdidas por incombustión química	0.11	%
Pérdidas por incombustión mecánica	0.40	%
Pérdidas por convección y radiación	0.57	%
Consumo de combustible	185.19	kg _{comb} /h
Índice de generación	13.5	kg _{vap} /kg _{comb}
Factor de evaporación	1.1757	—
Coefficiente de exceso de aire	1.37	—
Eficiencia energética	86.64	%

siones en la superficie de intercambio de calor interna de la caldera (tubos), reduciéndose así la eficiencia de traspaso (transferencia) de calor desde los gases de combustión hacia el agua, con el consiguiente aumento del consumo de combustible.

- Sistema de combustión deficiente y baja calidad del combustible empleado (presencia de un gran número de impurezas), lo cual origina que no se genere el calor requerido por el proceso, producto de la combustión incompleta del combustible.
- Aislamiento deficiente del generador de vapor.

- Ausencia de precalentamiento del agua de alimentación y/o del aire de combustión.
- Circulación deficiente de los gases de combustión y/o vapor de agua en el interior de la caldera, producto de un diseño mecánico incorrecto de la misma, es decir, el equipo puede estar sub o sobredimensionado con relación a la capacidad real de producción de vapor.

La temperatura de los gases de combustión es de 240 °C, la cual se encuentra 1.33 veces por encima de la reportada en la literatura técnica (Colciencias,

2009) (Faires, 1991) para una caldera de este tipo (180 °C). Las siguientes son, fundamentalmente, las razones:

- *Ensuciamiento de los tubos de intercambio de calor.* La combustión es incompleta y el arrastre de partículas (dependiendo de la calidad del combustible utilizado) puede ir ensuciando poco a poco los tubos.
- *Dosificación incorrecta del combustible.* Otra causa puede ser una mezcla incorrecta del combustible y comburente, lo cual produce mayor temperatura de la llama y los humos. Esto se debe fundamentalmente a un mal estado técnico del quemador.
- *Velocidad excesiva de los gases de combustión (humos).* Una velocidad de salida excesivamente alta no permite la permanencia de los humos calientes el tiempo suficiente para ceder la energía térmica que transportan.

Se obtuvo un valor del consumo de combustible de 184.74 kg/h, mientras que el índice de generación de vapor (IGV) fue de 13.533 kg de vapor/kg de combustible.

Al comparar los resultados obtenidos de las pérdidas energéticas (tabla 4), con aquellos reportados por la literatura especializada (Colciencias, 2009) (Faires, 1991), se puede considerar lo siguiente:

- Las pérdidas de calor en los *gases de combustión* (12.29 %) se encuentran dentro del rango establecido (6-30 %).

- Las pérdidas por *incombustión química* (0.11 %) se hallan también dentro del intervalo recomendado (0-5 %)
- Las pérdidas por *incombustión mecánica* se encuentran cercanas a cero (0.40%), cuando se sugiere que deben ser de 0 %
- Las pérdidas por radiación y convección (0.35 %) se encuentra por debajo del rango permitido (2-6 %), lo cual indica un aislamiento térmico eficiente del generador de vapor

Estimación de las emisiones de los compuestos contaminantes producto de la combustión del combustible

En la figura 4 se muestra la ventana principal del software Contamín, en la cual se detallan los diferentes valores que deberán tener los parámetros considerados para que este programa funcione, mientras que en la figura 5 se observa el resultado de concentración obtenido para el compuesto dióxido de carbono (CO₂).

La tabla 5 muestra las concentraciones de cada compuesto contaminante generado durante la combustión del fuel oil en la caldera (CO₂, CO, SO₂, NO₂, material particulado y CH₄), las cuales fueron determinadas mediante el software Contamín, y su comparación con los valores límites establecidos por la norma cubana vigente (ONN, 2010).

The screenshot shows the 'Contamín' software window with three tabs: 'Datos', 'Resultados', and 'Gráfico'. The 'Datos' tab is active and contains the following fields:

- Título:** Caldera Fab. Refrescos 23 Agosto
- Boca del punto emisor:** Boca circular (selected), Boca cuadrada
- Tipo de Sustancia:** Sustancia gaseosa o partículas muy finas prácticamente no precipitables (selected), Polvos y hollín precipitables según la eficiencia media de las instalaciones de depuración
- Parámetros:**
 - Altura del punto emisor (m): 12
 - Diámetro del punto emisor (m): 0.65
 - Flujo volumétrico de la mezcla de gases (m³/s): 0.494
 - Flujo máximo de la sustancia contaminante (g/s): 28.04
 - Temperatura de la mezcla de gases (°K): 513.15
 - Temperatura ambiente del aire (°K): 303.15
 - Eficiencia media de depuración (%): 70
- Muestreo:**
 - Eje X: Mínimo 1, Máximo 2000
 - Eje Y: Altura 2
 - Intervalos 5

At the bottom, there is a red message: 'Espere un momento, por favor' and an 'Ejecutar' button.

Figura 4. Ventana principal del software Contamín

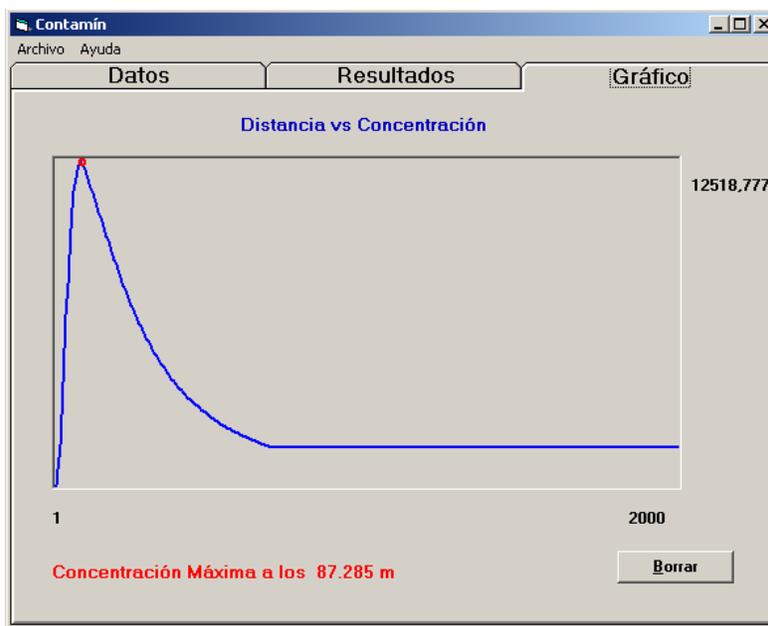


Figura 5. Concentración máxima obtenida para el compuesto CO₂

Tabla 5. Resultados obtenidos de las emisiones de gases contaminantes mediante el Contamín y su comparación con la norma cubana vigente

Compuesto	Concentración calculada (mg/m ³)	Valor según norma (mg/m ³)	¿Cumple?
CO ₂	12.52	—	—
SO ₂	1.97	5	Sí
NO _x	0.0356	700	Sí
Material particulado	0.00254	—	—
CH ₄	0.0204	50	Sí

Según la norma consultada, el compuesto *dióxido de azufre* (SO₂) debe tener una emisión máxima admisible de 5 mg/Nm³ para una caldera que consume fuel oil. El valor de emisión obtenido para este compuesto por medio del software Contamín fue de 1.97 mg/Nm³, que, según se puede observar, se encuentra por debajo del valor establecido. En el caso del material particulado (MP), la emisión máxima no deberá exceder los 50 mg/Nm³, mientras que el valor calculado de MP en el Contamín fue de 0.0204 mg/Nm³, que también es menor que el máximo establecido por las normas cubanas. Por último, para los óxidos de nitrógeno (NO_x), el valor calculado a través del Contamín fue de 0.0356 mg/Nm³, que también se encuentra por debajo del valor máximo normado (700 mg/Nm³).

Finalmente, según el programa Contamín, la distancia (radio) a la cual se alcanza la mayor concentración de

contaminantes es de 81.384 m, que se encuentra por encima del radio mínimo admisible según la norma cubana consultada (ONN, 2010), que es de 50 metros. Esto significa que los gases contaminantes generados afectan tanto el medioambiente del interior de la fábrica como las zonas adyacentes a esta.

Evaluación de los resultados de los ensayos de calidad realizados tanto para el agua cruda como para la suave

Con relación a los resultados obtenidos de los análisis físico-químicos efectuados tanto al agua cruda como a la suave, se obtuvieron los valores expuestos en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados de los análisis físico-químicos efectuados tanto al agua cruda como a la suave, y su comparación con la norma cubana vigente

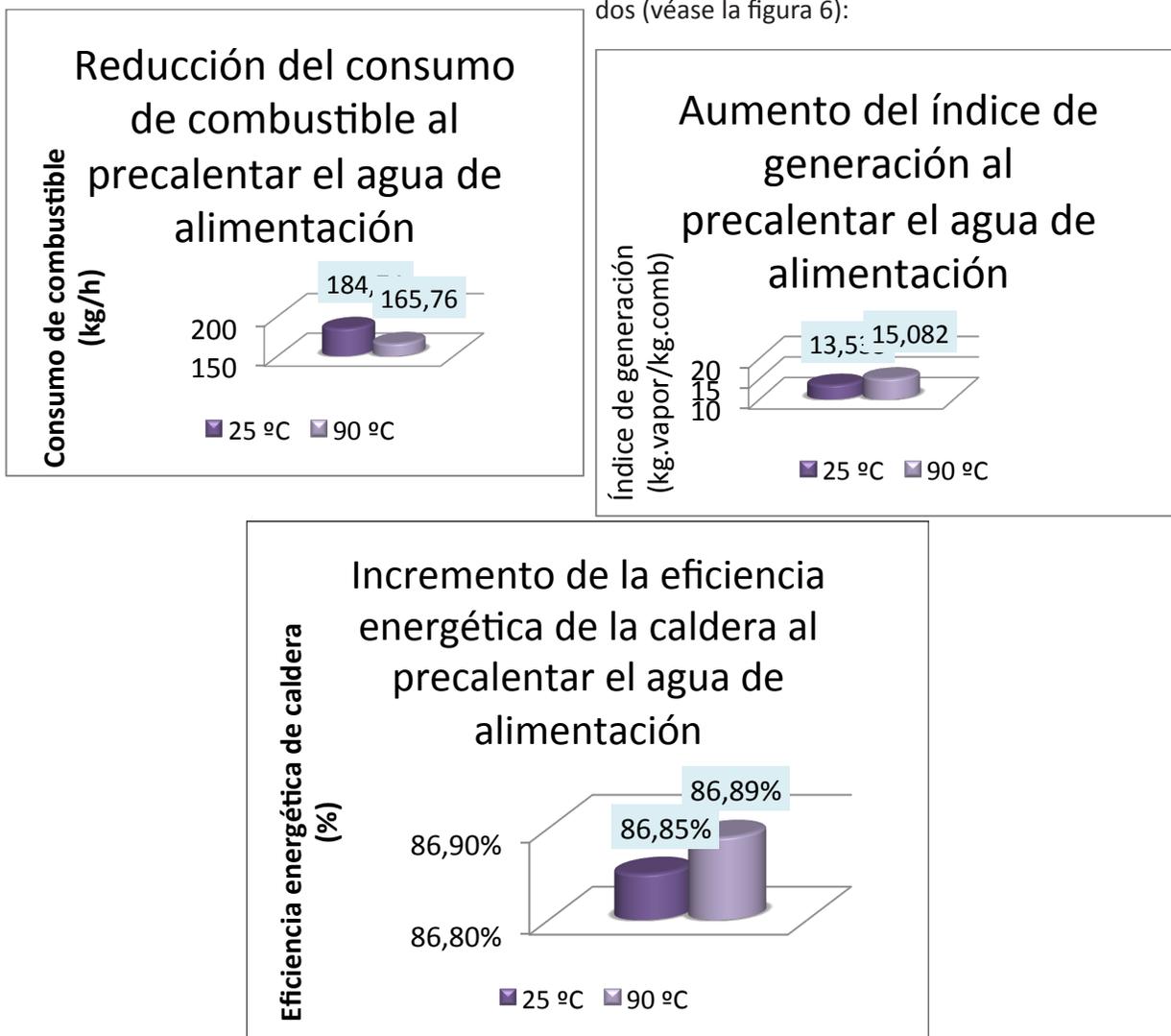
Parámetro	Agua cruda	Agua suave	Norma (agua suave)	¿Cumple con la norma NRIAL 012:1992?
Dureza total (ppm)	127.00	0.15	0-10	Sí
pH	7.78	7.46	7.0-9.0	Sí
Conductividad	394.5	410	—	—
Concentración cloruros (ppm)	162	105	Igual o menor	Sí

De forma general, se puede concluir que el sistema de tratamiento del agua con que se alimenta la caldera es *eficiente*, ya que se obtiene un agua suave que cumple con todos los parámetros físico-químicos referidos en la norma *NRIAL 012:1992* (Minal, 1992) para un agua de este tipo.

Análisis de las alternativas de mejoras

Pre calentamiento del agua de alimentación a la caldera desde 25 °C hasta 90 °C

El aumento de la temperatura del agua de alimentación hasta 90 °C traerá consigo los siguientes resultados (véase la figura 6):

**Figura 6.** Resultados obtenidos al precalentar el agua de alimentación a la caldera desde 25 °C hasta 90 °C

- Ahorro de 19.34 kg/h de combustible
- Incremento del índice de generación de vapor en 1,574 kg_{vapor}/kg_{comb}
- Incremento de la eficiencia energética de la caldera en un 0.20 %

Todo ello traerá consigo que se ahoren 17.41 toneladas (17 410 kg) de fuel oil al año. Tomando en cuenta que el litro de fuel oil cuesta PC 0.5039, según datos suministrados por el Departamento de Contabilidad de la propia fábrica, y que la densidad de este combustible es de 0.966 kg/L aproximadamente (McCain, 1990), el precalentamiento del agua de alimentación le permitirá ahorrar a la empresa PC 9081.70 por año, por concepto de combustible que no ha alcanzado a consumirse en el generador de vapor.

Aislamiento de las tuberías de vapor con lana mineral

El aislamiento de los tramos de tuberías por donde circula vapor traerá consigo los siguientes ahorros:

- Combustible ahorrado: 1628.73 kg_{comb}/año (~ 1.6 t/año)
- Ahorro económico por combustible ahorrado: PC 850.22/año

Con relación a los datos obtenidos durante el levantamiento hidráulico efectuado en la fábrica, en la actualidad existen 32.91 m (~ 33 m) de tuberías sin aislar, entre horizontales y verticales. El aislamiento de todos estos tramos con lana mineral significaría un costo total de PC 523.66, tomando en cuenta un 2 % de sobrecosto por concepto de montaje. Considerando que se ahorrán alrededor de PC 77.29 al mes por concepto de combustible que no ha alcanzado a consumirse en la caldera, el *periodo de retorno de la inversión* (PRI) será de 122 días, mientras que el *valor actual neto* (VAN) y la *tasa interna de retorno* (TIR) para un tiempo de 12 meses (1 año), tendrán valores de PC 229.96 y 10 %, respectivamente, tomando en cuenta una tasa de interés del 17 %. En la figura 7 se muestra el comportamiento de las variables VAN y TIR con respecto al tiempo (3, 6, 9, 12 y 15 meses).

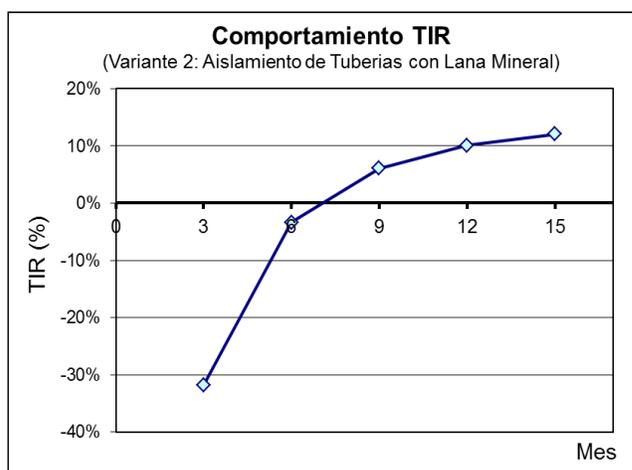
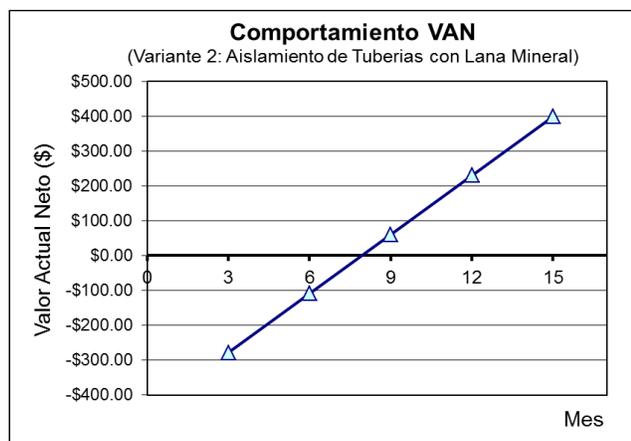


Figura 7. Comportamiento de las variables VAN y TIR con respecto al tiempo para la variante de mejora n.º 2, “Aislamiento de las tuberías con lana mineral”

Ahorro económico total

El ahorro económico total que se obtendrá por año al aplicarse ambas variantes de mejoras será de

$$\$ 9081.7 + \$ 850.22 = \$ 9931.92/\text{año}.$$

CONCLUSIONES

1. La distancia a la cual se obtiene la concentración máxima para cada contaminante gaseoso es de 87.285 m, la cual se encuentra por encima de la norma cubana establecida (50 m).
2. Se obtiene un agua suavizada con una dureza total cercana a cero (0.15 ppm), lo cual es indicativo de una eficiente operación del sistema de tratamiento de agua.
3. El empleo del aislante de lana mineral reduce las pérdidas de calor en las tuberías horizontales en un 89.97 %, y en las tuberías verticales en un 90.12 %.
4. La eficiencia energética de la caldera es de 86.64 %.
5. La inversión total del aislante de lana mineral será de PC 523.66, y se recuperará en 122 días.
6. El incremento de la temperatura del agua con que se alimenta el generador de vapor hasta 90 °C traerá consigo un ahorro económico anual de PC 9087.10.
7. El aislamiento de los 32.91 m de tuberías de vapor con lana mineral traerá consigo un ahorro económico anual de PC 850.22 por concepto de combustible que no alcanza a quemarse en la caldera.
8. La aplicación de las dos variantes de mejora propuestas en el sistema termoenergético de la fábrica traerá consigo un ahorro total anual de PC 9931.92.

REFERENCIAS

- Calorcol (2014). *Catálogo general de productos* (pp. 4-12). Antioquia: Calorcol.
- Colciencias (2009). *Eficiencia energética en la generación y distribución de vapor* (Informe n.º 112-2009). Medellín: Universidad del Atlántico y Universidad Autónoma de Occidente.
- Faires, V. W. (1991). *Termodinámica*. La Habana: Editorial Científico-Técnica.
- Fonte, A., Nemiróvich, P. M., y González, R. (1986). *Cálculo de las pérdidas de calor y del espesor del aislante* (pp. 10-22). Camagüey: Editorial Universidad de Camagüey.
- Guevara, R. F. (2013). *Curso plantas consumidoras de energía. Separata II-generadores de vapor pirotubulares* (pp. 13-29). Nuevo Chimbote: Universidad Nacional del Santa.
- Isachenko, V., Osipova, V., y Sukomel, A. (1973). *Transmisión del calor* (pp. 39-67). Bilbao: Editores Marcombo.
- Isover (2012). *Manual de aislamiento en la industria* (pp. 3-8), Badalona: Isover.
- Kasatkin, A. G. (1985). *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química* (pp. 12-40). La Habana: Pueblo y Educación.
- Kern, D. Q. (1999). *Procesos de transferencia de calor* (pp. 76-212). México D. F.: Compañía Editorial Continental.
- Krishnanunni, S., Paul, J., Potti, M., & Mathew, E. M. (2012). Evaluation of Heat Losses in Fire Tube Boiler: *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(12), 301-305.
- López, A. (2009). Evaluación del generador de vapor de la planta piloto del centro de estudios anticorrosivos y tensoactivos de la Universidad de Matanzas. *Monografías*, 2(4), 1-15.
- McCain, W. D. (1990). *The Properties of Petroleum Fluids* (pp. 112-136). Oklahoma: PennWell Books.
- Meena, V. S., & Singh, M. P. (2015). Efficiency Assessment and Improvement of Boiler at Super Thermal Power Station: *International Journal for Advance Research in Engineering and Technology*, 3(4), 32-36.
- Mijéev, M. A., y Mijeeva, I. M. (1979). *Fundamentos de termotransferencia* (pp. 39-58). Moscú: Editorial Mir.
- Minal (1992). *NRIAL 012: Especificaciones de calidad. Aguas industriales-aguas de calderas*. La Habana: Minal.
- Morales, E. F. (2011). *Calderas* (pp. 10-68). Chile: Universidad Austral de Chile.

- Oficina Nacional de Normalización (2010). *NC-TS 803:2010. Calidad del aire: Emisiones máximas admisibles de contaminantes a la atmósfera en fuentes fijas puntuales en instalaciones generadoras de electricidad y vapor*. La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- Pankrátov, G. (1987). *Problemas de termotecnia* (pp. 30-94). Moscú: Editorial Mir.
- Pérez, L. (1972). *Generadores de vapor* (pp. 90-136). Ciudad de La Habana: Pueblo y Educación.
- Raut, S., Kumbhare, S. B., & Thakur, K. C. (2014). Energy Performance Assessment of Boiler at P.S.S.K. Ltd, Basmathnagar, Maharashtra State. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(12), 242-253.
- Tanquero, N. (1987). *Guía metodológica para proyectos de curso de generadores de vapor* (pp. 28-96). Ciudad de La Habana: Pueblo y Educación.

Dinámica multitemporal de las coberturas y el espejo de agua en la laguna de Fúquene

Ivón Maritza Castillo, Miguel Ángel Rodríguez*

Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Departamento de Ciencias Biológicas y Ambientales, maestría en Ciencias Ambientales, carrera 4 n.º 22-61, módulo 16, oficina 309, Bogotá, Colombia.

* Autor para correspondencia: miguel.rodriguez@utadeo.edu.co

RESUMEN

La laguna de Fúquene, ubicada en los valles de Ubaté y Chiquinquirá, es uno de los ecosistemas acuáticos más importantes del altiplano cundiboyacense, en Colombia. Desde hace varias décadas, la población circundante a la laguna se ha beneficiado de los servicios que ofrece este ecosistema, tales como la provisión de agua para la agricultura y los acueductos locales, pesca, turismo y transporte. Sin embargo, anteriores procesos de desecación y eutrofización de sus aguas, debidas a la carga orgánica y de nutrientes vertida de manera descontrolada sobre este cuerpo de agua, han ocasionado fuertes impactos ambientales sobre este ecosistema. Una de las principales evidencias del disturbio antrópico ha sido la progresiva reducción del espejo de agua a favor del crecimiento de diferentes tipos de coberturas vegetales acuáticas. Con el fin de analizar la dinámica de estas coberturas vegetales en el tiempo y en el espacio se emplearon herramientas de sensorización remota y sistemas de información geográfica. Mediante el análisis multitemporal de imágenes de satélite obtenidas en el periodo comprendido entre 1984 y 2003 se determinó que el área del espejo de agua presentó una disminución del 78.7 %. Especialmente se estableció que la aparición y expansión de la vegetación acuática se ha dado desde las orillas norte y sur de la laguna. La disponibilidad restringida de imágenes de satélite no permitió establecer la tendencia actual de las áreas del espejo de agua y de las coberturas vegetales. La aplicación de herramientas de sensorización remota y sistemas de información geográfica permitió una cuantificación bastante precisa de los cambios espaciales y temporales que han presentado las coberturas de la laguna a lo largo del periodo de tiempo considerado, aun cuando la desecación de la laguna y la pérdida del espejo de agua es un fenómeno plenamente comprendido para la laguna de Fúquene.

Palabras clave: disturbio antrópico, eutrofización, impacto ambiental, sensorización remota, sistemas de información geográfica.

Citation: Castillo, I. M. & Rodríguez, M. A. (2017). Dinámica multitemporal de las coberturas y el espejo de agua en la laguna de Fúquene. *Mutis* 7(1), 20-33, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1183>

Received: Septiembre 20, 2016. **Accepted:** Diciembre 12, 2016. **Published on line:** Mayo 1, 2017.

Copyright: ©2017 Castillo, I. M. & Rodríguez, M. A. This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

Multitemporal cover dynamics in the Fúquene lagoon

ABSTRACT

The Fúquene Lagoon, located in the valleys of Ubaté and Chiquinquirá, is one of the most important

aquatic ecosystems of the Altipano Cundiboyacense in Colombia. For several decades, the population surrounding the lagoon has benefited from the services this ecosystem provides such as water supply for agriculture and local communities, fisheries, tourism and transport. However, previous processes of desiccation and eutrophication of its waters, due to organic matter and nutrients discharged out of control on this body of water, have caused serious environmental impacts on the ecosystem. One of the main evidences of this anthropic disturbance has been the progressive reduction of the water surface in favor of the growth of different types of aquatic vegetation cover. In order to analyze the dynamics of these plant covers in time and space, this work was proposed in which tools from remote sensing and geographic information systems were employed. Through the multi-temporal analysis of satellite images for the period between 1984 and 2003 it was determined that the area of the water surface showed a decrease of 78.7%. Spatially it was established that the emergence and spread of aquatic vegetation has occurred from the north and south shores of the lake. The restricted availability of satellite images limited the possibility to establish the trend of the areas of water surface and vegetation cover. The application of remote sensing and geographic information systems allowed a fairly precise quantification of spatial and temporal changes along the period considered, despite the draining of the lagoon and loss water mirror is a fully understood phenomenon.

Keywords: anthropic disturbance; eutrophication; environmental impact; remote sensing; geographic information systems

INTRODUCCIÓN

Hoy en día la pérdida y degradación de ecosistemas acuáticos, así como la disminución de la calidad del recurso hídrico, constituyen una de las mayores preocupaciones ambientales a nivel mundial (Navarro-Ortega *et al.*, 2015). La presión antrópica sobre este tipo de ecosistemas, debida a sectores como el industrial o el agrícola, ha ocasionado problemas de tipo ambiental, entre los que se incluyen procesos de contaminación a diversas escalas, pérdida de hábitats de flora y fauna y afectación de los servicios

ecosistémicos ofrecidos (*e. g.*, Camargo y Alonso, 2006; Alberti *et al.*, 2007; Woodward *et al.*, 2012; Omar, Zaghloul, Abdel-Khalek & Abo-Hegab, 2013). Colombia no ha sido ajena a esta situación: a lo largo de su territorio se encuentran ecosistemas acuáticos que presentan esta problemática en mayor o menor grado (Espitia-Contreras, 2013).

La laguna de Fúquene, ubicada en los valles de Ubaté y Chiquinquirá, ha sido uno de los ecosistemas acuáticos más fuertemente sometidos a diferentes procesos de disturbio antrópico. El principal de ellos es la ganadería que se adelanta en buena parte de la región circundante a la laguna, así como la agricultura desarrollada en las zonas de ladera, mayoritariamente con cultivos de papa. El uso indiscriminado de fertilizantes en estas zonas ha ocasionado procesos de eutrofización que favorecen la proliferación de coberturas vegetales acuáticas y que a su vez constituyen un factor determinante en la desecación de la laguna. Este tipo de procesos de contaminación se constituyen en amenazas locales a la dinámica de los ecosistemas acuáticos (Khan *et al.*, 2014).

De igual manera, los vertimientos inadecuados de aguas residuales por parte de las poblaciones aledañas y de las industrias presentes en la zona también han contribuido a agravar la problemática que hoy exhibe esta laguna. La consecuencia directa y evidente de estas afectaciones ha sido la disminución del espejo de agua, pero también genera incertidumbre el efecto de estas afectaciones sobre la calidad del recurso hídrico del que se abastecen las poblaciones ubicadas aguas abajo (Pernett, 2006).

La integración de la sensorización remota y de los sistemas de información geográfica (SIG) han permitido el monitoreo y la evaluación de cambios espaciales y temporales de las coberturas en diferentes lugares del mundo (*e. g.*, Sexton, Urban, Donohue y Song, 2013; Were, Dick, & Singh, 2013; Pathirana, Perera y Sanaa, 2015). Hoy en día, la disponibilidad de imágenes de satélite de alta resolución, tanto temporal como espacial, permite analizar la variabilidad del agua almacenada en un determinado ecosistema en relación con aspectos clave como la susceptibilidad a inundaciones o la presencia de algún tipo de disturbio (Sawaya *et al.*, 2003). Por medio de la información contenida en las imágenes de satélite, los SIG permiten cuantificar de manera confiable el área de la superficie del cuerpo

de agua, elevación, pendiente y cambio temporal, variables que posibilitan analizar la variabilidad de los cuerpos de agua (Alsdorf, Rodríguez & Lettenmaier, 2007).

La sensorización remota se ha convertido en una técnica alternativa útil y eficiente para monitorear y evaluar la dinámica permanente a que se ven expuestos los cuerpos de agua en diferentes lugares del mundo. La utilización de este método se ha visto potenciado por la creciente disponibilidad de imágenes satelitales multitemporales con resoluciones moderadas a altas durante las últimas tres décadas (Bastawesy, Khalaf, & Arafat, 2008).

El comportamiento multitemporal de diversos cuerpos de agua a lo largo del mundo ha sido estudiado aplicando la sensorización y los SIG. Hernández-Cornejo, Koedam, Ruiz-Luna, Troell y Dahdouh-Guebas (2005) evaluaron los cambios en las áreas de manglar en el complejo lagunar Navachiste-San Ignacio-Macapule, en el estado de Sinaloa (México). Los cambios multitemporales del lago Uluabat (Turquía) y sus áreas circundantes fueron estudiadas por Aksoy & Özsoy (2002), también utilizando la integración de la sensorización remota y los SIG. Alexandridis, Takavakoglou, Crisman, & Zalidis (2007) plantearon como objetivo de su estudio demostrar cómo la sensorización remota, junto con los SIG, podían contribuir a la selección de una condición de referencia sostenible para el lago Koronia de Grecia.

En Grecia, Papastergiadou, Retalis, Apostolakis & Georgiadis (2008) presentaron un estudio de caso en el que aplicaron la integración de estas herramientas para la clasificación y el monitoreo de los cambios espaciales y temporales de un humedal natural del lago Cheimaditida, ubicado en el norte de Grecia. Giardino, Bresciani, Villa & Martinelli (2010) estudiaron el lago Trasimeno, en Italia, con el objetivo de mejorar el conocimiento ambiental y las condiciones de referencia de ese cuerpo de agua. Dicho estudio no solamente incluyó el análisis multitemporal y espacial de las coberturas, sino también la calidad del agua.

A escala regional se han utilizado herramientas de sensorización remota y SIG para analizar el comportamiento de diferentes cuerpos de agua. En relación con lagunas, Rondón y Vergara (2012) estudiaron espacial y temporalmente el

comportamiento histórico de las lagunas Sayhuacocha, Raurac, Ampatococha y Tutayoc, ubicadas en el departamento de Huancavelica, en Perú. En Colombia, Parra & Hernández (2010) identificaron y delimitaron los humedales lénticos del valle alto del río Cauca mediante el procesamiento digital de imágenes de satélite.

En relación con la laguna de Fúquene, se han estudiado aspectos relativos a su flora, fauna, conservación y problemática ambiental. Sin embargo, estudios relacionados con el uso de sensorización remota y SIG son pocos; entre ellos se encuentran el elaborado por Bustamante (2010), quien desarrolló un modelo de autómatas celulares para simular la invasión del buchón (*Eichornia crassipes*) durante el periodo 1950-2030. A partir de ocho fotografías aéreas tomadas entre los años 1950 y 2007 se extrajo la información de base requerida para la calibración del modelo.

Dada la problemática actual de la laguna de Fúquene se hace necesario realizar un análisis cuantitativo de la dinámica del espejo de agua y de las coberturas acuáticas presentes, con el fin de establecer una línea de base objetiva que permita conocer no solo los cambios a que se ha visto sometida la laguna, sino los posibles escenarios a que se vería abocada de no corregirse la situación actual. Es así como el objetivo del presente trabajo fue determinar la dinámica de las coberturas vegetales acuáticas y del espejo de agua de la laguna de Fúquene mediante el análisis multitemporal de imágenes de satélite durante el periodo comprendido entre 1984 y 2003.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La cuenca de la laguna de Fúquene se encuentra en la sabana de los valles de Ubaté y Chiquinquirá, a una altura de 2543 m. s. n. m., entre los 5° 25' y 5° 30' de latitud norte y 73° 43' y 73° 47' de longitud oeste (Pernett, 2006); posee un área de 1752 km², que forma parte del sistema hídrico integrado por los ríos Ubaté, Sutatausa, Cucunubá, Lenguazaque, Honda y Monroy; todos ellos desembocan en la laguna de Fúquene (Rodríguez-Briceño, 2012).

La zona se caracteriza por tener dos temporadas secas y dos húmedas, que se alternan. Las temporadas secas

ocurren entre los meses de diciembre a febrero y de junio a agosto, mientras que las temporadas húmedas se presentan durante los meses de marzo a mayo y de septiembre a noviembre. La precipitación promedio anual es de 850 mm, mientras que la temperatura mensual promedio varía en un rango de 12 a 13.2 °C (Pernett, 2006).

Cuantificación del espejo de agua y coberturas vegetales

La cuantificación del área del espejo de agua y de las coberturas vegetales acuáticas asociadas a la laguna de Fúquene se realizó mediante la interpretación de imágenes de los satélites Landsat 5 y Landsat 7 tomadas entre los años 1984 y 2003. Esas imágenes se descargaron gratuitamente de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). Cada imagen satelital está compuesta por un conjunto de archivos, cada uno de los cuales contiene la información registrada en cada una de las bandas espectrales. Las imágenes descargadas están radiométrica y geoméricamente corregidas, y georreferenciadas con el sistema de coordenadas geográficas WGS84 (World Geodetic System 84).

Las imágenes de las bandas individuales se usaron para realizar una composición a falso color usando la combinación RGB 453, procedimiento que se llevó a cabo usando el software GRASS 6.3 (GRASS Development Team, 2012), por medio de la función *r.composite*. El uso de esta combinación de bandas ha demostrado ser útil para discriminar diferentes tipos de vegetación y espejos de agua (Tarasenko, 2013), en especial, porque las bandas 4 y 5 capturan la reflectancia en el infrarrojo cercano, y en este segmento del espectro las plantas tienen una alta reflectancia, lo que facilita su identificación y clasificación.

La interpretación se realizó con posterioridad a la proyección de las imágenes al *datum* oficial de coordenadas planas (Gauss-Krüger) para la franja central de Colombia: Magna-Sirgas/Colombia Bogota zone, identificada con el código EPSG (European Petroleum Survey Group) 3116.

Posteriormente se realizó un corte de las imágenes correspondiente al área de la laguna, que se definió con base en la construcción de un polígono que delimitaba el área a partir de la imagen más antigua

(diciembre de 1984). Los recortes de las imágenes se interpretaron usando como principales criterios el color y el patrón espacial de los distintos tipos de coberturas presentes en cada imagen, fraccionando el espacio en diferentes clases caracterizadas por su homogeneidad interna y distintas de áreas adyacentes (Melo y Camacho, 2005). La delimitación de las coberturas se llevó a cabo mediante la segmentación del polígono inicial que se definió para delimitar la laguna. Este proceso se realizó usando el software QGIS (QGIS Development Team, 2009). Después de la delimitación y clasificación de las distintas coberturas se determinó su área, procedimiento que se realizó con cada una de las once imágenes obtenidas.

Para la definición de las categorías correspondientes a la cobertura vegetal acuática se revisó la literatura existente relacionada con la vegetación presente en la laguna y se usó como guía el trabajo realizado por Vidal y Pérez (2007). Se definieron las siguientes categorías para clasificar las coberturas en el área de la laguna de Fúquene:

- Espejo de agua: superficie donde se aprecia la presencia de agua sin presencia relevante de vegetación. En esta categoría los colores varían del azul oscuro al negro, y los bordes del polígono tienden a ser irregulares.
- Vegetación emergente de ribera: vegetación que se encuentra en los bordes de la laguna. En el caso de la laguna de Fúquene, esta vegetación está compuesta principalmente por varias especies de juncos (*Schoenoplectus californicus* y *Juncus effusus*) y la enea o totora (*Typha angustifolia*). En la combinación de bandas empleada, esta vegetación presenta un color verde claro.
- Vegetación acuática flotante: vegetación que se encuentra dentro de la laguna. En la laguna de Fúquene las más abundantes son plantas vasculares: helecho de agua (*Azolla filiculoides*), lenteja de agua (*Lemna minuscula*), buchón de agua (*Limnobium laevigatum*) y la elodea (*Egeria densa*). Todas ellas se distinguen por una coloración violeta.
- Praderas emergentes: constituidas por especies vegetales como el clavito de agua (*Ludwigia peploides*), la gualola (*Polygonum segetum*) y el barbasco (*Polygonum punctatum*) y algunos juncos como la totora (*Typha angustifolia*). En la combinación de bandas se distinguen por colores rosados.

- **Áreas cultivadas:** áreas dedicadas principalmente al pastoreo de ganado, donde se destaca la presencia de pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*). Estas áreas tienen formas regulares con bordes rectos, y con la combinación de bandas empleada se observan de color verde claro.

Determinación de la variación del espejo de agua y coberturas vegetales

Una vez determinadas las áreas de las coberturas vegetales y el espejo de agua de la laguna en diferentes fechas, se procedió a construir una serie de tiempo para cada una de ellas; adicionalmente, se determinó la variación porcentual de cada cobertura en la imagen más reciente (febrero de 2003), tomando como referencia la cobertura en la más antigua (diciembre de 1984).

A partir de las áreas ocupadas por el espejo de agua y las coberturas acuáticas vegetales se establecieron las posibles asociaciones entre las coberturas discriminadas a lo largo del tiempo, para lo cual se calcularon las correlaciones lineales de Rho-Spearman entre pares de coberturas. Con el fin de profundizar en las variaciones que ha presentado el espejo de agua se realizó

una regresión lineal entre el área del espejo de agua y el tiempo. Al calibrar el modelo de regresión lineal se obtuvieron los parámetros de intercepto y pendiente, siendo la pendiente el valor que se analizaría. Estos procedimientos se realizaron usando el lenguaje de programación estadístico R (R Core Team, 2014).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuantificación del espejo de agua y coberturas vegetales

La cuantificación del espejo de agua y de las coberturas vegetales acuáticas presentes en el momento de la toma de cada imagen satelital se encuentran presentadas en la tabla. En el momento de la captura de la primera imagen satelital considerada en el presente estudio solamente se determinó la presencia notable de vegetación emergente de ribera, mientras que el área ocupada por las praderas emergentes podía considerarse como marginal. Para esa fecha, el espejo de agua dominaba la mayor parte del área de la laguna, representando el 62.3 % del área del polígono estudiado.

Tabla. Distribución de las áreas (km²) ocupadas por el espejo de agua y las coberturas vegetales acuáticas de la laguna de Fúquene a partir de la interpretación de las imágenes de satélite consideradas.

Fecha de imagen	Acuática flotante	Áreas cultivadas	Emergente de ribera	Espejo de agua	Isla	Praderas emergentes
Dic. 1984	0.0	0.0	11.3	19.8	0.1	0.5
Jul. 1985	0.0	0.0	10.9	19.7	0.1	1.1
Mar. 1987	0.0	0.0	11.3	19.1	0.1	1.2
Dic. 1987	0.0	1.4	10.1	18.8	0.1	1.4
Dic. 1989	0.0	1.3	11.1	17.4	0.2	1.8
Mar. 1991	0.0	1.4	10.0	18.1	0.1	2.2
Oct. 1991	0.0	1.8	9.1	18.2	0.1	2.5
Feb. 2000	7.5	1.4	9.4	7.3	0.1	6.1
Ago. 2002	7.0	1.6	9.7	6.2	0.1	7.1
Nov. 2003	9.7	1.6	9.5	3.9	0.1	7.0
Dic. 2003	8.2	1.7	9.1	4.2	0.1	8.4

En julio de 1985 la composición de espejo de agua y de las coberturas vegetales acuáticas en la laguna de Fúquene era similar a la de diciembre de 1984. Se apreció una leve disminución del área de vegetación emergente de ribera, que fue ocupada por la cobertura de praderas emergentes. Para la fecha de la siguiente imagen satelital considerada (marzo de 1987), el área ocupada por la vegetación emergente de ribera volvió a los niveles observados en 1984, mientras que la vegetación de praderas emergentes presentó un leve aumento en el área ocupada. En esa fecha ya se empezó a observar de manera más clara la reducción del área del espejo de agua.

En diciembre de 1987, la interpretación de la imagen satelital identificó por primera vez la presencia de áreas cultivadas, mientras que se confirmó la tendencia observada en la imagen de la fecha anterior de reducción del área del espejo de agua. El área ocupada por la cobertura de praderas emergentes continuó su progresivo aumento, mientras que la de vegetación emergente de ribera continuó exhibiendo un comportamiento fluctuante en relación con las imágenes de fechas anteriores.

Dos años después, en 1989, el área del espejo de agua continuaba su descenso progresivo, mientras que las áreas de vegetación emergente de ribera y de praderas emergentes presentaban crecimiento en las áreas ocupadas. El área de cultivos permaneció constante en esa fecha, comparada con la anterior imagen analizada. En marzo de 1991 el área de cultivos continuó presentando un área similar a la de las imágenes anteriores, mientras que el área de praderas emergentes continuó incrementando el área ocupada en la laguna. Para esa fecha, la tendencia de disminución del área del espejo de agua se revirtió y se observó un incremento de 0.7 km² con respecto al área discriminada en diciembre de 1989.

En octubre de 1991 se confirmó la recuperación del espejo de agua, al encontrarse un valor muy similar al de marzo del mismo año. Sin embargo, las áreas ocupadas por cultivos y praderas emergentes exhibieron aumentos de 0.4 y 0.3 km², respectivamente. El área de la vegetación emergente de ribera presentó una disminución de 0.9 km².

La siguiente imagen (4 de febrero de 2000) presenta una diferencia de tiempo de aproximadamente nueve años con respecto a la de octubre de 1991, por lo que

se observan cambios drásticos en la composición de las áreas del espejo de agua y las coberturas vegetales acuáticas discriminadas. Es así como el área ocupada por la vegetación emergente de ribera es la mayor de todas las analizadas, incluso por encima que la ocupada por el espejo de agua. Para esa fecha, el área del espejo de agua se redujo en 10.9 km², en comparación con la última imagen de 1991. De acuerdo con el análisis de las áreas, la cobertura de vegetación acuática flotante, que apareció por primera vez, fue la mayor responsable de la disminución del área del espejo de agua de la laguna para esa fecha.

En 2002 persistía la tendencia de disminución del área del espejo de agua a favor del aumento de todas las coberturas vegetales acuáticas consideradas, con excepción de la vegetación acuática flotante, que presentó una ligera disminución del área reportada en la imagen anterior. En noviembre de 2003, el área ocupada por el espejo de agua presentó una disminución de 2.3 km² con respecto a la imagen anterior, área que fue ocupada principalmente por la vegetación acuática flotante, que registró un incremento de 2.7 km². Las demás coberturas presentaron áreas similares a las discriminadas en la imagen de la fecha anterior.

La última imagen analizada, tomada en diciembre de 2003, muestra algunos cambios en las áreas de las coberturas consideradas. El área del espejo de agua presentó un ligero incremento de 0.3 km², mientras que la vegetación acuática flotante y la emergente de ribera se redujeron en 1.5 y 0.4 km², respectivamente. El área ocupada por cultivos permaneció prácticamente invariable con respecto a la información obtenida en la imagen anterior, mientras que la vegetación de praderas emergentes se incrementó en 1.4 km².

Variación multitemporal del espejo de agua y coberturas vegetales

A partir de la interpretación de la primera imagen satelital, tomada en diciembre de 1984, se determinó que el área del espejo de agua era de 19.8 km², lo cual correspondía al 62.5 % del área total de la laguna. En febrero del año 2003 el área del espejo de agua fue de 4.2 km², lo cual representa una disminución del 78.7 % del área libre de vegetación con respecto a lo

determinado para el año 1984. Esto significa que 15.6 km² de espejo de agua fueron cubiertos por vegetación en el periodo comprendido entre 1984 y 2003. En la figura 1 se observa cómo la disminución del espejo de agua ha estado asociada a un incremento de las coberturas correspondientes a praderas emergentes y vegetación acuática flotante.

En la secuencia de las interpretaciones (figura 1) se puede observar que los mayores cambios ocurrieron durante la década de los noventa. En la imagen tomada en febrero del 2000 se aprecia una extensa área de la laguna ocupada por vegetación acuática flotante y praderas emergentes, lo cual no se observaba con tanta intensidad en la imagen de octubre de 1991. Desde el punto de vista espacial, se observa que la aparición y expansión de la vegetación acuática se ha dado desde las orillas norte y sur de la laguna. Esto coincide, al norte, con el nacimiento del río Suárez o Saravita, que es el principal desagüe natural de la laguna. Al sur la expansión de la vegetación coincide con la desembocadura del principal afluente de la laguna, el río Ubaté, y con la construcción de varios canales que sirven para drenar hacia la laguna los excesos de aguas en las zonas agrícolas que la rodean.

En la interpretación de las imágenes se puede observar cómo el número de canales ha venido creciendo, especialmente al sur del cuerpo de agua. La construcción de estos canales seguramente ha contribuido a aumentar el flujo de nutrientes inorgánicos y residuos orgánicos (heces fecales animales) en la interface agua-sedimento hacia la laguna, lo cual mejoraría las condiciones para que se expanda la vegetación acuática e iría en detrimento del espejo de agua (CAR, 2000). El flujo de sedimentos también trae como consecuencia la colmatación de la laguna y la consecuente reducción de la profundidad. Esto se evidencia en la aparición y expansión de la vegetación denominada *praderas emergentes*, que se encuentra asociada con aguas someras (Clavijo-Awazacko y Amarillo-Suárez, 2013).

Durante el periodo de estudio también se pudo observar la aparición y consolidación de áreas cultivadas, especialmente en las riberas de los ríos Suárez y Ubaté. En particular, en el borde del río Ubaté se observa que áreas originalmente cubiertas con vegetación emergente de ribera (juncos) han sido desecadas y se han convertido en áreas cultivadas, principalmente con pastos. En 2003, las áreas

cultivadas correspondían al 5.4% de la laguna, es decir 173.08 hectáreas.

La figura 2 presenta la variación porcentual de las áreas de las coberturas consideradas en el presente trabajo, así como del espejo de agua. Desde 1984, la laguna se encuentra principalmente rodeada por juncos, cobertura que ha tenido una leve disminución (19.75%), básicamente para dar paso a áreas cultivadas y a praderas emergentes. Las áreas cultivadas, que comenzaron a aparecer en las imágenes de satélite en diciembre de 1987, han presentado un comportamiento estable, con un porcentaje promedio de 4.8% del área del polígono de la laguna considerado en el presente trabajo. El área de praderas emergentes presentó un promedio de cobertura de 14.4%, considerando todas las imágenes analizadas.

Esto confirma la reducción del espejo de agua, mientras que coberturas como las praderas emergentes o la vegetación acuática flotante han incrementado sus áreas de manera progresiva. El salto de información entre los años 1991 y 2000 hace que los aumentos o disminuciones de áreas sean visibles de manera explícita en la figura 3.

El análisis de correlaciones entre pares de coberturas mostró una correlación lineal positiva (P valor < 0.05) entre la vegetación acuática flotante y de praderas emergentes, lo cual sugiere que las áreas ocupadas por estos dos tipos de coberturas han venido creciendo de manera conjunta, aunque cada una de ellas a su tasa particular. Adicionalmente, se presentaron correlaciones positivas (P valor < 0.05) entre las áreas cultivadas y las coberturas de praderas emergentes y la vegetación acuática flotante.

En relación con el espejo de agua, se encontró una asociación lineal negativa (P valor < 0.05) de la vegetación acuática flotante y de praderas emergentes, lo cual indica que, durante el periodo de tiempo considerado, el área del espejo de agua disminuyó a favor del crecimiento del área ocupada para estas dos coberturas. No se evidenció mayor asociación entre la vegetación emergente de ribera y el espejo de agua.

Otra correlación lineal negativa observada tuvo lugar entre las áreas cultivadas y la vegetación emergente de ribera. Estas correlaciones son útiles

Figura 1. Mapas de coberturas del área de la laguna de Fúquene durante el periodo comprendido entre 1984 y 2003. Los mapas corresponden a cada una de las fechas en las que fue adquirida la imagen satelital

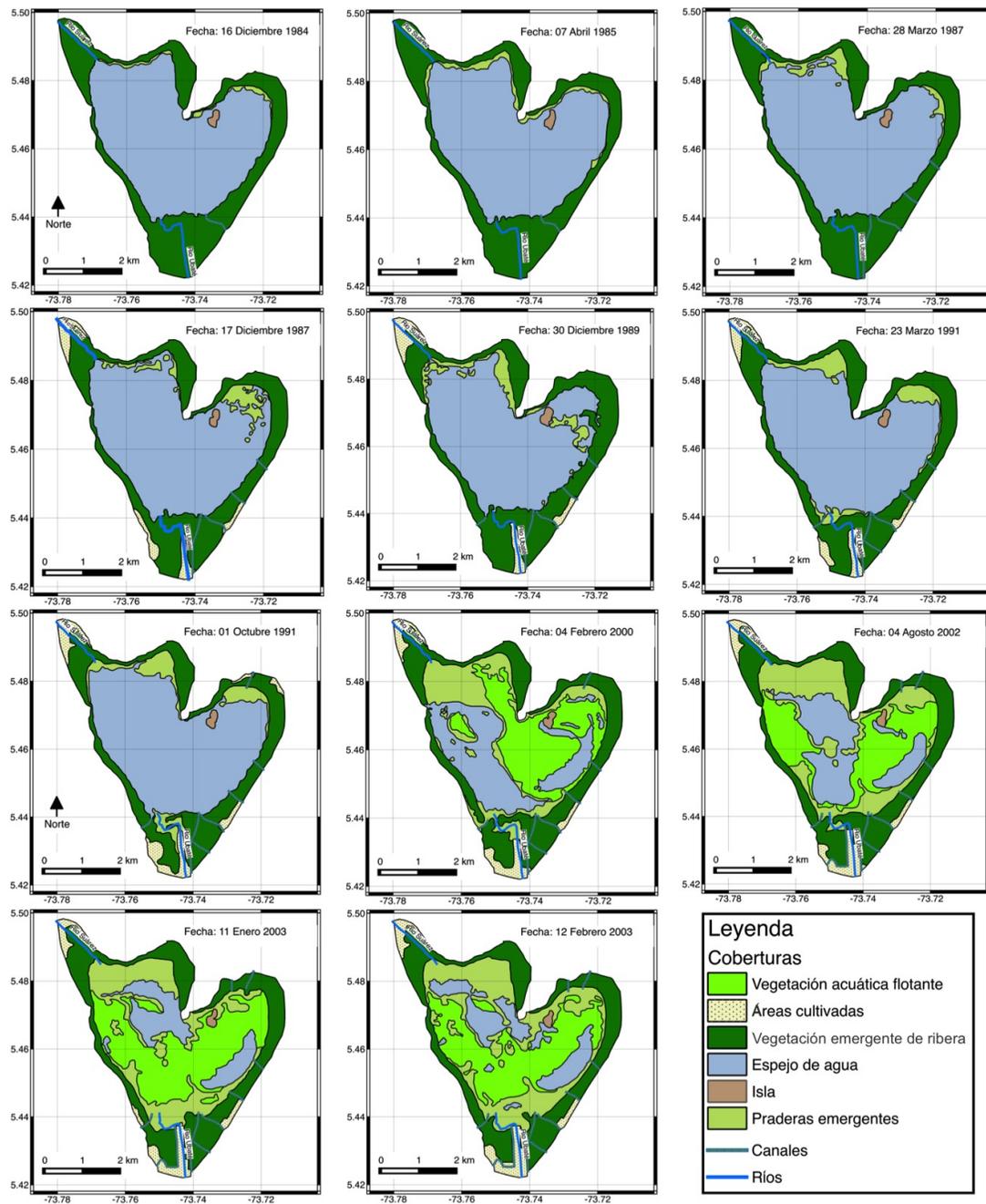


Figura 2. Dinámica temporal de porcentajes de ocupación de las coberturas vegetales acuáticas y del espejo de agua de la laguna de Fúquene correspondiente al periodo 1984-2003

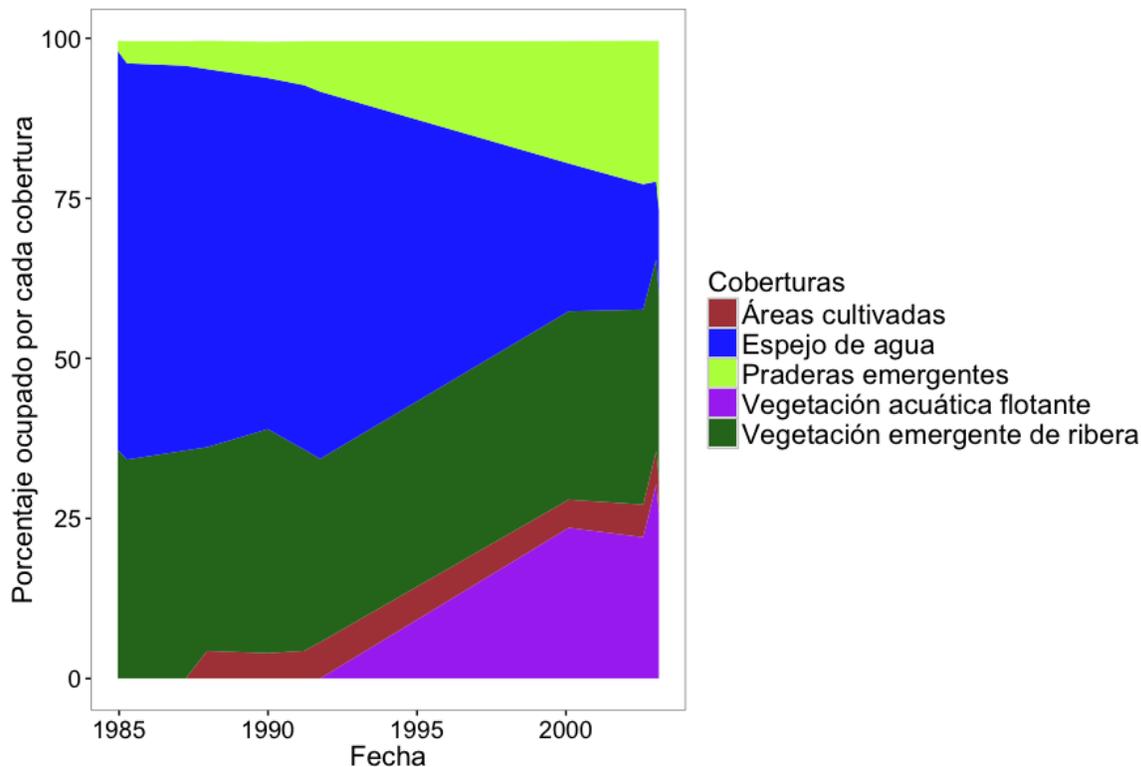


Figura 3. Representación gráfica de la tabla de correlaciones lineales de Spearman correspondiente a las coberturas acuáticas vegetales y al espejo de agua de la laguna de Fúquene

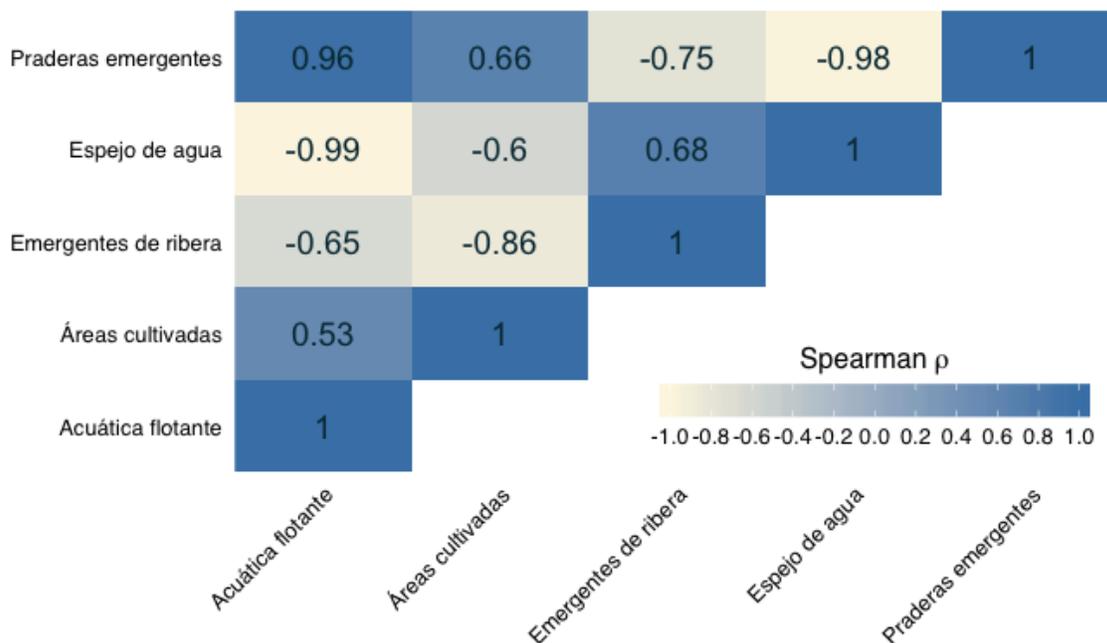
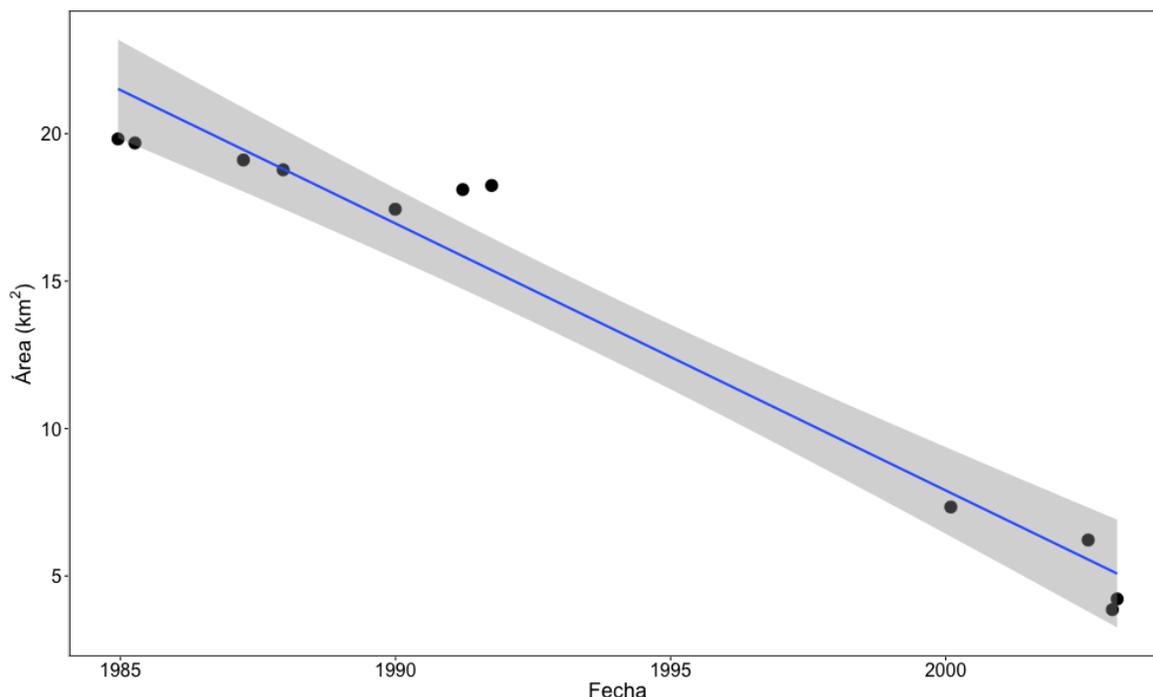


Figura 4. Regresión lineal del área del espejo de agua de la laguna de Fúquene en función del tiempo. La figura incluye los valores observados empleados en la regresión, así como el intervalo de confianza de la regresión



para confirmar los patrones de crecimiento de las diferentes coberturas; no obstante, es necesario que se analicen en función de la información disponible. Las imágenes analizadas presentan un vacío de información del año 1991 al 2000, en una ventana de tiempo total de aproximadamente veinte años. Esto hace que en la parte central de la ventana de tiempo no se tenga información del comportamiento de las coberturas, de tal forma que se presentan cambios abruptos en los resultados entre la última imagen analizada, de 1991, y la del año 2000. Esta condición favorece el aumento de los valores de correlación, ya sea en sentido positivo o negativo, dependiendo del caso. Si fuera posible contar con información de mayor resolución espacial podrían establecerse de manera más adecuada las tendencias de crecimiento tanto de las coberturas como del espejo de agua.

El resultado del análisis de regresión del área del espejo del agua en función del tiempo se presenta en la figura 4, donde puede confirmarse la disminución progresiva del espejo de agua en el periodo de tiempo considerado. El valor de la pendiente obtenido en el modelo fue de -0.88 , valor que indica que cada año la laguna ha venido perdiendo 0.88 km^2 de espejo de agua. Si en la actualidad, a partir de los datos obtenidos

en los años anteriores, se realizara una prospección del área del espejo de agua que en este momento debería existir, daría como resultado que ya se habría perdido en su totalidad dicha cobertura. Sin embargo, diferentes factores, como la ola invernal causada por el fenómeno de La Niña, así como las acciones que se han emprendido en el último tiempo para recuperar la laguna, han impedido que esto ocurra.

El trabajo de Bustamante (2010) predijo que en el año 2035 desaparecería el espejo de agua como consecuencia del crecimiento del buchón de agua. A pesar de las limitaciones espaciales y temporales del modelo calibrado en este trabajo, así como la tendencia que se presenta a partir de la interpretación de las imágenes satelitales del presente, es clara la necesidad de evaluar las acciones correctivas que se han venido tomando en torno a la recuperación de la laguna de Fúquene, con el fin de evitar que efectivamente se llegue a la desaparición del espejo de agua, tal como ocurrió con la laguna de Palacio, que ya no es navegable, y cuyos peces murieron por desoxigenación (CAR, 2000).

Entre las causas que han favorecido la alteración de los patrones de regulación de agua están los distritos de

riego y drenaje. En la laguna de Fúquene ha sido notorio el efecto que ha tenido la construcción de drenajes desde zonas agrícolas hacia la laguna. Esto, asociado a antiguas políticas de desecación, ha ocasionado que Fúquene sea una laguna somera o panda, y esto incrementa su vulnerabilidad frente a fenómenos con la descarga de sedimentos y alteraciones climáticas (Rodríguez-Briceño, 2012). Si la laguna tuviera un mayor espejo de agua y mayor profundidad, y se disminuyera el aporte de sedimentos, el cuerpo de agua podría amortiguar cambios, como el incremento de la temperatura, lo cual favorecería su recuperación (Vidal, Delgado & Andrade, 2012).

Las variaciones en los tipos de coberturas en la laguna traen consigo variaciones en las comunidades de otros organismos. Clavijo-Awazacko & Amarillo-Suárez (2013) caracterizaron y compararon la diversidad de artrópodos terrestres asociada a las comunidades vegetales de algunos humedales de Bogotá. En los resultados de ese trabajo se sugiere la existencia de una relación entre el grado de perturbación de cada humedal (en términos de las comunidades vegetales presentes) y la diversidad y estructura de las comunidades de insectos (Clavijo-Awazacko & Amarillo-Suárez, 2013).

Adicionalmente, los cambios en las coberturas vegetales acuáticas no son la única evidencia de la perturbación de la biodiversidad en la laguna. En el caso específico de Fúquene ya se ha documentado una disminución en las poblaciones de *Eremophilus mutisii* (capitán de la sabana) debido a procesos de eutrofización de la laguna (Rodríguez *et al.* 2005; Espitia-Contreras, 2013). Igualmente, se han observado lesiones en esta especie, como úlceras cutáneas asociadas a bacterias *Pseudomonas* spp. y *Escherichia coli* (Rodríguez, Montaña, Rodríguez, 2005), que son comunes en heces fecales animales como las descargadas a la laguna.

Por esta razón, aunque en los últimos años se ha trabajado en la recuperación y conservación de la laguna, usando como principal estrategia el dragado de sedimentos, si no se corrigen problemas como la descarga de sedimentos desde las fuentes al río Ubaté y a los canales que desembocan en la laguna, estos terminarán siendo esfuerzos aislados que no tendrán un efecto significativo para solucionar el problema.

CONCLUSIONES

La laguna de Fúquene presentó un proceso drástico de pérdida de su espejo de agua durante el periodo comprendido entre 1984 y 2003: pasó de tener 19.8 km² de espejo de agua a solo 4.2 km². El espejo de agua ha sido reemplazado por vegetación acuática. Algunas áreas en las orillas de la laguna han sido desecadas e incorporadas a actividades agrícolas.

Los procesos de enriquecimiento de nutrientes, descarga de materia orgánica y sedimentos se ven reflejados en la aparición y expansión de diferentes tipos de coberturas acuáticas vegetales, como las flotantes y las emergentes. La presencia de estas coberturas fue claramente identificada en las imágenes de satélite consideradas en el presente estudio.

Las principales causas asociadas a las variaciones observadas en el espejo de agua y las coberturas vegetales acuáticas son la descarga de sedimentos orgánicos e inorgánicos desde los centros poblados y áreas agrícolas aguas arriba de la laguna. También, aunque en menor medida, la desecación de áreas de la laguna para ser aprovechadas con fines agrícolas. Las principales consecuencias relacionadas son la alteración de comunidades vegetales y animales, específicamente, la expansión de plantas acuáticas en el área de la laguna y la modificación de las comunidades de animales asociadas a este tipo de vegetación.

La disponibilidad restringida de imágenes de satélite no permitió establecer la tendencia actual de las áreas del espejo de agua y de las coberturas vegetales. El análisis realizado hasta el año 2003 no permite evaluar el efecto de las estrategias de restauración y conservación de la laguna que se han puesto en marcha durante los últimos años. El acceso a estas imágenes depende de la oferta que liberen los proveedores de dichas imágenes y de contar con los recursos necesarios para adquirirlas, en caso de que las imágenes tengan algún costo.

Aun cuando la desecación de la laguna y la pérdida del espejo de agua es un fenómeno plenamente descrito y comprendido en el caso de la laguna de Fúquene, el uso de herramientas de sensorización remota y de sistemas de información geográfica permitió una cuantificación bastante precisa de los cambios espaciales y temporales que han presentado

las coberturas de la laguna a lo largo del periodo de tiempo considerado.

La técnica de clasificación de coberturas empleada en el presente trabajo y la interpretación visual de imágenes fueron suficientes para realizar la discriminación de las coberturas incluidas. Las imágenes a falso color construidas a partir de la información contenida en las bandas de las imágenes satelitales presentaron el suficiente contraste para que la interpretación visual fuera adecuada con miras a una correcta clasificación.

REFERENCIAS

- Aksoy, E. & Özsoy, G. (2002). Investigation of multi-temporal land use/cover and shoreline changes of the Uluabat Lake Ramsar site using RS and GIS. International Conference in Sustainable Land Use and Management, Çanakkale, Turkey.
- Alberti, M., Booth, D., Hill, K., Coburn, B., Avolio, C., Coe, S. & Spirandelli, D. (2007). The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: An empirical analysis in Puget lowland sub-basins. *Landscape and Urban Planning*, 80, 345-361.
- Alexandridis, T. K., Takavakoglou, V., Crisman, T. L. & Zalidis, G. C. (2007). Remote sensing and GIS techniques for selecting a sustainable scenario for Lake Koronia, Greece. *Environmental Management*, 39, 278-290.
- Alsdorf, D. E., Rodríguez, E. & Lettenmaier, D. P. (2007). Measuring surface water from space. *Reviews of Geophysics*, 45(2), doi: <http://dx.doi.org/10.1029/2006RG000197>
- Bastawesy, M. A., Khalaf, F. I., & Arafat, S. M. (2008). The use of remote sensing and GIS for the estimation of water loss from Tushka lakes, southwestern desert, Egypt. *Journal of African Earth Science*, 52, 73-80.
- Bustamante, S. (2010). *Modelado de especies invasoras, caso de estudio: pérdida del espejo de agua en la laguna de Fúquene por invasión del buchón (Eichornia crassipes)* (tesis de maestría). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Camargo, J. A., & Alonso, A. (2006). Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. *Environment International*, 32, 831-849.
- CAR (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca). (2000). *Fúquene: el lecho de la zorra*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, Bogotá, Colombia.
- Clavijo-Awazacko, H. & Amarillo-Suárez, Á. (2013). Variación taxonómica y funcional en la artropofauna asociada a comunidades vegetales en humedales altoandinos (Colombia). *Revista Colombiana de Entomología*, 39(1), 155.
- Espitia-Contreras, J. P. (2013). Análisis de la aplicación del enfoque ecosistémico en la estrategia de manejo ambiental de la cuenca Ubaté-Suárez implementada en la laguna de Fúquene durante el período 2007-2009 (tesis de pregrado). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- Giardino, C., Bresciani, M., Villa, P. & Martinelli, A. (2010). Application of remote sensing in water resource management: The case study of Lake Trasimeno, Italy. *Water Resources Management*, 24, 3885-3899.
- GRASS Development Team (2012). *Geographic resources analysis support system (GRASS 6) programmer's manual*. Open Source Geospatial Foundation Project.
- Hernández-Cornejo, R., Koedam, N., Ruiz-Luna, A., Troell, M. & Dahdouh-Guebas, F. (2005). Remote sensing and ethnobotanical assessment of the mangrove forest changes in the Navachiste-San Ignacio-Macapule lagoon complex, Sinaloa, Mexico. *Ecology and Society*, 10(1), 16.
- Khan, F. A., Naushin, F., Rehman, F., Masoodi, A., Irfan, M., Hashmi, F., & Ansari, A. A. (2014). Eutrophication: Global scenario and local threat to dynamics of aquatic ecosystems. En A. A. Ansari y S. S. Gill, Sarvajeet (eds.), *Eutrophication: Causes, consequences and control*, pp. 17-27. Springer Netherlands.
- Melo, L. H. & Camacho, M. A. (2005). *Interpretación visual de imágenes de sensores remotos y su*

- aplicación en levantamientos de cobertura física y uso de la tierra*. Bogotá: IGAC.
- Navarro-Ortega, A., Acuña, V., Bellin, A., Burek, P., Cassiani, G., Choukr-Allah, R., Dolédec, S., Elozegi, A., Ferrari, F., Ginebreda, A., & Grathwohl, P. (2015). Managing the effects of multiple stressors on aquatic ecosystems under water scarcity: The Globaqua Project. *Science of the Total Environment*, 503, 3-9.
- Omar, W. A., Zaghoul, K. H., Abdel-Khalek, A. A., & Abo-Hegab, S. (2013). Risk assessment and toxic effects of metal pollution in two cultured and wild fish species from highly degraded aquatic habitats. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 65(4), 753-764.
- Papastergiadou, E. S., Retalis, A., Apostolakis, A., & Georgiadis, Th. (2008). Environmental monitoring of spatio-temporal changes using remote sensing and GIS in a Mediterranean wetland of Northern Greece. *Water Resources Management*, 22, 579-594.
- Parra, A., & Hernández, F. L. (2010). Identificación y delimitación de humedales lénticos en el valle alto del río Cauca mediante el procesamiento digital de imágenes de satélite. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 9, 77-88.
- Pathirana, S., Perera, K., & Sanaa, H. (2015). Impact of climate change on water resources in MENA countries: An assessment of temporal changes of land cover/land use and water resources using multi-temporal MODIS and Landsat data and GIS techniques. En *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing (ISRS 2015)*. University of Southern, Queensland.
- Pernett, X. (2006). *Proceso para cuantificar e interpretar las características físicas y químicas del suelo que reglan su función en relación con el agua, el almacenamiento de nutrientes y la infiltración (caso de la cuenca de la laguna de Fúquene)*. Lima: Centro Internacional de la Papa, LuzAzul Gráfica.
- QGIS Development Team (2009). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. Disponible en: <http://qgis.osgeo.org>
- R Core Team. (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible en: <http://www.R-project.org/>
- Rondón, G. A. & Vergara, K. V. (2012). Estudio espacial-temporal 1962-2011 de las lagunas Sayhuacochoa, Raurac, Ampatocochoa y Tutayoc, Huancavelica, Perú. *Revista Geográfica*, 151, 151-177.
- Rodríguez-Briceño, L. S. (2012). *Plan de Desarrollo municipio de Fúquene 2012-2015*. Fúquene: Concejo Municipal de Fúquene.
- Rodríguez, A., Montaña, E., & Rodríguez, J. (2005). Evaluación preliminar de las patologías cutáneas asociadas con la aclimatación en cautiverio del "capitán de la sabana", *Eremophilus mutisii*. *Acta Biológica Colombiana*, 10(2), 123-128.
- Sawaya, K. E., Olmanson, L. G., Heinert, N. J., Brezonik, P. L., & Bauer, M. E. (2003). Extending satellite remote sensing to local scales: Land and water resource monitoring using high-resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*, 88(1), pp. 144-156.
- Sexton, J. O., Urban, D. L., Donohue, M. J., & Song, C. (2013). Long-term land cover dynamics by multi-temporal classification across the Landsat-5 record. *Remote Sensing of Environment*, 128, 246-258.
- Tarassenko, T. V. (2013). Interannual variations in the areas of thermokarst lakes in Central Yakutia. *Water Resources*, 40, 111-119.
- Vidal, L.F., Delgado, J. & Andrade, G.I. (2012). *Laguna de Fúquene: entender la crisis, visualizar el futuro y acordar el camino*. Gestión de Humedales 2: 17-26.
- Vidal, L. F. & Pérez, G. I. A. (2007). *Fúquene, Cucunubá y Palacio: conservación de la biodiversidad y manejo sostenible de un ecosistema lagunar andino*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Were, K. O., Dick, Ø. B. & Singh, B. R. (2013). Remotely sensing the spatial and temporal land cover changes in Eastern Mau forest reserve and Lake Nakuru drainage basin, Kenya. *Applied Geography*, 41, 75-86.

Woodward, G., Gessner, M. O., Giller, P. S., Gulis, V., Hladyz, S., Lecerf, A., Malmqvist, B., McKie, B. G., Tiegs, S. D., Cariss, H., & Dobson, M. (2012). Continental-scale effects of nutrient pollution on stream ecosystem functioning. *Science*, 336(6087), 1438-1440.

Gráficos difusos versus gráficos tradicionales para el control de procesos por atributos

Vivian Lorena Chud Pantoja,^{1*} Nathaly Martínez Escobar² Juan Carlos Osorio Gómez³

¹ Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Departamento Gestión de Tecnología, Ingeniería de Operaciones y Medio Ambiente, Grupo de Investigación IDEAS, calle 5 n.º 62-00. Santiago de Cali, Colombia.

* Autor para correspondencia: vivianchud@usc.edu.co
<http://orcid.org/0000-0001-8842-637X>

² Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Departamento Gestión de Tecnología, Ingeniería de Operaciones y Medio Ambiente, calle 5 n.º 62-00. Santiago de Cali, Colombia.

<http://orcid.org/0000-0001-8842-637X>

³ Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Industrial, Grupo de Investigación en Logística y Producción, calle 13 n.º 100-00. Santiago de Cali, Colombia.

<https://orcid.org/0000-0001-5625-5609>

RESUMEN

Los gráficos de control son una buena herramienta para controlar procesos. Han sido ampliamente utilizados —y aún ahora se utilizan— en la mayoría de los procesos manufactureros. Sin embargo, se han presentado propuestas orientadas a mejorar el desempeño de los mismos, principalmente en los aspectos referentes a la incertidumbre y ambigüedad existente en los datos. En este sentido, los gráficos de control difusos son una alternativa valiosa para mejorar el desempeño de los gráficos tradicionales. Se presenta, entonces, una comparación de los gráficos de control Shewhart (tradicionales) y los gráficos de control difusos por atributos, con el objetivo de establecer las similitudes y diferencias existentes entre las dos metodologías. De esta manera, se desarrolla un ejemplo numérico de un gráfico tradicional *c* y gráficos difusos construidos a partir de las siguientes técnicas de transformación: moda difusa, mediana difusa, rango medio difuso y enfoque difuso directo. Para realizar una comparación se utilizaron las reglas de evaluación de patrones de comportamiento no natural en un gráfico de control. A partir de los resultados de la comparación realizada en esta investigación se concluye que al utilizar las reglas de evaluación en ambos gráficos con los mismos datos no se obtienen diferencias en los resultados.

Palabras clave: gráficos de control, control de proceso, datos difusos, gráficos de control difusos.

Diffuse vs. Traditional Graphics for Control of Processes by Attributes

Citation: Chud Pantoja, V. L. & Martínez Escobar, N. & Osorio Gómez J.C. (2017). Gráficos difusos versus gráficos tradicionales para el control de procesos por atributos. *Mutis* 7(1), 34-47, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1189>

Received: Abril 12, 2016. **Accepted:** Febrero 15, 2017. **Published on line:** Mayo 1, 2017.

Copyright: ©2016 Chud Pantoja, V. L. & Martínez Escobar, N. & Osorio Gómez J. C. This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

ABSTRACT

Control charts are the main tool in the process control. They have been widely used and are still used in most manufacturing processes. However, proposals have emerged that seek to improve their performance, mainly about topics which involve the vagueness and uncertainty of the data. In this sense, fuzzy control charts are an important alternative for improve the performance of control charts. We present a



comparison of Shewhart control charts (traditional) and fuzzy control charts for attributes with the aim of establishing similarities and differences between the two methodologies. We develop a numerical example for a c traditional chart and fuzzy charts these built with different methods: Fuzzy mode, fuzzy median and fuzzy midrange and the direct fuzzy approach, then we do the comparison used the rules for evaluation of patterns of not natural behavior in the control charts. From the results of the comparison carried out in this research, it is concluded that when using the evaluation rules for both graphs with the data used, no differences are obtained in the results.

Keywords: Control charts, process control, fuzzy data, fuzzy control charts.

INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN DE LA LITERATURA

Si bien las técnicas de control de proceso han venido desarrollándose desde principios del siglo pasado, las organizaciones actuales requieren controlar sus procesos para garantizar la calidad de sus resultados. De ahí que el control estadístico de proceso (SPC, por sus siglas en inglés) sea una actividad vigente en la industria moderna. Tal como afirman Evans y Lindsay

(2005), el SPC se apoya en las gráficas de control debido a que son las herramientas básicas de mejora de calidad.

Los gráficos de control son ampliamente usados en la práctica de producción, en procesos en los requerimientos de calidad y los datos de calidad son definidos usualmente con precisión (Hryniewicz, 2007).

Las variaciones de un proceso pueden ser aleatorias (naturales o comunes, y son inherentes al proceso), y especiales (o asignables), en las que las variaciones son irregulares. Lo ideal es que solo existan causas aleatorias en el proceso, de modo que se pueda decir que este se encuentra bajo control. Como afirman Gryna, Chua y Defeo (2007), “un proceso que opera sin causas especiales de variación está en un estado de control estadístico”; de allí que uno de los principales objetivos de un gráfico de control sea detectar las causas especiales (o asignables) de variación en un proceso, mediante el análisis de datos (Gryna *et al.*, 2007). Es necesario analizar el proceso cuando la variación excede los límites de control, pues esto indica que existen causas especiales en el proceso. Tanto Gryna *et al.* (2007) como Evans y Lindsay (2005) presentan algunos pasos generales para realizar los gráficos de control, los cuales se tomaron como base para elaborar la tabla 1.

Tabla 1. Pasos requeridos para el desarrollo y utilización de un gráfico de control

1. Elegir las características que se van a diagramar	<ul style="list-style-type: none"> • Escoger la variable o atributo que se va a medir • Determinar la base, el tamaño y la frecuencia de la muestra
2. Elegir el tipo de gráfico de control	<ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar entre los tipos de gráficos de control tradicionales existentes los que se van a utilizar
3. Determinar los límites de control de prueba	<ul style="list-style-type: none"> • Decidir sobre la línea central que se usará y la base para el cálculo de los límites. La línea central puede ser el promedio de los datos anteriores o un promedio deseado, en caso de que se esté construyendo la información del proceso por primera vez
4. Elegir el “subgrupo racional” (o muestra)	<ul style="list-style-type: none"> • De acuerdo con las características particulares del proceso
5. Recolectar los datos	<ul style="list-style-type: none"> • Registrar los datos • Calcular estadísticas relevantes: promedios, rangos, proporciones, etc. • Trazar los datos estadísticos sobre la gráfica
6. Calcular los límites de control	<ul style="list-style-type: none"> • Dibujar la línea central (promedio del proceso) sobre la gráfica • Calcular los límites de control superior e inferior
7. Analizar e interpretar	<ul style="list-style-type: none"> • Investigar la gráfica para buscar si hay falta de control • Eliminar puntos fuera de control, si es necesario • Volver a calcular los límites de control, si es necesario
8. Utilizar como herramienta para la solución de los problemas	<ul style="list-style-type: none"> • Continuar con la recolección de datos y con el trazado • Identificar situaciones fuera de control y tomar acciones correctivas

Fuente: adaptado de Gryna *et al.* (2007) y Evans y Lindsay (2005)

Los gráficos de control tradicionales se dividen en dos grandes grupos: gráficos de control por variables y por atributos. Los gráficos de control por atributos están basados en la observación de la presencia o ausencia de una determinada característica, o de cualquier tipo de defecto en el producto; es decir, en esta clase de gráficos se supone una clasificación dicotómica para la muestra (bueno o malo, conforme o no conforme, u otro). Asimismo, son utilizados para contrastar características cualitativas. Los gráficos de control por atributos se clasifican en

- Gráfico p : proporción de defectuosos o fracciones no conformes
- Gráfico np : número de defectuosos
- Gráfico c : número de defectos
- Gráfico u : defectos por unidad).

En este documento se desarrollará el gráfico de control c .

Por otra parte, dado que el mundo es impreciso, que los actos de los hombres y las relaciones que establecen entre sí están afectados de vaguedad, la realidad no puede estudiarse en términos absolutos con técnicas aplicables a situaciones ciertas ni aleatorias, determinando un *pertenece* o *no pertenece*, como en la teoría de conjuntos clásicos (Lazzari, Machado y Pérez; 1998); por ello se ha desarrollado la lógica difusa.

Con el fin de mejorar los resultados derivados del control de procesos e incluir en el análisis los datos vagos e imprecisos, se proponen los gráficos de control difusos, que introducen elementos de la lógica difusa en los gráficos tradicionales, o de Shewhart. La lógica difusa permite construir una estructura matemática con la cual es posible manipular datos inciertos o vagos, para los cuales la pertenencia a un conjunto tiene grados entre el *pertenece* y *no pertenece*, entre *verdadero* y *falso*; en otras palabras, esta puede tomar un valor real del intervalo $[0,1]$. Esta lógica busca describir y formalizar la realidad empleando modelos flexibles que interpreten el comportamiento humano y las relaciones entre los hombres (Lazzari *et al.*, 1998). La lógica difusa permite expresar el conocimiento de forma más natural, lo cual hace que muchos problemas de ingeniería y de toma de decisiones se simplifiquen significativamente (Briceño, 2004).

Mediante la unión de los gráficos de control tradicionales y la lógica difusa se obtienen los gráficos de control difusos. Estos también se clasifican en gráficos por variables y por atributos (Gülbay y Kahraman, 2007).

En los gráficos de control, los juicios clásicos se basan en clasificaciones binarias como “en control” o “fuera de control”. En los gráficos de control difusos, las decisiones intermedias, tales como “más bien en control” o “más bien fuera de control”, pueden ser manipuladas con el fin de convertir términos lingüísticos, que en los gráficos de control clásicos no pueden ser aplicados fácilmente (Noori, Bagherpour y Zareei, 2008).

Si bien el tema de los gráficos difusos es mucho más reciente que el de los gráficos tradicionales, en la literatura hay una cantidad significativa de trabajos, de los cuales es importante mencionar los siguientes:

Cheng (2005) desarrolla la construcción de gráficos de control con números difusos para procesos cuyos resultados sean tasas de calidad obtenidas a partir de juicios subjetivos de expertos. Por su parte, Hsieh (2005) realizó un análisis para la construcción de gráficos de control difusos por variables teniendo en cuenta números difusos triangulares y trapezoidales, tanto simétricos como asimétricos.

Con respecto a gráficos por variables, se pueden mencionar los trabajos de Senturk y Erginel (2009), quienes presentan una propuesta para la construcción de gráficos de control difusos X-R y X-S utilizando la técnica de los α cortes. Ellos concluyen que con esta técnica la flexibilidad de los límites de control tradicionales se incrementa, y con ella, la efectividad de los gráficos para el control del proceso. Por otra parte, Faraz y Shapiro (2010) desarrollan una propuesta de gráfico de control X-S² que, mediante la técnica fuzzy, busca explicar la vaguedad existente en las observaciones. Ellos realizan los gráficos utilizando los diferentes métodos de transformación: rango medio fuzzy, media fuzzy, mediana fuzzy y moda fuzzy. Asimismo, Shu y Wu (2011) proponen un gráfico de control X-R controlar el promedio del proceso y su variación ante la presencia de datos difusos.

Con respecto a gráficos por atributos, cabe mencionar el trabajo de Amirzadeh, Mashinchi y Parchami (2009), quienes proponen un gráfico de control difuso p para controlar un proceso, asumiendo como característica difusa p el grado de no conformidad de la variable, con lo cual logran disminuir el error tipo II en el proceso.

En los trabajos anteriores se usaban técnicas de defuzzyficación para el manejo final de los datos difusos. Sin embargo, Gülbay y Kahraman (2007) presentan un enfoque difuso directo (DFA, por sus siglas en inglés) para desarrollar los gráficos de control difusos por atributos. A diferencia de los métodos de transformación difusa utilizados, este enfoque no realiza transformación de los datos difusos; de esta manera previene la pérdida de información incluida en las muestras. Estos autores también presentan una propuesta para utilizar las reglas de evaluación de gráficos de control difusos por atributos que permiten evaluar patrones no naturales con base en las reglas de evaluación de gráficos de control tradicionales, definidas usando las probabilidades de eventos difusos. Estas se pueden aplicar con los resultados del DFA (Gülbay y Kahraman, 2006).

Otros trabajos importantes que merecen mención son el de Demirli y Vijayakumar (2010), quienes desarrollaron un sistema de inferencia fuzzy para la identificación de las causas a las que se las puede responsabilizar de variaciones cuando el proceso se encuentra fuera de control. Alaeddini, Ghazanfari y Nayeri (2009) proponen un sistema híbrido que reúne elementos difusos y elementos estadísticos (análisis de *clusters*) para la identificación del momento real en el cual el proceso sufre un cambio (no cuando es detectado por el gráfico de control). En esta misma línea, y buscando refinar más el proceso, Zarandi y Alaeddini (2010) proponen una metodología similar, pero solamente para gráficos de control con muestras variables.

Finalmente, se pueden encontrar trabajos relacionados con el análisis de capacidad de proceso, como el de Kaya y Kahraman (2011a), en el que proponen el análisis de capacidad de proceso a partir de la construcción de los gráficos de control difusos, específicamente de un gráfico X-R, tanto con números triangulares como trapezoidales. Asimismo, ellos plantean una propuesta adicional para el cálculo de la capacidad del proceso cuando los límites de tolerancia no son simétricos (Kaya y Kahraman, 2011b).

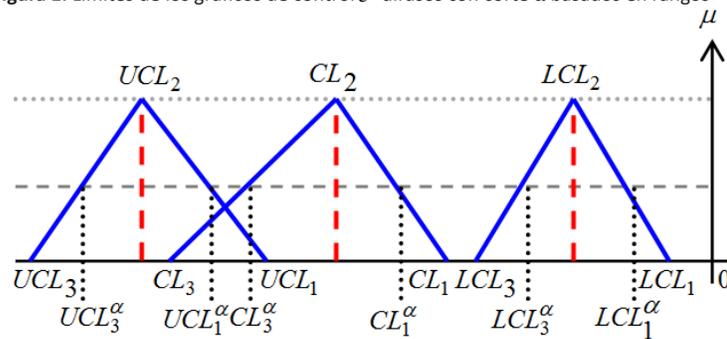
En este artículo se realiza una comparación de los gráficos de control tradicionales y los gráficos de control difusos por atributos utilizando reglas de evaluación de patrones de comportamiento no naturales, que permiten establecer similitudes y diferencias en cuanto a su aplicación en el control de procesos. Inicialmente se presenta la definición de *gráficos de con-*

trol difusos, y se incluye su clasificación e interpretación. Posteriormente se detallan las reglas de evaluación para ambos tipos de gráficos. Luego se presenta el ejemplo sobre el que se aplica la medición del desempeño de los gráficos de control tradicionales y los difusos en la construcción de un gráfico por atributos tipo c. Seguidamente se exponen los resultados y, finalmente, las conclusiones.

GRÁFICOS DE CONTROL DIFUSOS

Los gráficos de control difusos son herramientas que tienen la capacidad de tratar datos vagos, inciertos y con información incompleta. Al igual que los gráficos de control tradicionales, los difusos cuentan con una línea central (\tilde{CL}) y límites de control superior ($U\tilde{CL}$) e inferior ($L\tilde{CL}$). La diferencia es que estos son expresados por números difusos. Un número difuso puede ser triangular o trapezoidal, simétrico o asimétrico, representado por (a, b, d) - (a, c, d) y (a, b, c, d) , respectivamente. En Lazzari *et al.* (1988) se establece que se denomina *número difuso* al subconjunto borroso de números reales, convexo y normal; este se puede definir en cualquier conjunto referencial totalmente ordenado, como, por ejemplo, R (números reales), Z (números enteros), N (números naturales). Los números difusos pueden ser trapezoidales o triangulares. Un número difuso trapezoidal (\bar{N}) está definido por cuatro números, $a \leq b \leq c \leq d$, donde el gráfico de $y = \bar{N}(x)$ es un trapecoide con la base del intervalo $[a, d]$ y $\bar{N}(x) = 1$ para $b \leq x \leq c$ (Csutora y Buckley, 2001); $y = \bar{N}(x)$ es la función de pertenencia. Puede ser simétrico, si $b - a = d - c$, y asimétrico: $(b - a) - (d - c) \neq 0$. Se le denomina *número difuso triangular* a todo número difuso real, continuo, cuya función de pertenencia determina con el eje horizontal un triángulo. Este queda determinado por tres números reales (a, b, c) , tales que $(a \leq b \leq c)$. Puede ser asimétrico si $(b - a) - (c - b) \neq 0$, y simétrico si $(b - a) = (c - b)$. Los números difusos triangulares simétricos (STFNs) se denotan por $\tilde{x}_i = (a_i - d, a_i, a_i + d)$, según Hsieh (2005), y se pueden representar como en la figura 1.

Figura 1: Límites de los gráficos de control \tilde{c} difusos con corte α basados en rangos



La línea central y los límites de control para un gráfico de control difuso se calculan de la siguiente manera:

$$\tilde{CL} = \left[\sum_{j=1}^m \frac{a_j}{m}, \sum_{j=1}^m \frac{b_j}{m}, \sum_{j=1}^m \frac{c_j}{m}, \sum_{j=1}^m \frac{d_j}{m} \right] = (\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}) = (CL_1, CL_2, CL_3, CL_4) \quad (1)$$

$$L\tilde{CL} = \tilde{CL} - 3\sqrt{\tilde{CL}} = (LCL_1, LCL_2, LCL_3, LCL_4) \quad (2)$$

$$U\tilde{CL} = \tilde{CL} + 3\sqrt{\tilde{CL}} = (UCL_1, UCL_2, UCL_3, UCL_4) \quad (3)$$

TÉCNICAS DE TRANSFORMACIÓN FUZZY

Existen cuatro técnicas de transformación difusa, que son similares a la medida de tendencia central usada por la estadística descriptiva: rango medio difuso de nivel α , mediana difusa, promedio difuso y moda difusa (Gülbay y Kahraman, 2007). Adicionalmente, se plantea el método de enfoque difuso directo (DFA) (Gülbay y Kahraman, 2006).

Rango medio difuso de nivel α

El rango medio difuso de nivel α : f_{mr}^α para muestras triangulares, se define como el punto medio de los finales de los cortes de nivel α . Un corte de nivel α (A^α) es un conjunto no difuso que comprende todos los elementos en los cuales la función de pertenencia es $\geq \alpha$. Si a^α y b^α son los puntos finales de A^α , entonces; $f_{mr}^\alpha = (1/2)(a^\alpha + b^\alpha)$, donde $a^\alpha = a + \alpha(b-a)$ y $c^\alpha = c - \alpha(c-b)$. El rango medio difuso de nivel α de una muestra j , S_{mrj}^α se determina por:

$$S_{mrj}^\alpha = ((a_j + c_j) + \alpha[(b_j - a_j) - (c_j - b_j)]) / 2 \quad (4)$$

La moda difusa es un caso del rango medio difuso de nivel α cuando $\alpha = 1$.

Moda difusa

La moda difusa de un conjunto difuso f es el valor de la variable base, X , donde la función de pertenencia es igual a 1. Esto puede expresarse como

$$f_{\text{mod}} = \left\{ x \in X \mid \mu_f(x) = 1 \right\} \quad (5)$$

Mediana difusa

La mediana difusa de nivel α , f_{med}^α es el punto que divide la función de pertenencia de un conjunto difuso en dos regiones iguales en el nivel α .

Enfoque difuso directo (DFA [direct fuzzy approach])

En este enfoque, los datos lingüísticos no se transforman en valores representativos mediante métodos de transformación difusa, con el fin de guardar propiedades representativas de las muestras difusas (Gülbay y Kahraman, 2007). Tanto las muestras como los límites de control están representados y operados como números difusos. Los límites de control difusos de nivel α utilizados en este enfoque se calculan tal como se presenta en las siguientes ecuaciones:

$$\tilde{C}L^\alpha = (\bar{a}^\alpha, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}^\alpha) = (CL^\alpha_1, CL_2, CL_3, CL^\alpha_4) \quad (6)$$

$$L\tilde{C}L^\alpha = \tilde{C}L^\alpha - 3\sqrt{\tilde{C}L^\alpha} = (\bar{a}^\alpha, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}^\alpha) - 3\sqrt{(\bar{a}^\alpha, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}^\alpha)} = (LCL^\alpha_1, LCL_2, LCL_3, LCL^\alpha_4) \quad (7)$$

$$U\tilde{C}L^\alpha = \tilde{C}L^\alpha + 3\sqrt{\tilde{C}L^\alpha} = (\bar{a}^\alpha, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}^\alpha) + 3\sqrt{(\bar{a}^\alpha, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}^\alpha)} = (UCL^\alpha_1, UCL_2, UCL_3, UCL^\alpha_4) \quad (8)$$

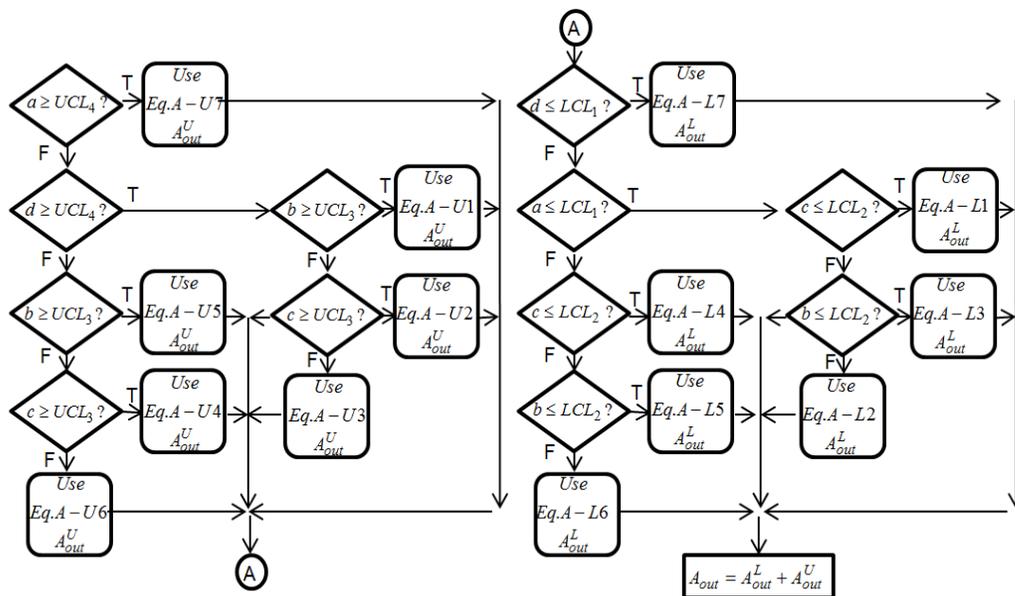
La decisión sobre si el proceso está bajo control se puede hacer según el porcentaje del área de la muestra que permanece en el interior de los $L\tilde{C}L$ y/o $U\tilde{C}L$. Cuando la muestra está incluida por los límites de control, se dice que el proceso está “en control”. Si una muestra difusa está excluida por los límites de control difusos, se dice que el proceso está “fuera de control”. De lo contrario, una muestra está parcialmente incluida en los límites de control. En este caso, si el porcentaje del área que está dentro de los límites de control difusos (β_j) es igual o mayor a un porcentaje predefinido β , entonces el proceso puede ser aceptado como “más o menos en control”; de lo contrario se puede afirmar que está “más o menos fuera de control” (Gülbay y Kahraman, 2006 y 2007).

Los parámetros para la determinación del área de la muestra fuera de los límites de control difusos para el nivel de corte α son $LCL_1, LCL_2, UCL_3, UCL_4, a, b, c, d$, y α . La forma de los límites de control difuso y la muestra están formadas por las líneas de

$\overline{LCL}_1, \overline{LCL}_2, \overline{UCL}_3, \overline{UCL}_4, \bar{a}\bar{b}$ y $\bar{c}\bar{d}$. El diagrama de flujo para calcular el área de la muestra fuera de los límites de control A_{out}^U , área de la muestra que cae encima del límite de control superior y A_{out}^L , es el área que cae debajo del límite de control inferior) se da en la figura 2, y las ecuaciones para calcular estas áreas se exponen en el anexo.

Entonces, el área total de la muestra fuera de los límites de control difusos es ($A_{out} = A_{out}^U + A_{out}^L$). El porcentaje del área de la muestra dentro de los límites de control se calcula como se indica en la ecuación $\beta_j^\alpha = (S_j^\alpha - A_{out,j}^\alpha) / S_j^\alpha$, donde S_j^α es el área de la muestra en un nivel de α -corte. En contraste con los métodos que utilizan las transformaciones difusas, este enfoque es muy flexible y sería más exacto, ya que tanto los datos lingüísticos como los límites de control no se transforman en valores representativos, para evitar la pérdida de las propiedades de las muestras (Gülbay y Kahraman, 2007).

Figura 2. Diagrama de flujo para calcular el área de una muestra difusa (a, b, c, d) que queda fuera de los límites de control difusos



(Véase el anexo para las ecuaciones)
 Fuente: basado en Gülbay y Kahraman (2007 y 2006)

REGLAS DE EVALUACIÓN

Para evaluar el estado de control de la muestra obtenida en el proceso, autores como Montgomery (2004) y Gülbay y Kahraman (2006) recopilan y presentan reglas que determinan la normalidad o no normalidad de los datos, que sirven para detectar patrones no aleatorios o comportamientos no naturales. Las reglas utilizadas en este documento son las de Western Electric, Grant y Leavenworth, y las de Nelson. En la figura 3 se presenta la división de las zonas de un gráfico de control tres sigma, lo cual permite entender las reglas de evaluación para los gráficos de control tradicionales y difusos.

En la tabla 2 se presentan las reglas de evaluación de los gráficos de control tradicionales que determinan cuándo un gráfico se encuentra fuera de control. Por su parte, las reglas de evaluación para el análisis de los gráficos de control difusos se han planteado a partir de la conversión de las reglas desarrolladas para

Figura 3. Zonas de los gráficos de control



Fuente: Basado en Zarandi y Alaeddini (2010) y Gülbay y Kahraman (2006)

los gráficos de control tradicionales según Gülbay y Kahraman (2006), y se presentan en la tabla 3. Se debe tener en cuenta que las reglas de Nelson para los gráficos difusos son las mismas que para los tradicionales, excepto por las reglas 3 y 4.

Tabla 2. Reglas de evaluación para los gráficos de control tradicionales

Regla	Western Electric	Grant y Leavenworth	Nelson
1	Un punto se localiza fuera de los límites de control tres sigma	Siete puntos consecutivos en el mismo lado de la línea central (CL)	Uno o más puntos fuera de los límites de control tres sigma
2	Dos de tres puntos consecutivos caen fuera de los límites dos sigma	Por lo menos 10 de 11 puntos consecutivos en el mismo lado de CL	Nueve puntos consecutivos en el mismo lado de la línea central
3	Cuatro de cinco puntos consecutivos caen a una distancia de un sigma o más de la línea central	Por lo menos 12 de 14 puntos consecutivos en el mismo lado de CL	Seis puntos consecutivos que incrementan o decrecen constantemente
4	Ocho puntos consecutivos caen en el mismo lado de CL	Por lo menos 14 de 17 puntos consecutivos en el mismo lado de CL	Catorce puntos consecutivos alterando arriba y abajo
5	—	—	Dos de tres puntos consecutivos en la zona A o más allá
6	—	—	Cuatro de cinco puntos consecutivos en la zona B o más allá
7	—	—	Quince puntos consecutivos en las zonas C, arriba y debajo de CL
8	—	—	Ocho puntos consecutivos sobre ambos lados de la línea central con ninguno en la zona C

Fuente: basada en Montgomery (2004) y Gülbay y Kahraman (2006)

Tabla 3. Reglas de evaluación para los gráficos de control difusos

Regla	Western Electric	Grant y Leavenworth	Nelson
1	Un dato difuso cae fuera de los límites de control de tres sigma, con una proporción mayor al porcentaje predefinido β del área de la muestra en el nivel α deseado	Un grado de pertenencia total de alrededor de 7 de 7 puntos consecutivos en el mismo lado de la línea central	
2	Un grado de pertenencia total de alrededor de 2 de 3 puntos consecutivos en la zona A o más allá	Al menos un grado de pertenencia total, de alrededor de 10 de 11 puntos consecutivos en el mismo lado de la línea central	
3	Un grado de pertenencia total de alrededor de 4 de 5 puntos consecutivos en la zona C o más allá	Al menos un grado de pertenencia, del total de alrededor de 12 de 14 puntos consecutivos en el mismo lado de la línea central	Seis puntos seguidos aumentando constantemente o disminuyendo con respecto al nivel α de rango medio deseado
4	Un grado de pertenencia total de alrededor de 8 de 8 puntos consecutivos en el mismo lado de la línea central	Por lo menos un grado de pertenencia total de alrededor de 14 de 17 puntos consecutivos en el mismo lado de la línea central	Catorce puntos consecutivos alterando arriba y abajo con respecto al rango medio difuso de nivel α deseado

Fuente: basada en Gülbay y Kahraman (2006)

CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio se desarrolló mediante datos tomados del ejemplo 6.3 propuesto en Montgomery (2004). Este presenta el número de disconformidades observadas en 26 muestras sucesivas de 100 tarjetas de circuitos impresos, que se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Número de disconformidades por muestra

N.º de muestra	N.º de disconformidades	N.º de muestra	N.º de disconformidades
1	21	14	19
2	24	15	10
3	16	16	17
4	12	17	13
5	15	18	22
6	5	19	18
7	28	20	39
8	20	21	30
9	31	22	24
10	25	23	16
11	20	24	19
12	24	25	17
13	16	26	15

Fuente: Montgomery (2004)

GRÁFICO DE CONTROL C TRADICIONAL

Se halló la media y la desviación estándar para seguir con el cálculo de los límites de control, y se obtuvo lo siguiente: $CL_c = 19.84$; $UCL_c = 33.21$ y $LCL_c = 6.48$

GRÁFICO DE CONTROL C DIFUSO

En el caso del gráfico de control c difuso, cada muestra se representa por un número difuso trapezoidal, donde $b = c$. Se asumió un *spread* $d = 2$ (tabla 5), un

valor de $\alpha = 0.6$, y $\beta = 0.7$. Luego se calculó la línea central y los límites de control difusos según las ecuaciones (1-3), cuyos resultados se presentan en la tabla 6.

Posteriormente se calculó la línea central y los límites de control difusos con el uso de los métodos de transformación difusos: rango medio difuso de nivel α , moda difusa y mediana difusa de nivel α , presentados en la tabla 7. Se obtuvieron los mismos datos con los tres métodos aplicados.

Tabla 5. Número difuso trapezoidal para cada muestra

N.º	a	b	c	d	N.º	a	b	c	d
1	19	21	21	23	14	17	19	19	21
2	22	24	24	26	15	8	10	10	12
3	14	16	16	18	16	15	17	17	19
4	10	12	12	14	17	11	13	13	15
5	13	15	15	17	18	20	22	22	24
6	3	5	5	7	19	16	18	18	20
7	26	28	28	30	20	37	39	39	41
8	18	20	20	22	21	28	30	30	32
9	29	31	31	33	22	22	24	24	26
10	23	25	25	27	23	14	16	16	18
11	18	20	20	22	24	17	19	19	21
12	22	24	24	26	25	15	17	17	19
13	14	16	16	18	26	13	15	15	17

Fuente: elaboración propia

Tabla 6. Límites de control del gráfico de control c difuso

\tilde{CL}_c				$L\tilde{CL}_c$				$U\tilde{CL}_c$			
CL_1	CL_2	CL_3	CL_4	CL_1	CL_2	CL_3	CL_4	CL_1	CL_2	CL_3	CL_4
17.85	19.85	19.85	21.85	3.82	6.48	6.48	9.17	30.52	33.21	33.21	35.87

Fuente: elaboración propia

Tabla 7. Límites de control usando rango medio, moda y mediana difusos

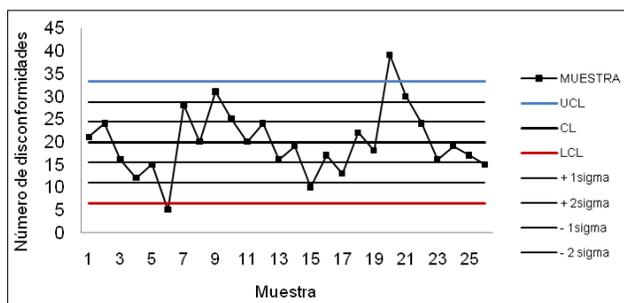
CL_{mr}^{α}	CL_{mod}	CL_{med}^{α}	LCL_{mr}^{α}	LCL_{mod}	LCL_{med}^{α}	UCL_{mr}^{α}	UCL_{mod}	UCL_{med}^{α}
	19.85			6.48			33.21	

Fuente: elaboración propia

ANÁLISIS DEL GRÁFICO DE CONTROL C

Al analizar el gráfico c tradicional con las reglas de Western Electric se puede observar que este cumple con la regla 1, pues presenta dos datos por fuera

Figura 4. Gráfico c tradicional



de los límites de control 3σ (figura 4), lo que implica que el proceso presenta patrones de comportamiento atribuibles a alguna causa no natural.

El gráfico de control no cumple con ninguna de las reglas de Leavenworth. Al evaluar este gráfico con las reglas de Nelson, se nota que cumple con la regla número 1, ratificando lo encontrado con las reglas de Western Electric.

Por otro lado, al analizar el gráfico de control c difuso utilizando la moda difusa, rango medio difuso y mediana difusa se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 8. Como se puede observar, los tres métodos de transformación coinciden en que las muestras 6 y 20 se encuentran fuera de control.

Tabla 8. Decisiones de control según la moda, rango medio y mediana ($\alpha = 0.60, \beta = 0.70$)

N.º de muestra	$b_j = c_j$	β_j	Moda	$f_{mr, j}^{\alpha = 0,6}$	Rango medio	$f_{med, j}^{\alpha = 0,6}$	Mediana
1	21	1.00	En control	21.00	En control	21.00	En control
2	24	1.00	En control	24.00	En control	24.00	En control
3	16	1.00	En control	16.00	En control	16.00	En control
4	12	1.00	En control	12.00	En control	12.00	En control
5	15	1.00	En control	15.00	En control	15.00	En control
6	5	0.00	Fuera de control	5.00	Fuera de control	5.00	Fuera de control
7	28	1.00	En control	28.00	En control	28.00	En control
8	20	1.00	En control	20.00	En control	20.00	En control
9	31	1.00	En control	31.00	En control	31.00	En control
10	25	1.00	En control	25.00	En control	25.00	En control
11	20	1.00	En control	20.00	En control	20.00	En control
12	24	1.00	En control	24.00	En control	24.00	En control
13	16	1.00	En control	16.00	En control	16.00	En control
14	19	1.00	En control	19.00	En control	19.00	En control
15	10	1.00	En control	10.00	En control	10.00	En control
16	17	1.00	En control	17.00	En control	17.00	En control
17	13	1.00	En control	13.00	En control	13.00	En control
18	22	1.00	En control	22.00	En control	22.00	En control

N.º de muestra	$b_j=c_j$	β_j	Moda	$f_{mr,j}^{\alpha=0,6}$	Rango medio	$f_{med,j}^{\alpha=0,6}$	Mediana
19	18	1.00	En control	18.00	En control	18.00	En control
20	39	0.00	Fuera de control	39.00	Fuera de control	39.00	Fuera de control
21	30	1.00	En control	30.00	En control	30.00	En control
22	24	1.00	En control	24.00	En control	24.00	En control
23	16	1.00	En control	16.00	En control	16.00	En control
24	19	1.00	En control	19.00	En control	19.00	En control
25	17	1.00	En control	17.00	En control	17.00	En control
26	15	1.00	En control	15.00	En control	15.00	En control

Fuente: elaboración propia

Mediante el método del enfoque difuso directo se calculó el área de la muestra que se encuentra por fuera de los límites de control A_{out} , y luego se calculó el porcentaje del área de la muestra dentro de los límites de control β_j . Para esto se utilizó el algoritmo presentado en la figura 2 y la expresión del método DFA para evaluar la condición de control de cada muestra. Los resultados se presentan en la tabla 9. Como se puede observar, según este método, las muestras 6 y 20 se encuentran fuera de control.

Con el uso del DFA se aplicaron las reglas de evaluación para gráficos difusos. Inicialmente se calcularon las zonas difusas (tabla 10), y luego se calculó la pertenencia de cada muestra en las diferentes zonas; en la tabla 11 se presenta la pertenencia a las zonas $+3\sigma$ hasta CL de las muestras 19 a la 26; la muestra 20 tiene un grado de pertenencia igual a 1 en la zonas $E+3\sigma$, lo que indica que el área de esta muestra está completamente fuera del límite. De esta manera, se encontró la pertenencia de cada una de las muestras a las reglas de evaluación de los gráficos difusos.

La evaluación de las reglas de Western Electric presentó que solo se cumple la regla 1, por lo menos 1 punto por fuera de los límites 3σ , y la evaluación de las reglas de Grant y Leavenworth deja en claro que las muestras no cumplen con ninguna regla, pues el grado de pertenencia es menor a 1. De acuerdo con las reglas de Nelson, se cumple la regla 1, una muestra fuera de los límites de control.

Después de realizar el análisis de cada uno de los gráficos se puede decir que todos coinciden en sus resultados, dejando en claro que las muestras 6 y 20 están fuera de control porque están situadas fuera de los límites; además, no existe ningún otro tipo de comportamiento anormal. Esta condición de *fuera de control* se debe a causas asignables, que en este caso se atribuyen a la falta de precisión en el reconocimiento de los tipos de disconformidades que pudieron estar presentes y a un problema en la temperatura de la máquina de la ola de soldadura, que se reparó subsecuentemente, para cada una de las muestras, respectivamente (Gülbay y Kahraman, 2006).

Tabla 9. Decisión de control basada en el DFA

N.º de Muestra	A_{out}	A_{out}^U	A_{out}^L	Área de Muestra	β_j	Decisión DFA	N.º de Muestra	A_{out}	A_{out}^U	A_{out}^L	Área de Muestra	β_j	Decisión DFA
1	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control	14	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control
2	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control	15	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control
3	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control	16	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control
4	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control	17	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control
5	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control	18	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control
6	0.30	0.00	0.30	0.32	0.049	Fuera de control	19	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control
7	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control	20	0.32	0.32	0.00	0.32	-	Fuera de control
8	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control	21	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control

N.º de Muestra	A_{out}	A_{out}^U	A_{out}^L	Área de Muestra	Decisión DFA	N.º de Muestra	A_{out}	A_{out}^U	A_{out}^L	Área de Muestra	Decisión DFA		
9	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control	22	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control
10	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control	23	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control
11	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control	24	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control
12	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control	25	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control
13	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control	26	0.00	0.00	0.00	0.32	1	En control

Fuente: elaboración propia

Tabla 10. Límites de control para las zonas difusas

N.º	UCL	2σ	1σ	CL	-1σ	-2σ	LCL
a	30.52	26.3	22.07	17.85	13.17	8.5	3.82
b	33.21	28.76	24.3	19.85	15.39	10.94	6.48
c	33.21	28.76	24.3	19.85	15.39	10.94	6.48
d	35.87	31.19	26.52	21.85	17.62	13.4	9.17

Fuente: elaboración propia

Tabla 11. Pertenencia de las muestras difusas a las zonas $+3\sigma$ hasta CL (E: encima; En: dentro; D: debajo)

N.º	$E+3\sigma$	$En+3\sigma$	$D+3\sigma$	$E+2\sigma$	$En+2\sigma$	$D+2\sigma$	$E+1\sigma$	$En+1\sigma$	$D+1\sigma$	$E\ CL$	$En\ CL$	$D\ CL$
19	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
20	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
21	0.00	0.00	1.00	0.90	0.10	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
22	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.71	0.29	1.00	0.00	0.00
23	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
24	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.22	0.78
25	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00

Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES

Cuando se compararon los gráficos de control c tradicionales con los gráficos de control c difusos, considerando patrones de comportamiento no naturales, se encontró que ambos tipos de gráficos identifican de manera concluyente los comportamientos anormales del proceso.

Según la investigación, con base en los datos utilizados, no se encuentran diferencias en los resultados de evaluación obtenidos con los gráficos de control tradicionales y los gráficos de control difusos. De esta manera, se puede decir que el gráfico de control c tradicional representa una herramienta que requiere un menor esfuerzo en el momento de establecer un control de proceso y obtiene resultados similares que el gráfico de control c difuso.

En el momento de evaluar los gráficos de control c difusos con las reglas de Western Electric y Grant, y Leavenworth, se identificó que con el cálculo del área de cada muestra se puede determinar su estado de control, y, además, aplicar las reglas de evaluación de los gráficos que determinan patrones de comportamiento no aleatorio.

Aunque los gráficos de control c tradicionales representan una buena alternativa, la opción de incluir la lógica difusa en la construcción de los gráficos permite el manejo de la imprecisión en los datos y la construcción de un gráfico de control c que refleje apropiadamente los comportamientos no aleatorios del proceso, información que no maneja un gráfico c tradicional.

Si bien los resultados de los gráficos c difusos son similares a los del gráfico tradicional, en el momento que se tenga la información imprecisa y vaga se contará con una herramienta que brindará iguales elementos de juicio para la toma de decisiones.

REFERENCIAS

- Alaeddini, A., Ghazanfari, M., y Nayeri, M. A. (2009). A hybrid fuzzy-statistical clustering approach for estimating the time of changes in fixed and variable sampling control charts. *Information Sciences*, 179(11), 1769-1784.
- Amirzadeh, V., Mashinchi, M., y Parchami, A. (2009). Construction of p-charts using degree of nonconformity. *Information Sciences*, 179(1), 150-160.
- Briceño Beltrán, C. O. (2004). Redes neuronales artificiales, lógica difusa, geometría de fractales (n.º 006.3 B849r). Cali: Cenicaña.
- Cheng, C. B. (2005). Fuzzy process control: Construction of control charts with fuzzy numbers. *Fuzzy Sets and Systems*, 154(2), 287-303.
- Csutora, R., y Buckley, J. J. (2001). Fuzzy hierarchical analysis: The Lambda-Max method. *Fuzzy Sets and Systems*, 120(2), 181-195.
- Demirli, K., y Vijayakumar, S. (2010). Fuzzy logic based assignable cause diagnosis using control chart patterns. *Information Sciences*, 180(17), 3258-3272.
- Evans, J. R., y lindsay, W. M. (2005). *Administración y control de la calidad* (6.ª ed.). México: Editorial Thomson. 516-524.
- Faraz, A., y Shapiro, A. F. (2010). An application of fuzzy random variables to control charts. *Fuzzy Sets and Systems*, 161(20), 2684-2694.
- Gryna, F. M., Chua, R. C., y Defeo, J. A. (2007). *Método Juran: Análisis y planeación de la calidad*. México: McGraw-Hill/Interamericana.
- Gülbay, M., y Kahraman, C. (2006). Development of fuzzy process control charts and fuzzy unnatural pattern analyses. *Computational Statistics & Data Analysis*, 51(1), 434-451.
- Gülbay, M., y Kahraman, C. (2007). An alternative approach to fuzzy control charts: Direct fuzzy approach. *Information Sciences*, 177(6), 1463-1480.
- Hryniewicz, O. (2007). Statistics with fuzzy data in statistical quality control. *Soft Computing*, 12(3), 229-234.
- Hsieh, Yuh-Wen. (2005). *On the construction of fuzzy control charts for variables* (tesis de maestría). College of Management, Statistics Department. Taiwán. Disponible en: <http://Etdncku.lib.ncku.edu.tw/etd-0628106-173512.pdf>
- Kaya, İ., y Kahraman, C. (2011a). Process capability analyses based on fuzzy measurements and fuzzy control charts. *Expert Systems with Applications*, 38(4), 3172-3184.
- Kaya, İ., y Kahraman, C. (2011b). Fuzzy process capability indices with asymmetric tolerances. *Expert Systems with Applications*, 38(12), 14882-14890.
- Lazzari, L. L., Machado, E. A. M., y Pérez, R. H. (1998). *Teoría de la decisión fuzzy*. Buenos Aires: Macchi, 108.
- Montgomery, D. (2004). *Control estadístico de la calidad* (3.ª ed.). México: Limusa Wiley.
- Noori, S., Bagherpour, M., y Zareei, A. (2008). Applying fuzzy control chart in earned value analysis: A new application. *World Applied Sciences Journal*, 3(4), 684-690.
- Senturk, S., y Erginel, N. (2009). Development of fuzzy and control charts using α -cuts. *Information Sciences*, 179(10), 1542-1551.
- Shu, M. H., y Wu, H. (2011). Fuzzy X and R control charts: Fuzzy dominance approach. *Computers & Industrial Engineering*, 61(3), 676-685.
- Zarandi, M. H. F., y Alaeddini, A. (2010). A general fuzzy-statistical clustering approach for estimating the time of change in variable sampling control charts. *Information Sciences*, 180(16), 3033-3044.

Anexo. Ecuaciones para calcular el área fuera de los límites de control de muestra¹

A-U1
$$A_{out}^U = \frac{\left[(d^\alpha - UCL_4^\alpha) + (d^t - UCL_4^t) \right] (\max(t - \alpha, 0)) + \frac{\left[(d^z - a^z) + (c - b) \right] (\min(1 - t, 1 - \alpha))}{2}}$$

Donde $t = (UCL_4 - a) / ((UCL_4 - UCL_3) + (b - a))$ y $z = \max(t, \alpha)$

A-U2
$$A_{out}^U = \left((d^\alpha - UCL_4^\alpha) + (c - UCL_3) \right) (1 - \alpha) / 2$$

A-U3
$$A_{out}^U = \left((d^\alpha - UCL_4^\alpha) (\max(t - \alpha, 0)) \right) / 2$$

Donde $t = (UCL_4 - d) / ((UCL_4 - UCL_3) - (D - C))$

A-U4
$$A_{out}^U = \left((c - UCL_3) + (d^z - UCL_4^z) (\min(1 - t, 1 - \alpha)) \right) / 2$$

Donde $t = (UCL_4 - d) / ((UCL_4 - UCL_3) - (d - c))$ y $z = \max(t, \alpha)$

A-U5
$$A_{out}^U = \frac{1}{2} \left[(d^{z2} - UCL_4^{z2}) + (d^{t1} - UCL_4^{t1}) \right] \min(\max(t_1 - \alpha, 0), t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \left[(d^{z1} - a^{z1}) + (c - b) \right] \min(1 - t_1, 1 - \alpha)$$

Donde $t = \frac{UCL_4 - a}{(b - a) + (UCL_4 - UCL_3)}$ $t_2 = \frac{UCL_4 - d}{(UCL_4 - UCL_3) - (d - c)}$
 $z_1 = \max(\alpha - t_1)$ y $z_2 = \max(\alpha, t_2)$

A-U6
$$A_{out}^U = 0$$

A-U7
$$A_{out}^U = \frac{1}{2} \left[(d^\alpha - a^\alpha) + (c - b) \right] (1 - \alpha)$$

A-L1
$$A_{out}^U = \frac{1}{2} \left[(LCL_1^\alpha - a^\alpha) + (LCL_1^t - a^t) \right] (\max(t - \alpha, 0)) + \frac{1}{2} \left[(d^z - a^z) + (c - b) \right] (\min(1 - t, 1 - \alpha))$$

Donde $t = (d - LCL_1) / ((LCL_2 - LCL_1) + (d - c))$ y $z = \max(\alpha, t)$

A-L2
$$A_{out}^L = \frac{1}{2} \left[(d^\alpha - a^\alpha) + (c - b) \right] (1 - \alpha)$$

A-L3
$$A_{out}^U = \frac{1}{2} (d^\alpha - UCL_4^\alpha) (\max(t - \alpha, 0))$$

A-L4
$$A_{out}^L = \frac{1}{2} \left[(LCL_1^{z2} - a^{z2}) + (LCL_1^{t1} - a^{t1}) \right] \min(\max(t_1 - \alpha, 0), t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \left[(d^{z1} - a^{z1}) + (c - b) \right] \min(1 - t_1, 1 - \alpha)$$

Donde $t_1 = \frac{d - LCL_1}{(LCL_2 - LCL_1) + (d - c)}$ $t_2 = \frac{a - LCL_1}{(LCL_2 - LCL_1) - (b - a)}$
 $z_1 = \max(\alpha, t_1)$ y $z_2 = \max(\alpha, t_2)$

A-L5
$$A_{out}^L = \frac{1}{2} \left[(LCL_1^z - a^z) + (LCL_2 - b) \right] (\min(1 - t, 1 - \alpha))$$

Donde $t_1 = \frac{a - LCL_1}{(LCL_2 - LCL_1) - (b - a)}$ y $z = \max(\alpha, t)$

A-L6
$$A_{out}^L = 0$$

A-L7
$$A_{out}^L = \frac{1}{2} \left[(d^\alpha - a^\alpha) + (c - b) \right] (1 - \alpha)$$

Fuente: adaptado de Gülbay and Kahraman (2006 y 2007)

1 Cuando se realizó la revisión bibliográfica y el análisis de estas ecuaciones se encontró que el autor había cometido un error en una ecuación, en t de A-U2.

Recuperación etnobotánica del uso tradicional no maderable del bosque secundario en el municipio de Nocaima, Cundinamarca

Luisa María Briceño Fonseca,¹ Aida Gisela Mahecha Garzón^{2*},
Max Alejandro Triana Gómez³

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, proyecto curricular de Ingeniería Forestal, Semillero de Investigación Promafor
Carrera 5 n.º 15-82, Bogotá, D.C., Colombia.
<http://orcid.org/0000-0002-6785-2289>

² Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, proyecto curricular de Ingeniería Forestal, Semillero de Investigación Promafor. Carrera 5 n.º 15-82, Bogotá D.C, Colombia.

* Autor para correspondencia: aidagmahecha@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-3278-1687>

³ Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, proyecto curricular de Ingeniería Forestal, Semillero de Investigación Promafor y Proprobos. Carrera 5 n.º 15-82, Bogotá, D. C., Colombia.

RESUMEN

El uso tradicional no maderable del bosque secundario es importante para el bienestar rural y el manejo sostenible del recurso forestal; sin embargo, se ha ido perdiendo. Con la recuperación etnobotánica del uso tradicional no maderable del bosque secundario en el municipio de Nocaima se buscó identificar los puntos estratégicos relacionados con la presencia de bosque y sabedores locales, mediante entrevistas semiestructuradas, diálogos y recorridos guiados. La información se capturó por medio de grabaciones orales, fotografías y muestras botánicas identificadas en el herbario forestal UDBC. Se encontraron 161 especies pertenecientes a 68 familias, 126 de ellas nativas y 4 endémicas. El cálculo de los índices de importancia cultural, nivel de uso significativo, factor de consenso y nivel de fidelidad priorizaron 15 especies nativas para sistemas agroecológicos. Los porcentajes de uso tradicional no maderable encontrados para 10 categorías determinadas fueron: medicinal (57.8 %), alimenticia (28.6 %), ornamental (23.6 %), cultural (12.4 %), mágico-religiosa (8.7 %), cosmética (8.1 %), artesanal (6.2 %), forrajera (3.1 %), tintes (4.3 %) y protectora (4.3 %). En algunas categorías se encontraron nuevos reportes de uso. Por otra parte, la población entrevistada manifestó que un 86.9 % transmite el conocimiento sobre el

uso a otras personas, mientras que un 89.1 % lo usa en su núcleo familiar; sin embargo el 65.2 % consideró que el conocimiento se perderá con el tiempo. Se concluyó que las categorías medicinal y alimenticia sobresalen entre los usos tradicionales no maderables del bosque secundario y se evidenció la importancia de estos usos en el núcleo familiar, aspecto que favorecerá la preservación y el uso sostenible de los bosques secundarios.

Citation: Briceño Fonseca, L.M, Mahecha Garzón, A.G y Triana Gómez, M. A. (2017). Recuperación etnobotánica del uso tradicional no maderable del bosque secundario en el municipio de Nocaima, Cundinamarca. *Mutis* 7(1), 48-66, <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1188>

Received: Octubre 21, 2016. **Accepted:** Marzo 01, 2017. **Published on line:** Mayo 1, 2017.

Copyright: ©2017 Briceño Fonseca, L. M, Mahecha Garzón, A. G y Triana Gómez, M. A. This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

Ethnobotanical recovery of the traditional non-timber use of the secondary forest in Nocaima, Cundinamarca

Palabras clave: categorías de uso, memoria etnobotánica, productos forestales no maderables (PFNM).

ABSTRACT

Considering that the traditional non-timber use of the secondary forest –important for the rural welfare and sustainable management of forest resources– has been diminishing. Strategic points were identified considering the presence of forest and local knowledgeable townfolk, where semi-structured interviews, dialogues and guided tours were developed.

Information was captured through oral recordings, photographs, and botanical samples identified in the UDBC forest herbarium.

161 Species belonging to 68 families were found, 126 of these native and 4 endemic. Rates were calculated for Cultural Importance, Level of Significant Use, Consensus Factor and Fidelity Levels for which 15 native species were prioritized. The following 10 categories of use were established: medical (57.8 %), nutritional (23.6 %), cultural (12.4 %), magical-religious (8.7 %) cosmetic (8.1 %), artisanal (6.2 %), fodder (3.1 %), dyes (4.3 %) and protective (4.3 %). New usage reports were found within these categories. On the other hand, 65.2 % of the interviewed population considered that the knowledge of use will be gradually lost over time, yet, 86.9 % stated to transmit this knowledge to other people and 89.1 % uses them with their family. It was concluded that the medical and nutritional categories stand out within the traditional non-timber user of the secondary forest, and their importance of said categories was evidenced in households. Having discovered that the population recognizes that the knowledge of use may be lost in time, the value of the ethnobotany studies for its preservation and the sustainable use of the secondary forests is highlighted.

Keywords: categories of use, ethnobotany memory, non-timber forest products.

INTRODUCCIÓN

Los bosques mejoran la calidad de vida de más de un millón de personas en el mundo, y además contribuyen a la conservación de la diversidad biológica, suministran energía, protegen el suelo y el agua, y favorecen la mitigación de los efectos ocasionados por el cambio climático (FAO, 2004). Sin embargo, se han eliminado 13 millones de hectáreas de bosques en el mundo (FAO, 2012). Colombia, específicamente, presenta una tasa de deforestación del 16%, lo que ha significado la desaparición de 140 356 hectáreas de bosques en los últimos años (Ideam, 2015). Según el Acuerdo Intersectorial por la Madera Legal en Cundinamarca (Gobernación de Cundinamarca, 2012), en el departamento se ha reportado menos del 9 % de la cobertura de bosques original, y la tasa de deforestación se ha triplicado entre 1990 y 2010, por lo cual resulta importante la creación de estrategias para la conservación y protección de los bosques.

En el municipio de Nocaima predominan las coberturas de bosques secundarios con un total de 56.47 hectáreas, consideradas áreas de especial protección (Beltrán, 2013).

La importancia económica, ecológica y social de los bosques secundarios ha trascendido, principalmente por los actuales procesos de deforestación en los trópicos de América Latina (Smith, Sabogal, Jong y Kaimowitz, 1997). La vegetación secundaria ofrece gran diversidad de plantas medicinales y ornamentales, alimentos, forrajes y diferentes materiales para la elaboración de utensilios domésticos (Brown y Lugo, 1990; Smith, Sabogal, Jong y Kaimowitz, 1997). De la misma manera, se consideran un instrumento decisivo para enfrentar los efectos del cambio climático, dada su alta capacidad para almacenar y capturar grandes cantidades de dióxido de carbono (Poorter *et al.* 2016). Estas características deben ser consideradas un argumento fundamental, que aparte de resaltar la importancia de estos bosques, puede contribuir a aumentar el número de investigaciones sobre los mismos.

Debido al sinnúmero de servicios que ofrecen a la sociedad, en Colombia los bosques son objeto de constante intervención. Por este motivo es necesario implementar nuevas alternativas, como los productos forestales no maderables (PFNM), que debe partir de la identificación de especies y usos adecuados para el

manejo sostenible del bosque, y que puede apoyarse del valioso conocimiento que las comunidades tienen sobre el tema (González y López, 2009).

Con el paso del tiempo la región andina se ha visto enfrentada a diferentes problemas ambientales y sociales que se atribuyen al crecimiento de la agricultura, la deforestación y el mal uso de los recursos naturales (Izquierdo y Roca, 1998). A pesar de esto, la ecorregión andina aún cuenta con muchos recursos filogenéticos y una gran diversidad autóctona (Castillo, 1995).

Cabe resaltar que en la actualidad, el conocimiento del uso de la vegetación no maderable, a pesar de su importancia, está desapareciendo junto con la diversidad de los bosques, principalmente por el cambio generacional, la agricultura y la deforestación. Los bosques andinos no son ajenos a esta pérdida, y con el paso del tiempo resulta cada vez más notoria la disminución de conocimiento sobre las especies y la multiplicidad de usos que pueden dárseles a las mismas (Zuluaga, 1994; Padulosi, Eyzaguirre y Hodgkin, 1999; Tabuti, Lye y Dhillion, 2003; Toledo 2005).

La etnobotánica es una ciencia crucial para rescatar el conocimiento tradicional que se ha perdido en diferentes regiones (Miranda, Velázquez y Bermúdez, 2005). Su objetivo principal es el estudio de las relaciones existentes entre el hombre y la vegetación, lo cual contribuye al descubrimiento y preservación del conocimiento de las plantas, la biodiversidad, la cultura y la tradición de las comunidades (Schultes, 1939; Ford, 1978; Katewa, Chaudhry y Jain, 2004).

Por otra parte, la etnobotánica cuenta con herramientas útiles para la recolección de información de usos de la vegetación, y además permite observar y obtener una perspectiva de la memoria, el pasado, la tradición y la relación histórica del hombre con la naturaleza (Kvist, Oré, Gonzáles y Llapapasca, 2001; Zuluaga, 1994).

Teniendo en cuenta que el valor del conocimiento tradicional de las comunidades del país merece ser rescatado, la importancia de los productos forestales no maderables en el sustento de las familias rurales y la oportunidad que representan para mejorar la calidad de vida y el uso sostenible del recurso forestal, principalmente en regiones que registran una alta pérdida de bosques, como el departamento de

Cundinamarca, este trabajo presenta los resultados de la recuperación etnobotánica del uso tradicional no maderable del bosque secundario del municipio de Nocaima, mediante diferentes herramientas, para lo cual se parte de identificar las especies más importantes para la comunidad, la diversidad de usos que se les da en la región y el estado del conocimiento tradicional de la vegetación en el contexto actual del municipio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el municipio de Nocaima ubicado en el noroccidente del departamento de Cundinamarca en la vertiente occidental de la cordillera Oriental del país, entre las coordenadas 5°4' 0'' de latitud norte y 74°23' 0'' ' de longitud oeste (figura 1). Tiene una altitud media de 1100 m. s. n. m, con una precipitación y temperatura media anual de 1760 mm y 24 °C, respectivamente. Según la clasificación de Holdridge, en el municipio predomina el bosque húmedo premontano (bh-PM).

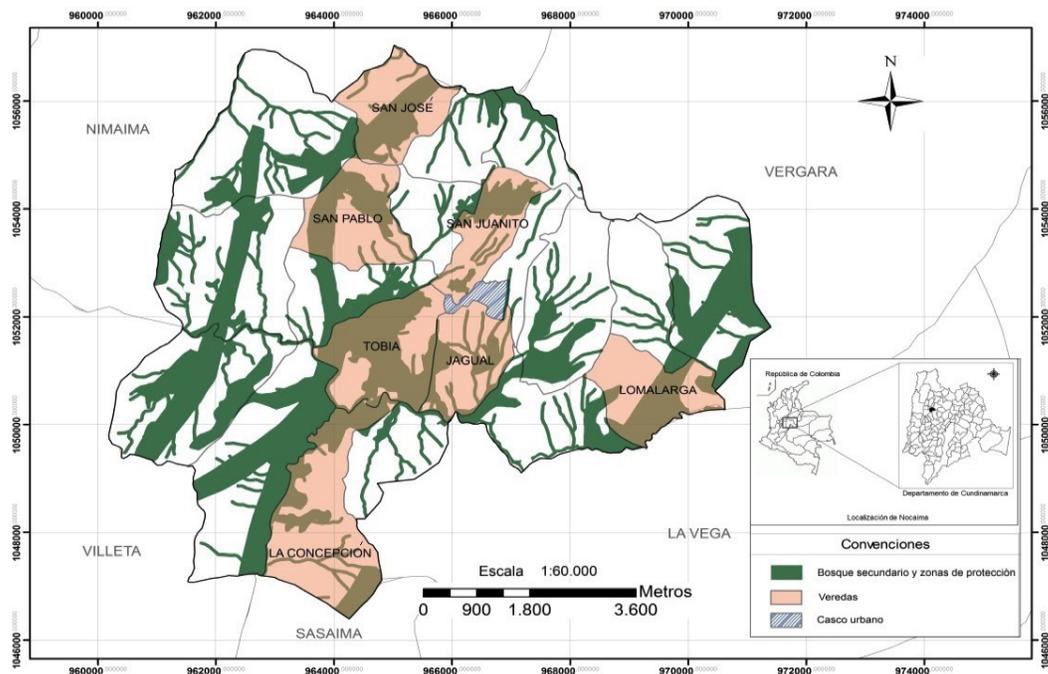
Toma de datos

La selección de las veredas tenidas en cuenta en el estudio se realizó de acuerdo a los parámetros establecidos por Martín (2000). Así, se identificaron puntos estratégicos relacionados con la presencia de bosque secundario y sabedores locales (figura 1). Para la recolección de datos en campo se desarrollaron entrevistas semiestructuradas, diálogos con actores clave reconocidos como sabedores locales, y recorridos guiados.

La información se capturó por medio de grabaciones orales, fotografías y muestras botánicas. A las muestras se les realizó el registro de nombre común, uso tradicional, forma en la que se obtuvo el conocimiento de uso, permanencia del uso tradicional en el tiempo, uso familiar, extensión del conocimiento de uso, sexo y edad de las personas entrevistadas.

Se definieron las siguientes categorías de uso: medicinal, ornamental, alimenticia, mágico-religiosa, tintes, protectora, forrajera, cosmética, artesanal y cultural (adaptado de Ariza *et al.* 2010; Cárdenas y López, 2000) (tabla 1).

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio y sitios de investigación en el municipio de Nocaima, Cundinamarca. Fuente: Beltrán (2013), Alcaldía municipal de Nocaima (2008) y autores.



Identificación de especies

Las especies fueron colectadas de acuerdo a los lineamientos propuestos por Ariza & Medina (2006). Las diferentes muestras obtenidas se prensaron y secaron en el Herbario Forestal UDBC, en donde se realizó la identificación de especies comparando las colecciones del Herbario Forestal y los ejemplares tipo en el sistema de clasificación APG III (2009).

Tabla 1. Definición de las categorías de uso empleadas en el estudio

Categoría de uso	Definición
Medicinal	Incluye las especies que son empleadas con fines medicinales por la comunidad, debido a sus propiedades curativas, y que son reconocidas popularmente para el alivio de diferentes dolencias y enfermedades.
Ornamental	Abarca las especies que son empleadas con fines decorativos por el atractivo de sus flores, frutos, hojas, aroma o porte, y que además cumplen funciones importantes para la comunidad como cerca viva.
Alimenticia	Especies que la comunidad local considera comestibles o que son importantes en el proceso de producción y elaboración de otros alimentos. Incluye frutos, hojas, flores, tubérculos y tallos.
Cosmética	Especies empleadas en la higiene y belleza del cuerpo, el rostro y el cabello con propiedades cicatrizantes, antimicrobianas, antioxidantes, hidratantes y emolientes. En esta categoría se incluyen también especies utilizadas para la elaboración de aceites, extractos y productos de limpieza como acondicionadores y shampoo.
Mágico-religiosa	Comprende las especies a las que la comunidad les atribuye poderes mágicos, o están relacionadas con creencias religiosas, y que son utilizadas como agüero, amuleto o “contras”.
Tintes	Incluye las especies empleadas para teñir o usadas como colorantes.
Protectora	Abarca las especies que cumplen una función ambiental importante como alimento de fauna, protección de suelos y de fuentes hídricas.

Categorías de uso	Definición
Forrajera	Especies utilizadas como alimento de animales. Incluye hojas, tallos y frutos.
Artesanal	Comprende las especies a partir de las cuales se realizan artesanías como collares, camándulas y cinturones. Incluye semillas y fibras.
Cultural	Involucra las especies que están relacionadas con la comunidad por sus tradiciones, experiencias, cotidiano vivir e historia. Incluye plantas vinculadas con mitos, leyendas, cuentos y actividades lúdicas y de diversión. Esta categoría también abarca las especies utilizadas en la elaboración de artículos caseros como escobas y utensilios domésticos, y las especies empleadas en la elaboración de techos y envoltura de alimentos.

La secuencia metodológica empleada en el estudio está representada en la figura 2:

Figura 2. Diagrama metodológico. Fuente: autores



Análisis de datos

El nivel de uso significativo (NS) valora las especies que tienen una mayor aceptación cultural (> 20 %). Se evaluó de acuerdo con la metodología propuesta por Toscano (2006), y se calculó mediante la fórmula (1):

$$NS = \frac{FC}{NTE} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

NS = nivel de uso significativo.

FC = frecuencia de citas por especie.

NTE = número total de encuestados.

El índice de importancia cultural (IC) valora la versatilidad de la especie según la cantidad de usos que tenga (Tardío y Pardo de Santayana, 2008). Se evaluó de acuerdo a lo establecido por Tinitana (2014) con la fórmula (2):

$$IC = \frac{CU}{NTE} \quad (2)$$

Donde:

IC = índice de importancia cultural.

CU = cantidad de usos.

NTE = número total de encuestados.

El factor de consenso (FC) valora el nivel de intercambio de información de uso de las plantas entre las

personas, siendo 1 el máximo valor de consenso, y 0, el mínimo (Tinitana, 2014). Para el cálculo de este índice se emplea la fórmula (3):

$$FC = \frac{(FCC - NTC)}{(FCC - 1)} \quad (3)$$

Donde:

FC = factor de consenso.

FCC = frecuencia de citación en la categoría.

NTC = número total de especies en la categoría.

El índice de nivel de fidelidad (IF) determina la importancia y coherencia de uso de una especie para la categoría. Se expresa en porcentaje, siendo 100 % la especie con mayor nivel de fidelidad (Tinitana, 2014). Se calcula por medio de la fórmula (4):

$$IF = \frac{FCC}{FTC} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

IF = índice de fidelidad.

FCC = frecuencia de citación en la categoría.

FTC = frecuencia total de citaciones.

Se realizó el análisis de componentes principales de las categorías de uso más importantes, y las variables de transmisión del conocimiento y uso familiar, al igual que en las categorías de uso más importantes y la variable de prevalencia del conocimiento.

El análisis de los datos obtenidos en campo se realizó con el paquete estadístico IBM SPSS Statistics 22.

RESULTADOS

Se realizaron 46 entrevistas semiestructuradas. De las personas entrevistadas, el 41 % se encuentra en un rango de edad de 60 a 80 años, con un 26 % entre los 40 y 60 años. El 67.4 % son mujeres, y el 32.6 %, hombres.

Composición florística

Se identificaron 161 especies pertenecientes a 153 géneros y 68 familias, de las cuales, las más importantes son las siguientes: Leguminosae (18 especies), Asteraceae (14 especies), Malvaceae (10 especies), Lamiaceae (7 especies), Moraceae (6 especies), Araceae (5 especies), Poaceae (5 especies) y Verbenaceae (5 especies) (tabla 3).

Se encontraron 126 especies nativas, 4 de ellas endémicas: *Anthurium glaucospadix* Croat, *Cattleya trianae* Linden & Rchb.f., *Myrcia cf. Cucullata* O. Berg y *Heterosperma achaetum* S.F. Blake, 23 cultivadas y 12 naturalizadas.

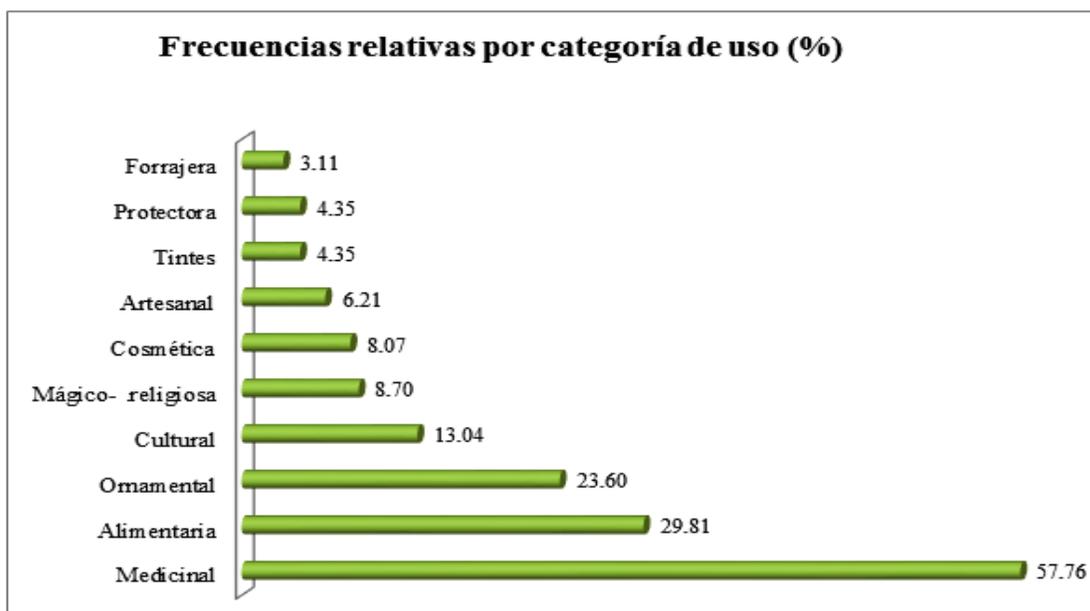
Se registraron 52 especies en categorías amenazadas, según la clasificación UICN (2008), el *Libro rojo de plantas* y la *Lista de especies amenazadas de Colombia* (Cárdenas y Salinas, 2006; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 192 del 2014), de las cuales 46 especies se encuentran en la categoría de preocupación menor (LC), dos especies en la de casi amenazadas (NT), una especie en la categoría vulnerable (VU) y tres especies en la de peligro (EN), correspondientes a *Cattleya trianae* Linden & Rchb.f., *Gustavia speciosa* (Kunth) DC. y *Ceroxylon sasaimae* Galeano (tabla 3).

Categorías de uso

Para las categorías de uso se obtuvieron las siguientes frecuencias relativas: medicinal (57.8 %), alimenticia (28.6 %), ornamental (23.6 %), cultural (12.4 %), mágico-religiosa (8.7 %), cosmética (8.1 %), artesanal (6.2 %), forrajera (3.1 %), tintes y protectora (4.3 %) (figura 3) (tabla 3).

En las tres categorías con mayor número de especies reportadas, las especies más frecuentes encontradas en la categoría medicinal fueron: *Lippia alba* (Mill.) N.E.Br. ex Britton & P. Wilson, *Ocimum campechianum* Mill., y *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf. De igual manera, en la categoría alimenticia sobresalen las especies *Carludovica palmata* Ruiz & Pav., guarapo (especie no identificada) y *Calathea crotalifera* S. Watson. En la categoría ornamental se encontraron las especies *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp., *Jacaranda caucana* Pittier, y *Croton smithianus* Croizat.

Figura 3. Frecuencias relativas por categoría de uso



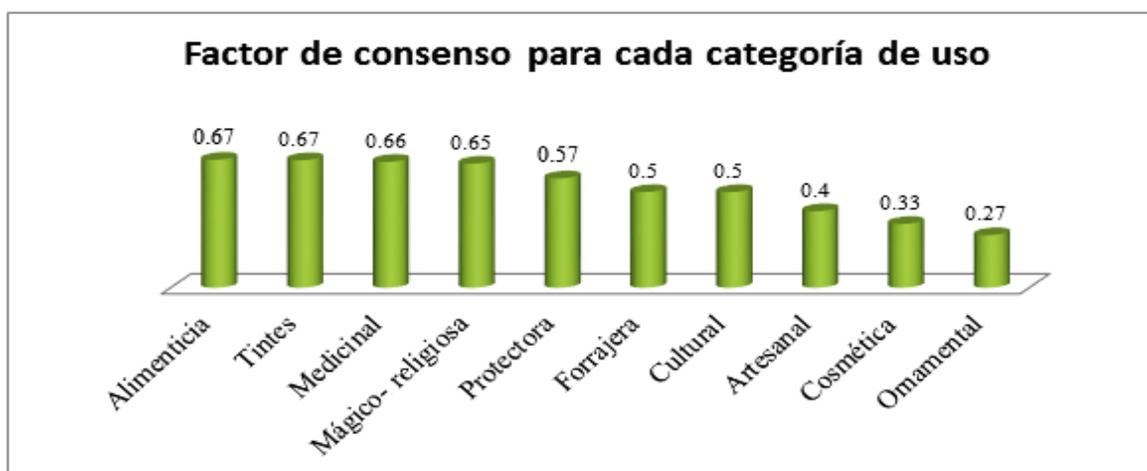
Índices etnobotánicos

Para el nivel de uso significativo (NS) se determinaron seis especies, que fueron citadas con una frecuencia mayor al 20 %: *Lippia alba* (Mill.) N.E.Br. ex Britton & P.Wilson (NS = 41.3 %), *Carludovica palmata* Ruiz & Pav. (NS = 34.8 %), *Ocimum campechianum* Mill. (NS = 30.4 %), *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf (NS = 28.2 %), *Gliricidia sepium* (Jacq.) (NS = 23.9 %) y guarapo (especie no identificada) (NS = 23,9 %) (tabla 3).

En el índice de importancia cultural (IC) sobresalen por su número de usos las especies *Lippia alba* (Mill.) Britton & P. Wilson (IC = 0.19), *Ageratum conyzoides* (L.) L (IC = 0.17) y *Equisetum bogotense* Kunth (IC = 0.17) (tabla 3).

En cuanto al factor de consenso (FC), las siguientes categorías obtuvieron un valor por encima de 0.5: alimenticia (FC = 0.67), tintes (FC = 0.67), medicinal (FC = 0.66), mágico-religiosa (FC = 0.65) y protectora (FC = 0.57) (figura 4).

Figura 4. Factor de consenso para cada categoría de uso



En cuanto al índice de fidelidad (IF), se encontró que más del 70 % de las especies presentes en las categorías alimenticia, forrajera, medicinal y ornamental presentan un nivel de fidelidad superior al 80 % (tabla 2).

Tabla 2. Número de especies con un índice de fidelidad superior al 80 % por cada categoría de uso

Categoría	Número total de especies	Número total de especies con un IF > 80 %	Porcentaje (%)
Alimenticia	48	40	83
Forrajera	5	4	80
Medicinal	93	69	74
Ornamental	38	28	74
Mágico-religiosa	14	9	64
Tintes	7	4	57
Protectora	7	3	43
Artesanal	10	4	40
Cultural	21	8	38
Cosmética	13	3	23

Tabla 3. Lista de especies en cada categoría de uso, nivel de uso significativo (NS), importancia cultural (IC) y categoría de amenaza.

1) medicinal, 2) ornamental, 3) alimenticia, 4) cosmética, 5) mágico-religiosa, 6) tintes, 7) protectora, 8) forrajera, 9) artesanal, y 10) cultural

FAMILIA	NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTIFICO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	NS	IC	CATEGORIA DE AMENAZA
Acanthaceae	Destrancadera	<i>Hypoestes phyllostachya</i> Baker											4.34	0.021	No evaluada
	Juanito	<i>Razisea spicata</i> Oerst.											2.17	0.021	No evaluada
	Nacedero	<i>Trichanthera gigantea</i> (Humb. & Bonpl.) Nees											15.21	0.13	Preocupación menor
Adoxaceae	Chucua	<i>Viburnum tinoides</i> L.f.											2.17	0.021	No evaluada
Alstromeriaceae	Bomarea	<i>Bomarea edulis</i> (Tussac) Herb.											2.17	0.021	No evaluada
Amaranthaceae	Bledo	<i>Amaranthus dubius</i> Thell.											6.52	0.021	No evaluada
	Cabalonga	<i>Alternanthera lanceolata</i> (Benth.) Schinz											4.34	0.021	No evaluada
	Paico	<i>Chenopodium ambrosioides</i> L.											8.69	0.021	Preocupación menor
	Pulmonaria	<i>Iresine diffusa</i> Willd.											2.17	0.021	No evaluada
Anacardiaceae	Chiraco	<i>Toxicodendron striatum</i> (Ruiz & Pav.) Kuntze											17.39	0.021	No evaluada
	Mijao, Caracoli	<i>Anacardium excelsum</i> (Kunth) Skeels											2.17	0.021	Casi amenazada
Annonaceae	Guanabano	<i>Annona muricata</i> L.											6.52	0.043	No evaluada
Apiaceae	Cilantro barranquero	<i>Eryngium foetidum</i> L.											10.86	0.043	Preocupación menor
Araceae	Anturio	<i>Anthurium crystallinum</i> Linden & André											4.34	0.021	No evaluada
	Bore	<i>Xanthosoma sagittifolium</i> (L.) Schott											10.86	0.065	No evaluada
	Chime	<i>Colocasia esculenta</i> (L.) Schott											6.52	0.021	No evaluada
	Chulo	<i>Dieffenbachia seguine</i> (Jacq.) Schott											2.17	0.021	No evaluada
	Col de monte	<i>Anthurium glaucospadix</i> Croat											6.52	0.043	No evaluada
Araliaceae	Guarumo cajeto	<i>Oreopanax</i> sp.											2.17	0.021	No evaluada
Arecaceae	Cachipay, Mararay	<i>Bactris gasipaes</i> Kunth											6.52	0.021	Vulnerable
	Cuesco	<i>Attalea butyracea</i> (L.f.) Wess.Boer											2.17	0.021	Preocupación menor
	Palma real	<i>Ceroxylon sasaimae</i> Galeano											4.34	0.043	En peligro
Asteraceae	Altamisa	<i>Ambrosia peruviana</i> Willd.											8.69	0.065	Preocupación menor
	Anisillo	<i>Heterosperma achaetum</i> S.F.Blake											2.17	0.021	No evaluada
	Botón de oro	<i>Tithonia diversifolia</i> (Hemsl.) A.Gray											2.17	0.065	No evaluada
	Chipaca	<i>Bidens subalternans</i> DC.											2.17	0.065	No evaluada
	Crucero	<i>Adenostemma</i> sp.											17.39	0.043	No evaluada
	Dalia	<i>Dahlia imperialis</i> Orgies											4.34	0.021	No evaluada
	Dalia	<i>Dahlia pinnata</i> Cav.											4.34	0.021	No evaluada
	Guaca	<i>Acmella brachyglossa</i> Cass.											15.21	0.021	No evaluada
	Hierba de chulo	<i>Porophyllum ruderale</i> (Jacq.) Cass.											4.34	0.021	No evaluada
	Mastranto	<i>Ageratum conyzoides</i> (L.) L.											8.69	0.17	Preocupación menor
	Matricaria	<i>Tanacetum parthenium</i> (L.) Sch.Bip.											2.17	0.021	No evaluada
	Mayorquin	<i>Trixis inula</i> Crantz											2.17	0.021	No evaluada
	Mochilavieja	<i>Baccharis decussata</i> (Klatt) Hieron.											10.86	0.065	No evaluada
Romero	<i>Tagetes filifolia</i> Lag.											2.17	0.043	No evaluada	
Basellaceae	Insulina	<i>Anredera cf. cordifolia</i> (Ten.) Steenis											6.52	0.043	No evaluada

Bignoniaceae	Gualanday	<i>Jacaranda caucana</i> Pittier																		10.86	0.086	Preocupacion menor	
	Ocobo, Guayacan	<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) A.DC.																			4.34	0.043	Preocupación menor
	Totumo	<i>Crescentia cujete</i> L.																			4.34	0.043	Preocupación menor
Bixaceae	Achiote	<i>Bixa orellana</i> L.																			8.69	0.043	No evaluada
Boraginaceae	Costillas de Adan //balazo	<i>Monstera deliciosa</i> Liebm.																			2.17	0.043	No evaluada
Bromeliaceae	Piñuela	<i>Bromelia karatas</i> L.																			4.34	0.043	Preocupacion menor
Calophyllaceae	Mamey	<i>Mammea americana</i> L.																			2.17	0.021	No evaluada
Cannaceae	Sagú	<i>Canna indica</i> L.																			2.17	0.021	Preocupacion menor
Caricaceae	Papayuelo	<i>Vasconcellea pubescens</i> A.DC.																			4.34	0.021	No evaluada
Cecropiaceae	Yarumo	<i>Cecropia</i> sp																			2.17	0.065	No evaluada
Commelinaceae	meña, andariega, sinvergü	<i>Tradescantia zebrina</i> Bosse																			13.04	0.086	No evaluada
Convolvulaceae	Batata	<i>Ipomoea batatas</i> (L.) Lam.																			2.17	0.021	No evaluada
Cucurbitaceae	Cirayota	<i>Sechium edule</i> (Jacq.) Sw.																			15.21	0.086	No evaluada
Cyclanthaceae	Palmicha o nacuma o Iraca	<i>Carludovica palmata</i> Ruiz & Pav.																			34.78	0.065	Preocupacion menor
Cyperaceae	Tote	<i>Rhynchospora nervosa</i> (Vahl) Boeckeler																			6.52	0.021	Preocupacion menor
Dennstaedtiaceae	Sarve	<i>Pteridium caudatum</i> (L.) Maxon																			2.17	0.043	No evaluada
Equisetaceae	Cola de Caballo	<i>Equisetum bogotense</i> Kunth																			15.21	0.17	No evaluada
Euphorbiaceae	Higuerilla	<i>Ricinus communis</i> L.																			2.17	0.043	No evaluada
	Lechoso	<i>Euphorbia cotinifolia</i> L.																			2.17	0.021	Preocupacion menor
	Sangregado	<i>Croton smithianus</i> Croizat																			10.86	0.086	No evaluada
Gesneriaceae	Tusilla	<i>Kohleria spicata</i> (Kunth) Oerst.																			2.17	0.021	No evaluada
Heliconiaceae	Platanillo	<i>Heliconia bihai</i> (L.) L.																			6.52	0.043	No evaluada
Hypericaceae	Lancillo	<i>Vismia baccifera</i> (L.) Planch. & Triana																			8.69	0.043	Preocupacion menor
Lamiaceae	Albahaca	<i>Ocimum campechianum</i> Mill.																			30.43	0.043	Preocupacion menor
	Cofrey	<i>Symphytum officinale</i> L.																			2.17	0.043	No evaluada
	Guacamoño	<i>Origanum × majoricum</i> Cambess.																			2.17	0.021	No evaluada
	Hierba de cancer	<i>Leonotis nepetifolia</i> (L.) R.Br.																			6.52	0.043	Preocupación menor
	Poleo	<i>Satureja brownei</i> (Sw.) Briq.																			8.69	0.043	Preocupacion menor
	Santa Polonia	<i>Hyptis</i> sp																			2.17	0.065	
	Toronjil de castilla	<i>Melissa officinalis</i> L.																			10.86	0.043	No evaluada
Lauraceae	Chaviaco	<i>Cinnamomum triplenerve</i> (Ruiz & Pav.) Kosterm																			4.34	0.043	Preocupacion menor
Lecythidaceae	Chupa	<i>Gustavia speciosa</i> (Kunth) DC.																			8.69	0.021	En peligro
Leguminosae	"Choncho" o "Guandul"	<i>Ormosia coccinea</i> (Aubl.) Jacks.																			8.69	0.021	No evaluada
	Acacia	<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit																			2.17	0.043	Preocupación menor
	Alcaparro	<i>Senna spectabilis</i> (DC.) H.S.Irwin & Barneby																			2.17	0.043	Preocupacion menor
	Ariza	<i>Brownea ariza</i> Benth.																			13.04	0.065	Preocupacion menor
	Balu	<i>Erythrina edulis</i> Micheli																			8.69	0.021	Preocupacion menor
	Casco de vaca	<i>Bauhinia picta</i> (Kunth) DC.																			2.17	0.043	No evaluada
	Dormidera	<i>Mimosa pudica</i> L.																			8.69	0.086	Preocupacion menor
	Guamo copero	<i>Inga spectabilis</i> (Vahl) Willd.																			2.17	0.21	Preocupacion menor
	Mariquito	<i>Caesalpinia pulcherrima</i> (L.) Sw.																			2.17	0.21	Preocupacion menor
	Matarraton	<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Walp.																			23.91	0.21	No evaluada
	Muche, Carbonero	<i>Albizia carbonaria</i> Britton																			2.17	0.043	No evaluada
	Ojo de Buey, Jaguey	<i>Mucuna holtonii</i> (Kuntze) Moldenke																			10.86	0.21	No evaluada
	Payande	<i>Pithecellobium dulce</i> (Roxb.) Benth.																			2.17	0.043	Preocupacion menor
	Pionias	<i>Abrus precatorius</i> L.																			2.17	0.043	Preocupacion menor
	Saman	<i>Samanea saman</i> (Jacq.) Merr.																			4.34	0.043	No evaluada
	Sarapato	<i>Entada gigas</i> (L.) Fawc. & Rendle																			2.17	0.21	No evaluada
	Tamarindo	<i>Tamarindus indica</i> L.																			2.17	0.21	No evaluada
	Trencilla o cargadita	<i>Zornia diphylla</i> (L.) Pers.																			6.52	0.21	No evaluada

Loranthaceae	Hierba de pajarito	<i>Phthirusa pyrifolia</i> (Kunth) Eichler																			2.17	0.21	No evaluada
Lythraceae	Diosme	<i>Cuphea carthagenensis</i> (Jacq.) J.F. Macbr.																			2.17	0.21	Preocupacion menor
	Granada	<i>Punica granatum</i> L.																			6.52	0.043	No evaluada
	Hierba de Cristo	<i>Cuphea</i> sp.																			4.34	0.21	No evaluada
Malvaceae	Balso	<i>Ochroma pyramidale</i> (Lam.) Urb.																			6.52	0.21	No evaluada
	Algodón	<i>Gossypium barbadense</i> L.																			4.34	0.21	No evaluada
	Cacao	<i>Theobroma cacao</i> L.																			2.17	0.043	No evaluada
	Cadillo	<i>Triumfetta lappula</i> L.																			4.34	0.043	Preocupacion menor
	Cayena	<i>Hibiscus rosa-sinensis</i> L.																			6.52	0.065	No evaluada
	Ceiba	<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn.																			6.52	0.043	No evaluada
	Escobo real	<i>Sida acuta</i> Burm. f.																			8.69	0.021	No evaluada
	Guácimo	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.																			15.21	0.043	Preocupacion menor
	Malva	<i>Malachra rudis</i> Benth.																			4.34	0.13	No evaluada
	Verbena o "hierba sagrada"	<i>Triumfetta mollissima</i> Kunth																			10.86	0.13	No evaluada
Marantaceae	Payaca o Morrapos	<i>Calathea crotalifera</i> S. Watson																			19.56	0.043	No evaluada
Melastomataceae	Caña Agria	<i>Arthrostenma ciliatum</i> Pav. ex D. Don																			13.04	0.086	No evaluada
	Mucura	<i>Clidemia hirta</i> (L.) D. Don																			2.17	0.021	No evaluada
	Tuno	<i>Miconia</i> sp																			4.32	0.021	No evaluada
Meliaceae	Cedro	<i>Cedrela montana</i> Turcz.																			8.69	0.021	Casi amenazada
Moraceae	Árbol de pan	<i>Artocarpus altilis</i> (F.A. Zorn) Fosberg																			4.34	0.065	No evaluada
	Caucho	<i>Ficus</i> sp																			8.69	0.043	No evaluada
	Dinde	<i>Maclura tinctoria</i> (L.) Steud.																			2.17	0.021	Preocupacion menor
	Higuerón	<i>Ficus insipida</i> Willd.																			6.52	0.043	No evaluada
	Matapalo	<i>Ficus pallida</i> Vahl																			2.17	0.021	No evaluada
	Suerpas	<i>Brosimum utile</i> (Kunth) Oken																			8.69	0.021	No evaluada
Myrtaceae	Arrayan	<i>Myrcia cf. Cucullata</i> O. Berg																			4.34	0.021	No evaluada
	Guayabo agrio	<i>Psidium guineense</i> Sw.																			4.34	0.021	No evaluada
	Pomarroso, carbonero	<i>Syzygium jambos</i> (L.) Alston																			4.34	0.021	No evaluada
Oleaceae	Corona, Jazmin	<i>Jasminum multiflorum</i> (Burm.f.) Andrews																			2.17	0.043	No evaluada
Orchidaceae	noche buena	<i>Odontoglossum</i> sp																			2.17	0.021	No evaluada
	Orquídea	<i>Cattleya trianae</i> Linden & Rehb.f.																			4.34	0.043	En peligro
Orobanchaceae	Azafrán	<i>Escobedia grandiflora</i> (L.f.) Kuntze																			2.17	0.021	Preocupacion menor
Oxalidaceae	Cedera	<i>Oxalis filiformis</i> Kunth																			6.52	0.021	Preocupacion menor
Phytolaccaceae	Anamú	<i>Petiveria alliacea</i> L.																			4.34	0.021	Preocupacion menor
	Guaba	<i>Phytolacca bogotensis</i> Kunth																			2.17	0.021	Preocupacion menor
Piperaceae	Cordoncillo	<i>Piper bogotense</i> C. DC.																			4.34	0.043	No evaluada
Plantaginaceae	Paraguay	<i>Scoparia dulcis</i> L.																			6.52	0.043	Preocupacion menor
	Yanten	<i>Plantago major</i> L.																			10.86	0.086	Preocupacion menor
Pleurotaceae	Orejas	<i>Pleurotus ostreatus</i> (Jacq.: Fr.) Kumm.																			13.04	0.021	No evaluada
Poaceae	Caminadora	<i>Rottboellia cochinchinensis</i> (Lour.) Clayton																			2.17	0.021	No evaluada
	Caña brava	<i>Gynerium sagittatum</i> (Aubl.) P. Beauv.																			4.34	0.021	No evaluada
	Pasto Micay	<i>Axonopus scoparius</i> (Flüggé) Kuhlm.																			4.34	0.021	Preocupacion menor
	Toronjil de pasto	<i>Cymbopogon citratus</i> (DC.) Stapf																			28.26	0.043	No evaluada
	Yaragua (pasto)	<i>Melinis minutiflora</i> P. Beauv.																			2.17	0.021	No evaluada

<i>Polygalaceae</i>	Sarpoleta	<i>Polygala paniculata</i> L.																		13.04	0.043	No evaluada
<i>Portulacaceae</i>	Verdolaga	<i>Portulaca oleracea</i> L.																		2.17	0.043	No evaluada
<i>Rosaceae</i>	Frambuesa	<i>Rubus rosifolius</i> Sm.																		2.17	0.021	No evaluada
<i>Rubiaceae</i>	Jago	<i>Genipa americana</i> L.																		10.86	0.021	Preocupacion menor
	Quina, Cascarillo	<i>Cinchona pubescens</i> Vahl																		6.52	0.021	No evaluada
	Quino	<i>Ladenbergia oblongifolia</i> (Mutis) L.Andersson																		2.17	0.021	No evaluada
	Uña de Gato	<i>Uncaria guianensis</i> (Aubl.) J.F.Gmel.																		4.34	0.043	No evaluada
<i>Rutaceae</i>	Cidra	<i>Citrus medica</i> L.																		6.52	0.043	No evaluada
	Ruda	<i>Ruta graveolens</i> L.																		13.04	0.043	No evaluada
<i>Salicaceae</i>	Hueso	<i>Hasseltia floribunda</i> Kunth																		2.17	0.021	No evaluada
<i>Sapindaceae</i>	Michu	<i>Sapindus saponaria</i> L.																		8.69	0.043	No evaluada
<i>Sapotaceae</i>	Maco	<i>Pouteria lucuma</i> (Ruiz & Pav.) Kuntze																		2.17	0.021	No evaluada
<i>Siparunaceae</i>	Limoncillo	<i>Siparuna aspera</i> (Ruiz & Pav.) A.DC.																		4.34	0.043	No evaluada
<i>Solanaceae</i>	Árbol de pepito, Tomatillo	<i>Solanum cf ovalifolium</i>																		4.34	0.043	No evaluada
	Hierba mora	<i>Solanum americanum</i> Mill.																		6.52	0.086	Preocupacion menor
	Tinto	<i>Cestrum</i> sp																		8.69	0.043	No evaluada
	Uchuva	<i>Physalis peruviana</i> L.																		4.34	0.065	No evaluada
<i>Urticaceae</i>	Ortiga blanca	<i>Urtica urens</i> L.																		4.34	0.021	No evaluada
	Palitaria	<i>Pilea hyalina</i> Fenzl																		6.52	0.021	No Evaluada
	Pringamoza o pica pica	<i>Urera baccifera</i> (L.) Wedd.																		6.52	0.043	Preocupacion menor
	Ramio	<i>Boehmeria nivea</i> (L.) Gaudich.																		4.34	0.021	No evaluada
<i>Verbenaceae</i>	Curalotodo	<i>Lippia alba</i> (Mill.) N.E.Br. ex Britton & P. Wilson																		41.30	0.19	Preocupacion menor
	Oregano de monte	<i>Lippia organoides</i> Kunth																		2.17	0.021	No evaluada
	Taponcito	<i>Lantana urticifolia</i> Mill.																		4.34	0.021	Preocupacion menor
	Venturoso	<i>Lantana camara</i> L.																		10.86	0.065	Preocupacion menor
	Verbena blanca	<i>Verbena litoralis</i> Kunth																		2.17	0.043	Preocupacion menor
<i>Vitaceae</i>	Agraz	<i>Vitis cf. Tilifolia</i>																		10.86	0.043	No evaluada
<i>Zingiberaceae</i>	Maracas	<i>Zingiber spectabile</i> Griff.																		4.34	0.021	No evaluada
<i>No identifica</i>	Guarapos	<i>Especie no identificada</i>																		23.91	0.021	No evaluada

Estado del conocimiento de uso

La población entrevistada manifestó que un 86.9 % transmite el conocimiento de uso a otras personas, y el 87 % afirmó que este conocimiento es transmitido de generación en generación. El 89.1 % indicó que usa las especies en su núcleo familiar. Todos los encuestados coincidieron en que desde niños reciben este conocimiento.

Un 67.4 % de la comunidad considera que generaciones anteriores daban mayor importancia al uso tradicional de las plantas; el 54.3 % afirmó que antes tenían una mayor frecuencia de uso, y el 65.2 % expresó su convicción de que el conocimiento se perdería con el tiempo.

Existe una relación notable entre el uso medicinal en el núcleo familiar y la transmisión del conocimiento, mientras que los usos de otras categorías se muestran independientes a estas variables (figura 5).

Por otra parte, la comunidad que cree que prevalecerá el conocimiento en el tiempo citó principalmente las categorías medicinal y cultural (figura 6).

Figura 5. Análisis de componentes principales en las categorías de uso más importantes y las variables transmisión del conocimiento y uso familiar

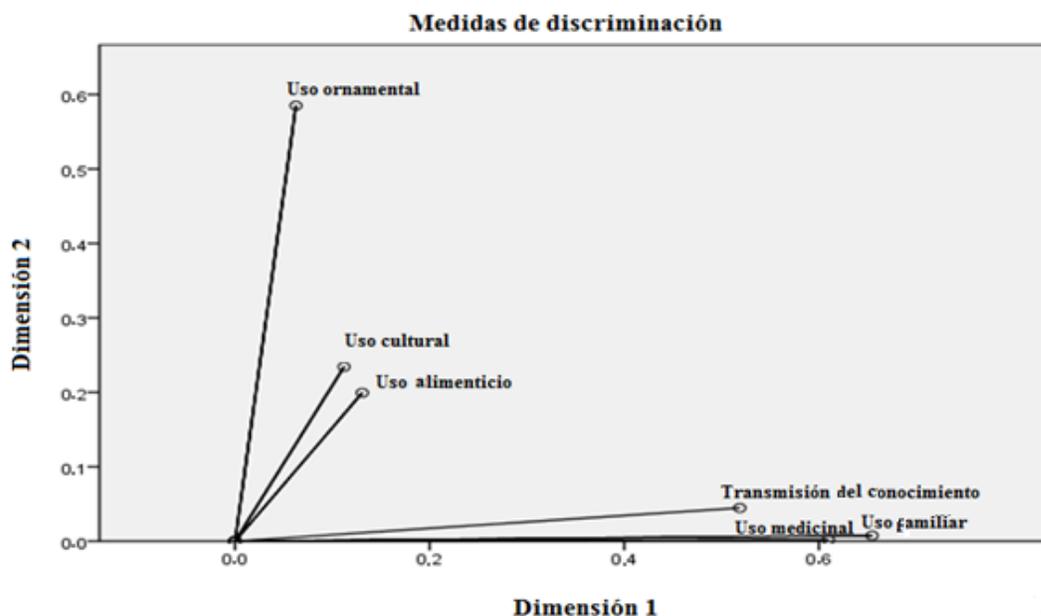
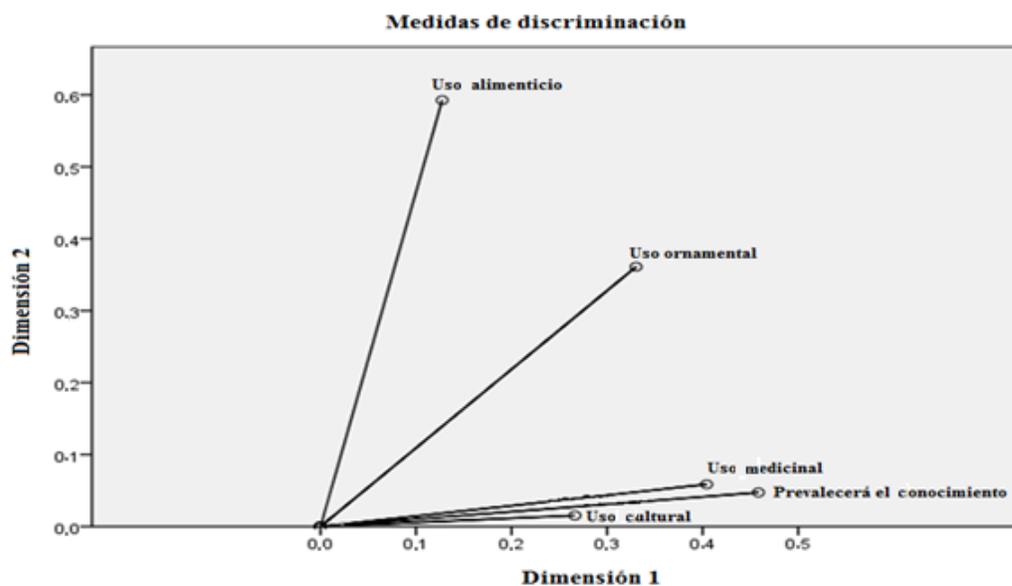


Figura 6. Análisis de componentes principales en las categorías de uso más importantes y la variable prevalencia del conocimiento



DISCUSIÓN

Composición florística

El presente estudio determinó que en el municipio de Nocaïma hay una amplia presencia de especies no maderables, algo que contrasta con los estudios realizados por Arango (2004), Ariza *et al.* (2010), López y Cavalier (2007), y López, Navarro y Caleño (2016), que

reportan listas de productos forestales no maderables para la región andina. Entre esas especies, el presente estudio identificó 41 especies nativas que no han sido reportadas en las otras investigaciones.

Las familias Asteraceae y Leguminosae se reportan como las más frecuentes en estudios de productos forestales no maderables realizados en los Andes (López y Cavalier, 2007), lo que coincide con los resultados

obtenidos en este estudio; aun así, es importante señalar que las familias Malvaceae y Lamiaceae, a pesar de que en listados de los Andes no se encuentran reportadas entre las de mayor número de especies no maderables, tienen una alta frecuencia en el municipio de Nocaima.

De las especies obtenidas, el 78.3 % son nativas; este podría considerarse un indicador de la importancia de los bosques secundarios para la población, algo que reafirmaría lo expuesto por Smith, Sabogal y Kaimowitz (1997) sobre la multiplicidad de usos de la vegetación secundaria.

Categorías de uso

La categoría medicinal ha sido considerada la más representativa entre los productos forestales no made-

rables, tal y como se evidenció en este estudio, pues de las 262 especies citadas para los Andes colombianos, 93 se encuentran en el municipio de Nocaima (Ariza *et al.*, 2010, López y Cavalier, 2007).

De esas 93 especies, 21 no fueron reportadas por Bernal, García y Quevedo (2011) en el libro *Pautas para el conocimiento, conservación y uso sostenible de las plantas medicinales nativas en Colombia* (tabla 4). Por otro lado, solo 18 especies se registran en el listado de plantas medicinales aceptadas con fines terapéuticos aprobadas por el Invima (2015), entre las que se destacan las siguientes especies nativas: *Lippia alba* (Mill.) N.E.Br. ex Britton & P. Wilson, *Verbena litoralis* Kunth, *Phytolacca bogotensis* Kunth, *Jacaranda caucana* Pittier, *Urtica urens* L., *Petiveria alliacea* L., *Equisetum bogotense* Kunth y *Eryngium foetidum* L.

Tabla 4. Lista de especies no reportadas en el libro *Pautas para el conocimiento, conservación y uso sostenible de las plantas medicinales nativas en Colombia*

N.º	Familia	Nombre científico
1	<i>Orchidaceae</i>	<i>Cattleya trianae</i> Linden & Rchb.f.
2	<i>Verbenaceae</i>	<i>Lantana urticifolia</i> Mill.
3	<i>Urticaceae</i>	<i>Pilea hyalina</i> Fenzl
4	<i>Lamiaceae</i>	<i>Ocimum campechianum</i> Mill.
5	<i>Loranthaceae</i>	<i>Phthirusa pyrifolia</i> (Kunth) Eichler
6	<i>Malvaceae</i>	<i>Triumfetta mollissima</i> Kunth
7	<i>Asteraceae</i>	<i>Tagetes filifolia</i> Lag.
8	<i>Leguminosae</i>	<i>Caesalpinia pulcherrima</i> (L.) Sw.
9	<i>Bromeliaceae</i>	<i>Bromelia karatas</i> L.
10	<i>Solanaceae</i>	<i>Solanum ovalifolium</i> Dunal
11	<i>Asteraceae</i>	<i>Porophyllum ruderale</i> (Jacq.) Cass.
12	<i>Lauraceae</i>	<i>Cinnamomum triplinerve</i> (Ruiz & Pav.) Kosterm.
13	<i>Melastomataceae</i>	<i>Arthrostemma ciliatum</i> D.Don
14	<i>Siparunaceae</i>	<i>Siparuna aspera</i> (Ruiz & Pav.) A.DC.
15	<i>Asteraceae</i>	<i>Bidens subalternans</i> DC.
16	<i>Arecaceae</i>	<i>Ceroxylon sasaimae</i> Galeano
17	<i>Oxalidaceae</i>	<i>Oxalis filiformis</i> Kunth
18	<i>Euphorbiaceae</i>	<i>Croton smithianus</i> Croizat
19	<i>Acanthaceae</i>	<i>Razisea spicata</i> Oerst.
20	<i>Euphorbiaceae</i>	<i>Euphorbia cotinifolia</i> L.
21	<i>Asteraceae</i>	<i>Heterosperma achaetum</i> S.F.Blake

La categoría alimenticia fue la segunda más importante en esta investigación, en contraste con lo presentado por López y Cavelier (2007), para quienes las categorías ornamental, artesanal y combustible tienen una mayor relevancia.

Índices etnobotánicos

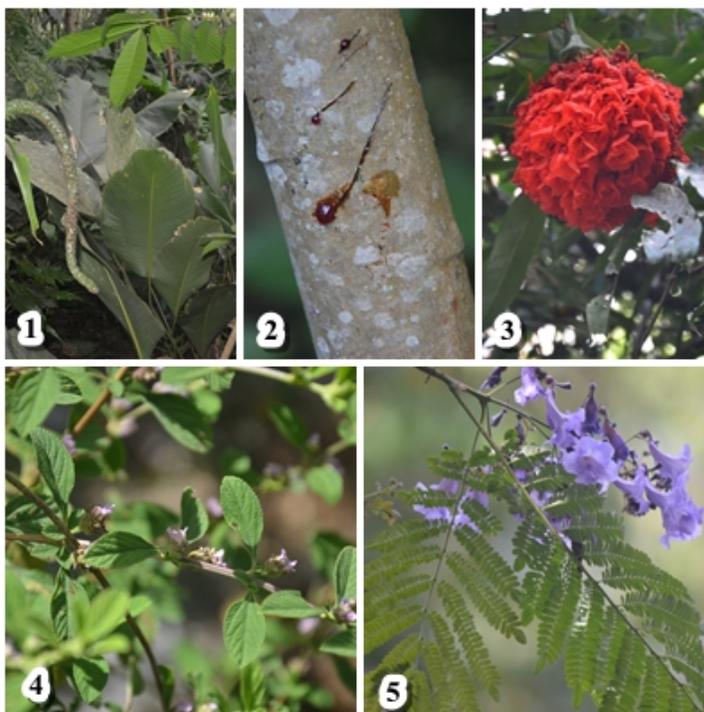
De acuerdo con los criterios establecidos por Garibaldi y Turner (2004) y los índices de nivel de uso significativo (NS) e importancia cultural (IC), se destaca la especie *Lippia alba* (Mill.) N.E.Br. ex Britton & P. Wilson, por tener una gran aceptación y variedad de usos reconocidos y citados por la comunidad, por lo cual resulta ser una especie importante para la identidad cultural del municipio, y también desde un punto de vista etnobotánico.

Según el índice de factor de consenso (FC), resulta evidente que, en las categorías alimenticia, tintes, medicinal y mágico-religiosa, existe un intercambio considerable de información. Además, en la figura 4 se observa unanimidad en la mayoría de ellas, lo que

prueba que existe un acuerdo entre las personas respecto al uso de las plantas. Esto evidencia la existencia de una robusta red de intercambio de conocimientos dentro de la comunidad local, y sugiere elementos para una estrategia de conservación participativa.

Es de destacar que la mayoría de las especies que tienen los valores más altos en cada uno de los índices calculados son especies nativas de los bosques secundarios, lo que facilita la priorización de especies para la conservación de la diversidad ecológica y cultural en procesos de restauración e implementación de sistemas agroecológicos acompañados por la comunidad (Ticktin y Spoon, 2010; Orlove y Brush, 1996), procesos para los que se sugieren las siguientes especies: *Lippia alba* (Mill.) N.E.Br. ex Britton & P. Wilson, *Carludovica palmata* Ruiz & Pav., *Calathea crotalifera* S. Watson, *Trichanthera gigantea* (Humb. & Bonpl.) Nees, *Adenostemma* sp, *Ageratum conyzoides* (L.) L., *Ocimum campechianum* Mill., *Equisetum bogotense* Kunth, *Guazuma ulmifolia* Lam., *Jacaranda caucana* Pittier, *Triumfetta mollissima* Kunth, *Malachra rudis* Benth., *Solanum americanum* Mill., *Brownea ariza* Benth., *Arthrostemma ciliatum* D. Don y *Croton smithianus* Croizat.

Figura 7. *Calathea crotalifera* S.Watson (1), *Croton smithianus* Croizat (2), *Brownea ariza* Benth (3), *Lippia alba* (Mill.) N.E.Br. ex Britton & P. Wilson (4), *Jacaranda caucana* Pittier (5)



Estado del conocimiento de uso

Entre los factores que influyen en la disminución del uso tradicional de las plantas y la pérdida del conocimiento en las comunidades se encuentran la desaparición de los bosques a causa de actividades como la agricultura y la ganadería (Ariza, Toro y Lores, 2009; Miles, Newton, Fries, May y Gordon, 2006), en especial por el monocultivo de caña panelera (Cifuentes, 2015), el desinterés de las generaciones jóvenes por el valor de uso de las especies autóctonas (Ladio, Morales y Rapoport, 2007; Mena, Poli y Almansa, 2016), así como la migración de estos a las ciudades (Moreno, 2005, citado en Ariza *et al.* 2010) y la preferencia de productos comerciales procesados a los tradicionales.

Asimismo, la categoría medicinal constituye uno de los usos más importantes para las familias. Usma (2003) y Angulo, Rosero y González (2012) ya habían mencionado este uso como clave en el desarrollo, subsistencia y seguridad médica de las comunidades locales. Del análisis de componentes principales (figuras 5 y 6) se infiere que solo las personas que hacen uso de las plantas medicinales consideran que el conocimiento prevalecerá, lo que explica por qué la mayoría de personas que dicen transmitir el conocimiento a otras hacen uso de las plantas medicinales en el núcleo familiar y consideran que este conocimiento se mantendrá. Este elemento se constituye en la base de la recuperación del conocimiento ancestral y posibilitará la inserción de dicho conocimiento en la modernidad. Este contexto puede indicar que las plantas medicinales son una fuente valiosa para el desarrollo y la cultura de las familias que conviven con el bosque secundario del municipio de Nocaima.

CONCLUSIONES

En el municipio de Nocaima se les da una gran variedad de usos a los bosques secundarios, usos que permanecen en la memoria de algunos de sus habitantes y que pueden considerarse el cimiento de una identidad ecosistémica y cultural interesada en la conservación del recurso forestal y el conocimiento tradicional.

Potencialmente, las especies encontradas pueden posibilitar el establecimiento de sistemas agroecológicos que rescaten el valor y la importancia de las especies propias del bosque secundario como una alterna-

tiva al actual modelo de producción agrícola, lo cual facilitaría el desarrollo sostenible del recurso forestal.

Las especies más representativas satisfacen necesidades básicas de tipo medicinal y alimenticio del núcleo familiar. En general, el conocimiento del uso tradicional de los productos forestales no maderables aún es transmitido, pero es posible que desaparezca con el tiempo. Por esta razón, es importante rescatar y recuperar el saber tradicional sobre los usos de la vegetación nativa de los bosques, como una herramienta que facilitaría la unión social y el desarrollo sostenible local.

AGRADECIMIENTOS

A la comunidad de las veredas el Jagual, San Juanito, Tobia, San Pablo, San Cayetano, La Concepción, San José y Loma Larga del municipio de Nocaima, por contribuir con su valioso conocimiento, en especial a don Jacobo Masías, Francly Laverde, la profesora Nelly Camacho y la familia Bohórquez Guzmán.

Al Herbario Forestal UDBC de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, los semilleros de investigación Productos y Procesos del Bosque (Proprobos) y Producción y Manejo Forestal (Promafor), a Teresa Carolina Cifuentes y el ingeniero Mario Alberto León Amaya.

REFERENCIAS

- Angulo, A. F., Rosero, R. A., y González, M. (2012). Estudio etnobotánico de las plantas medicinales utilizadas por los habitantes del corregimiento de Genoy, municipio de Pasto, Colombia. *Revista Universidad y Salud*, 14(2), 168-185.
- Arango, S. (2004). Estudios etnobotánicos en los Andes centrales (Colombia): Distribución del conocimiento del uso de las plantas según características de los informantes. *Lyonia*, 7(2), 89-104.
- Ariza, W., García, C., Ortiz, A., Bernal, J., Rodríguez, J., y Gutiérrez, L. (2010). Caracterización y usos tradicionales de productos forestales no maderables (PFNM) en el corredor de conservación

- Guantiva -La Rusia - Iguaque. *Revista Colombia Forestal*, 13(1), 117-140.
- Ariza, W., Toro, J., y Lores, A. (2009). Análisis florístico y estructural de los bosques premontanos en el municipio de Amalfi (Antioquia, Colombia). *Colombia Forestal*, 12, 81-102.
- Ariza, W. y Medina, R. (2006). *Guía para la identificación de las variedades de coca cultivadas en Colombia*. Presidencia de la República, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá.
- Bernal, H., García, M., y Quevedo, S. (2011). *Pautas para el conocimiento, conservación y uso sostenible de las plantas medicinales nativas en Colombia: Estrategia nacional para la conservación de plantas*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Beltrán, J. (2013). *Estimación y análisis de la cobertura de bosques del departamento de Cundinamarca a partir de imágenes de sensores remotos*. Unidad Administrativa especial de Bosques de Cundinamarca.
- Brown, S y Lugo, A. (1990). Tropical Secondary Forestry. *Journal of Tropical Ecology*, 6(1), 1-32.
- Cárdenas D., y López, R. (2000). Plantas útiles de la Amazonia colombiana, departamento del Amazonas: perspectivas de los productos forestales no maderables. Bogotá: CO-BAC, n.º Doc. 21273.
- Cárdenas, D., y Salinas, N. (2006). *Libro rojo de plantas de Colombia. Especies maderables amenazadas, primera parte*. Instituto Amazónico de Investigaciones científicas SINCHI. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá, 234.
- Castillo, R. (1995). Plant genetic resources in the Andes: Impact, conservation, and management. *Crop Science*, 35, 355-360.
- Cifuentes, T. (2015). *Proyecto ciudadano y comunitario de educación ambiental para el fortalecimiento y conocimiento de la biodiversidad ecosistémica en el predio Buenavista del municipio de Nocaima, Cundinamarca*. Alcaldía municipal de Nocaima, Secretaría de Desarrollo Económico, Agropecuario y Ambiental, 5-17.
- FAO (2004). Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina (documento de trabajo, informe nacional Colombia). Roma, 1-8.
- FAO (2007). Trade measures tools to promote the sustainable use of NWFP. An assessment of trade related instruments influencing the international trade in non-wood forest products and associated management and livelihood strategies. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/010/k0457e/k0457e00.HTM>
- FAO. (2012). *El estado de los bosques del mundo*. Roma, 1-6.
- Ford, R. (1978). *The nature and status of ethnobotany* (Anthropological Papers of Musseum of Anthropology, University of Michigan, n.º 67). Michigan: Ann Arbor.
- Frapolli, E., Toledo, V., y Martínez-Alier, J. (2008). Apropiación de la naturaleza por una comunidad maya yucateca: Un análisis económico-ecológico. *Revibec: Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 7, 27-42.
- Garibaldi, A., y Turner, N. (2004). Cultural keystone species: Implications for ecological conservation and restoration. *Ecology and Societ*, 9(3), 1.
- Gobernación de Cundinamarca. (2012). Acuerdo Intersectorial por la Madera Legal en Cundinamarca, 2012- 2017. Bogotá: Bosques de Cundinamarca, Unidad Administrativa Especial.
- González, J., y López, L. (2009). *Caracterización de los productos forestales no maderables (PFNM) e identificación de usos tradicionales en la vereda Patios Altos y Canadá, municipio de Encino, Batán y Yure, municipio de Coromoro (Santander)* (tesis de pregrado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Ideam (2015). *Sistema de monitoreo de bosques y carbono del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Bogotá: Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.

- Invima (2015). *Listado de plantas medicinales aceptadas con fines terapéuticos*. Disponible en <https://www.invima.gov.co/images/pdf/sasalasespecializadas/naturales/2015/ListadodePlantasdiciembre2015publicar.pdf>.
- Izquierdo, J., y Roca, W. (1998). Under-utilized Andean food crops: Status and prospects of plant biotechnology for the conservation and sustainable agricultural use of genetic resources. *Acta Horticulturae*, 475, 157-172.
- Katewa, S., Chaudhry, L., y Jain, A. (2004). Folkherbal medicines from tribal area of Rajasthan, India. *Journal of Ethnopharm*, 92(1), 41-46.
- Kvist, L, Oré, I., Gonzales, A. y Llapapasca. C. (2001). Estudio de plantas medicinales en la Amazonía Peruana: una evaluación de ocho métodos etnobotánicos. *Folia Amazónica*, 12(1-2), 53-75.
- Ladio, A., Molares, S., y Rapoport, E. (2007). Conocimiento etnobotánico de plantas comestibles entre los maestros patagónicos: Patrones de variación ambiental oeste-este. *Kurtziana*, 33(1), 141-152.
- López, R., y Cavelier, I. (2007). Productos forestales no maderables en los Andes colombianos: Una aproximación a su conocimiento y monitoreo (pp. 93-108.). En D. Armenteras y N. Rodríguez (eds.), *Monitoreo de los ecosistemas andinos 1985-2005: Síntesis*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- López, R., Navarro, J., y Caleño, B. (2016). *Productos forestales no maderables de Corpochivor: Una mirada a los regalos del bosque*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas y Corpochivor.
- Martin, G. (2000). *People and plants conservation manuals. Ethnobotany a methods manual*. Chapman & Hill, WWF International, Unesco. Royal Botanic Gardens. 22 Pg.
- Mena, A., Poli, M. S., y Almansa, L. (2016). Sistemas de transmisión del conocimiento etnobotánico de plantas silvestres comestibles en Turbo, Antioquia, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(1), 133-143.
- Miles, L., Newton, R., Fries, C., May, S. y Gordon, J. (2006). A global overview of the conservation status of tropical dry forest. *Journal of Biogeography*, 33(3), 492.
- Miranda, M., Velázquez, D., y Bermúdez, A. (2005). La investigación etnobotánica sobre plantas medicinales: Una revisión de sus objetivos y enfoques actuales. *Interciencia: Revista de Ciencia y Tecnología de América*, 30(8), 453-459.
- Moreno, E., y Linares, C. (2005). *Estudios etnobotánicos de las plantas medicinales de San José de Suita. Santander, Colombia* (tesis de pregrado, Biología). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Orlove, S., y Brush, B. (1996). Anthropology and the conservation of biodiversity. *Annual Review of Anthropology*, 25, 329-352, doi: <http://10.1146/annurev.anthro.25.1.329>
- Padulosi, S., Eyzaquirre, P. & Hodgkin, T. (1999). Challenges and strategies in promoting conservation and use of neglected and under-utilized crop species. En J. Janick (ed.), *Perspectives on new crops and new uses* (pp. 140-145). Alexandria: ASHS Press.
- Poorter, L., Bongers, F., Aide, T. M., Zambrano, A. M. A., Balvanera, P., Becknell, J. M., y Craven, D. (2016). Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature*, 530(7589), 211-214.
- Schultes, R. E. (1939). La etnobotánica: su alcance y sus objetos. *Caldasia*, 3, 7-12.
- Smith, J., Sabogal, C., Wil, J. y Kaimowitz, D. (1997). bosques Secundarios como recurso para el desarrollo rural y la conservación ambiental en los trópicos de América Latina. *Indonesia*. 2-6
- Tabuti, J., Lye, K., y Dhillion, S. (2003). Traditional herbal drugs of Bulamogi, Uganda: Plants use and administration. *Journal of Ethnopharm*, 88(2003), 19-44.
- Tardío, J., y Pardo de Santayana, M. (2008). Cultural importance indices: A comparative analysis based on the useful wild plants of Southern Cantabria (Northern Spain). *Economic Botany*, 62(1), 24-39.

- Ticktin, T., y Spoon, J. (2010). Ethnobiology and Conservation. *Encyclopedia of Life Support Systems*. Oxford (UK): Unesco, Eolss Publishers.
- Tinitana, F. (2014). Composición florística y etnobotánica de las diferentes formaciones vegetales de la provincia de Loja, Ecuador (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Toledo, V. (2005). La memoria tradicional: La importancia agroecológica en los saberes locales. *Leisa, Revista de Agroecología*, 20(4), 16-19.
- Toscano, J. (2006). Uso tradicional de plantas medicinales en la vereda San Isidro, municipio de San José de Pare, Boyacá: Un estudio preliminar usando técnicas cuantitativas. *Revista Acta Biológica Colombiana*, 11(2), 137-146.
- UICN (2008). *IUCN Red List of Threatened Species*. Disponible en: <http://www.iucnredlist.org>
- Usma, C. (2003). Manejo de flora silvestre aprovechada por la comunidad wounaan San Bernardo, en el río San Juan (Valle-Chocó), Colombia. *Revista Universidad Tecnológica del Chocó*, 2, 42-57.
- Vicente, J. (2005). Guía básica para el conocimiento de la investigación etnográfica. 30 PP. Disponible en: http://www.elcantodelamusa.com/docs/2010/diciembre/doc4_guiabasica.pdf
- Zuluaga, G. (1994). *El aprendizaje de las plantas en la senda de un conocimiento olvidado: Etnobotánica medicinal*. Bogotá: Seguros Bolívar.

Simulación dinámica de una alternativa de generación de energía a partir de residuos

Giselle Ramírez Flórez¹, Luisa F. Giraldo Correa², Natalia Tabares Urrea³,
Juan C. Osorio Gómez^{4*}

¹ Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Industrial
Calle 13 n.º 100-00, Cali, Colombia.
<http://orcid.org/0000-0002-9143-7595>

² Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Industrial
Calle 13 n.º 100-00, Cali, Colombia.
<http://orcid.org/0000-0002-9298-9092>

³ Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Industrial
Calle 13 n.º 100-00, Cali, Colombia.
<http://orcid.org/0000-0001-6492-3697>

⁴ Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Industrial, Grupo de Estudio Dinámica de Sistemas, Calle 13 n.º 100-00, Cali, Colombia.
<http://orcid.org/0000-0001-5625-5609>

*Autor para correspondencia: juan.osorio@correounivalle.edu.co

RESUMEN

A nivel mundial, la creciente generación de residuos sólidos corre pareja con una demanda de energía eléctrica que aumenta continuamente. Estos dos problemas en conjunto impactan el ambiente incrementando las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Para manejar los residuos sólidos se han planteado alternativas como la reutilización, el reciclaje o el reúso. Adicionalmente, se ha propuesto el *waste to energy* como una alternativa para generar energía a partir de los residuos. En este documento se plantea la comparación de los efectos ambientales asociados a la incineración de residuos (*waste to energy*) con las alternativas de reúso o reciclaje. El modelo planteado mediante la dinámica de sistemas se valida confrontándolo con la información que se tiene en Colombia sobre los residuos de envases plásticos. El modelo de simulación compara los efectos en cinco indicadores ambientales, encontrándose que dichos indicadores se ven favorecidos en algunos escenarios, pero que es necesario continuar investigando en el tema para tener resultados concluyentes y definitivos. Los resultados y las conclusiones buscan aportar elementos para mejorar los procesos de toma de decisión en este aspecto y abren un camino para continuar la investigación en este tema.

Citation: Ramírez Flórez, G., Giraldo Correa, L.F., Tabares Urrea, N. y Osorio Gómez, J. C., (2017). Simulación dinámica de una alternativa de generación de energía a partir de residuos. *Mutis* 7(1), 67-77, doi:<http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1191>

Received: Marzo 03, 2016. **Accepted:** Abril 14, 2016. **Published on line:** Mayo 1, 2017.

Copyright: ©2017 Ramírez Flórez, G., Giraldo Correa, L. F., Tabares Urrea, N. y Osorio Gómez, J. C. This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

Palabras clave: waste to energy, dinámica de sistemas, Colombia, reciclaje, envases plásticos.

Dynamic simulation of an alternative waste to energy

ABSTRACT

Both problems, the growing solid waste generation and electricity demand continually growing impact the environment by increasing emissions of CO₂ to the atmosphere. In relation to the solid waste



management, alternative as reuse, recycling or reuse have been raised. In addition, Waste to energy appears as an alternative to generate energy from waste. In this paper a comparison of the environmental effects associated with waste incineration (waste to energy) versus alternative reuse or recycling is proposed. The model proposed by system dynamics is validated with information related to plastic packaging waste in Colombia. The model compares the effects on five environmental indicators, finding that such indicators are favored in some scenarios, but is necessary more research on the subject to will be conclusive and definitive results. The results and conclusions provide elements to improve decision-making processes in this area and encourage future researches in the subject.

Keywords: waste to energy, system dynamics, Colombia, recycling, plastic containers.

INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN DE LA LITERATURA

Los rellenos sanitarios son una de las fuentes más importantes de emisiones gaseosas. Las emisiones en los rellenos sanitarios contienen principalmente metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), de 45 a 55 % y 30 a 40 %, respectivamente, ambos considerados gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global (Jönsson *et al.*, 2003). La cantidad de residuos sólidos urbanos (RSU) que se generan cada año está aumentando rápidamente, por lo cual la gestión de estos es uno de los temas más relevantes de la sociedad moderna impulsada por la necesidad de hacer frente a una producción total de residuos que, desde 1995, ha tenido un aumento considerable (OECD, 2013).

Ante la crítica situación que viven las ciudades por la creciente cantidad de residuos sólidos urbanos que generan, y con ello, la demanda incesante de nuevos sitios para su disposición final, comienzan a evaluarse diferentes tecnologías para el tratamiento de dichos residuos (Greenpace, 2011).

Una de las opciones consideradas usualmente para disminuir los RSU consiste en la incineración o combustión de estos. La utilización de energía a partir de

los residuos se puede dividir en varios grupos, dependiendo de si estos residuos son incinerados o si solo se produce un combustible para una utilización posterior. Uno de los argumentos con que la incineración busca obtener apoyo es que genera una energía que se presenta como renovable. Poletto y Da Silva (2009) señalan que la quema controlada de los RSU, cuando se realiza en instalaciones con dispositivos adecuados de control de la contaminación del aire, es una solución definitiva al problema, que tiene bajo impacto ambiental y se vale de criterios técnicos adecuados.

Por otra parte, la generación de electricidad, calor o biocombustibles a partir de fuentes de energía renovables se ha convertido en prioridad en las estrategias de política energética a escala global (Amigun, Musango y Stafford, 2011). Según Nijkamp y Kourtit (2013), las ciudades consumen el 75 % de la energía producida a nivel mundial y generan el 80 % de las emisiones de CO_2 ; de allí que tenga sentido intentar reducir la emisión de gases provenientes de los residuos mediante el uso de estos para generar energía.

Los residuos han sido identificados como una fuente de energías amigables con el ambiente, y su uso es considerado un método efectivo para reducir las emisiones de gases al ambiente (El Hanandeh y El Zein, 2011). Visto de esta manera, la *waste to energy* (WtE) representa una excelente oportunidad para enfrentar dos problemas relevantes de las sociedades actuales: la generación de energía a partir de fuentes renovables y amigables con el ambiente, y la correcta disposición y utilización de los residuos sólidos que se generan permanentemente.

La dinámica de sistemas es una metodología que permite evaluar políticas y comportamientos de los sistemas complejos a mediano y largo plazo mediante el estudio de las variables y sus conexiones. Por medio de la simulación dinámica se pueden estudiar los posibles resultados de las decisiones estratégicas que se tomen en un sistema determinado. Esta metodología contempla los bucles de retroalimentación existentes en los sistemas y permite estudiar los cambios posibles a largo plazo. Ha sido ampliamente aplicada desde su creación, en la década de los cincuenta, y existen múltiples trabajos en diversos campos, tales como la ecología, la economía y la ingeniería, y últimamente se vienen presentando notables desarrollos en temas ambientales y de sostenibilidad. Existen diversos softwares que permiten el desarrollo y evaluación de

estos modelos, entre ellos los más conocidos son el Vensim, Stella y Powersym.

En términos generales, la dinámica de sistemas (DS) tiene como objetivo capturar las características de los sistemas dinámicos por medio de la modelación y la simulación (Schwaninger y Pérez Ríos, 2008). (Nuhoğlu y Nuhoğlu, 2007) la definen como una metodología para analizar los componentes de un sistema que incluye relaciones de causa-efecto, con formulaciones lógicas, demoras en el tiempo y bucles de retroalimentación.

Respecto al uso de la dinámica de sistemas en temas similares al presentado en este artículo, se puede mencionar a Dyson y Chang (2005), quienes usan la dinámica de sistemas para predecir la cantidad de generación de residuos en una zona urbana de rápido crecimiento, con un caso de estudio en la ciudad de San Antonio (Texas). Bazbauers, Berzina y Davidsen (2014) usan la dinámica de sistemas para evaluar políticas de regulación en la disposición final de los residuos de material de empaque, con el propósito de determinar la eficiencia de esas políticas en relación con la disminución de esos residuos en los rellenos sanitarios. Simonetto, Modro y Dalmolin (2013) utilizan la dinámica de sistemas para evaluar el comportamiento de los residuos generados en Brasil, el efecto del reciclaje y su impacto en la política energética, y brindan elementos que soportan los procesos de toma de decisiones en este aspecto. Por otro lado, Wäger y Hilty (2002) utilizan la dinámica de sistemas para evaluar el comportamiento de los residuos plásticos y proponen un modelo de soporte a la toma de decisiones en este aspecto. Feng, Chen y Zhang (2013) desarrollan un modelo de dinámica de sistemas para evaluar el consumo de energía eléctrica en Beijing y la emisión de CO₂ asociada; utilizan para su modelo de simulación el software Stella.

Si bien Ahmad (2012) no evalúa el tema de la generación de energía, presenta un modelo de dinámica de sistemas para la gestión de los residuos sólidos municipales en Delhi, donde explora algunas políticas de gestión de los mismos. Cimren, Bassi y Fiksel (2010) también evalúan políticas sobre la gestión de los residuos sólidos, pero este trabajo se hace en Ohio, Estados Unidos. Finalmente, Dasgupta (2014) presenta un modelo de dinámica de sistemas en el que evalúa la posibilidad de generar energía eléctrica a partir de los residuos sólidos una vez han sido llevados al relleno

sanitario. Su trabajo es desarrollado en la ciudad de Bhopal, India.

Esta revisión incluye los más recientes e importantes trabajos en los que se involucra la dinámica de sistemas para la gestión de residuos orientada a la generación de energía, trabajos encontrados en las bases de datos académicas que gozan de mayor reconocimiento. Sin pretender ser exhaustiva, presenta los principales documentos existentes. También conviene mencionar que esta temática se ha venido extendiendo como área de interés, y que en la actualidad se vienen desarrollando importantes proyectos relacionados con la gestión de los residuos y la exploración de alternativas que permitan resolver la creciente problemática vinculada a los mismos.

En este artículo se estudia el impacto ambiental asociado a la generación de energía a partir de los residuos de envases de plástico, y se tomarán los datos específicos de Colombia. Para ello se ha desarrollado un modelo de dinámica de sistemas y se ha hecho una simulación utilizando el software Vensim DSS.

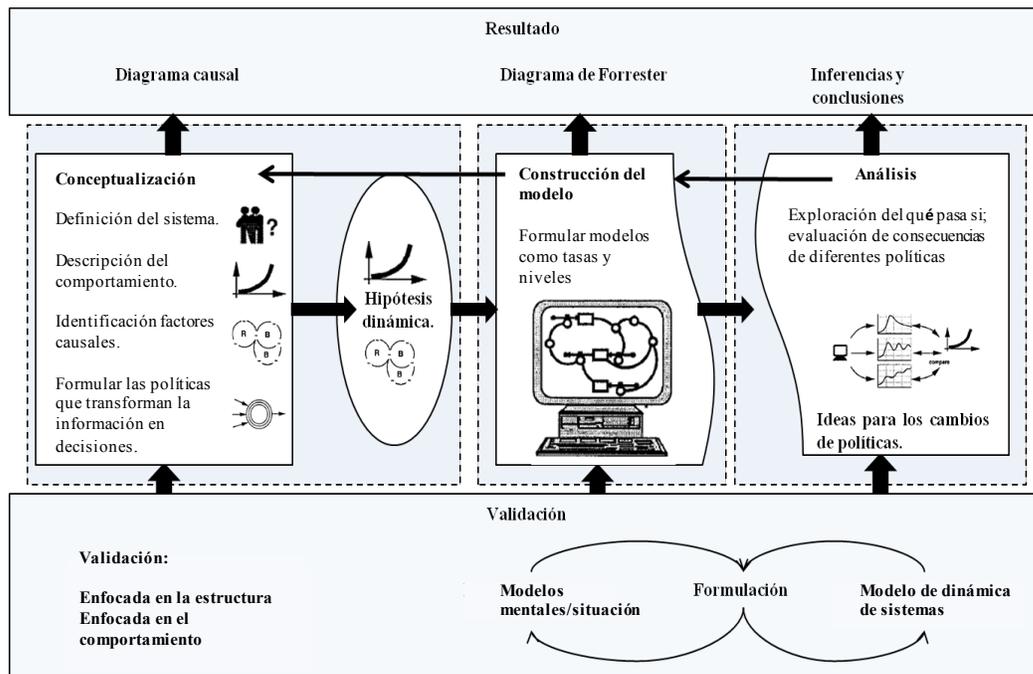
REPRESENTACIÓN SISTÉMICA

Aracil (1995) propone las siguientes fases para el desarrollo de un modelo de dinámica de sistemas:

1. Conceptualización del sistema
2. Construcción del modelo
3. Análisis

La figura 1 ilustra la secuencia de pasos descritos previamente. Las flechas indican pasos hacia atrás en el proceso, e indican que la modelación no consiste en recorrer secuencialmente estas etapas por orden correlativo, sino que en algunas ocasiones es necesario repetir una de ellas para reconsiderar algunos supuestos o variables. Es, por tanto, un proceso de modelado iterativo que combina elementos conceptuales y operativos de la DS (Narváez, 2012)

Figura 1. Etapas del proceso de modelación de Dinámica de Sistemas (Narváez, 2012)



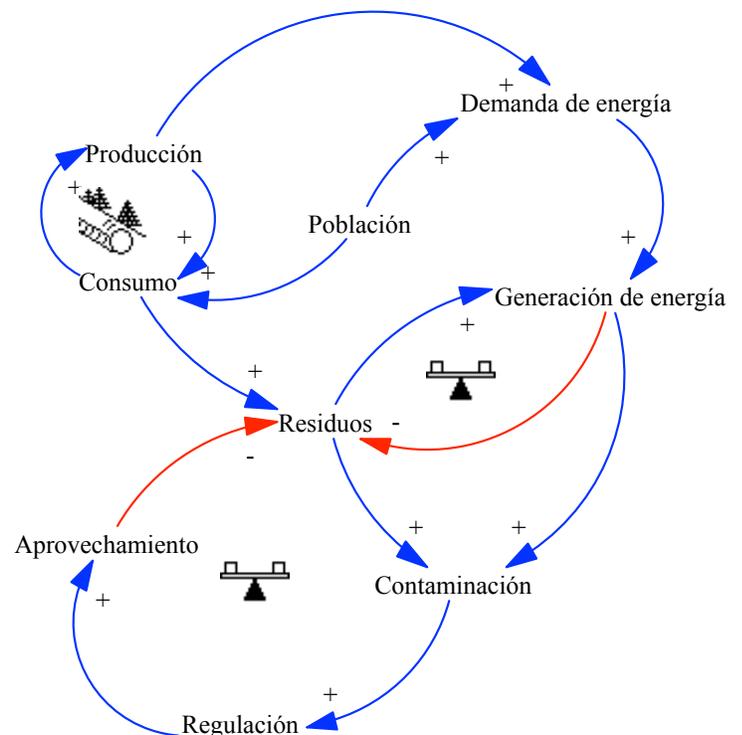
Conceptualización del sistema

La problemática de estudio es representada mediante el diagrama de influencias que se puede observar en la figura 2, donde se ilustran las principales relaciones causales existentes en el proceso. En este diagrama se aprecian principalmente dos bucles de compensación y uno de refuerzo. El primer bucle de compensación está asociado a los residuos plásticos y a una eventual disminución de estos debido a su aprovechamiento para la generación de energía. El segundo bucle de compensación relaciona las variables de contaminación, regulación, aprovechamiento, residuos y generación de energía. La generación de energía produce mayores niveles de contaminación que promueven el fortalecimiento de la regulación ambiental, pues incentivan y originan ideas de aprovechamiento de los residuos, como, por ejemplo, la generación de energía a partir de estos (*waste to energy*).

Por otro lado, el bucle de refuerzo representa el potencial de producción de plástico incentivado por el consumo, ligado a la población y su natural crecimiento.

En este diagrama se representan los elementos y relaciones existentes más importantes que permitirán una buena aproximación a la situación real.

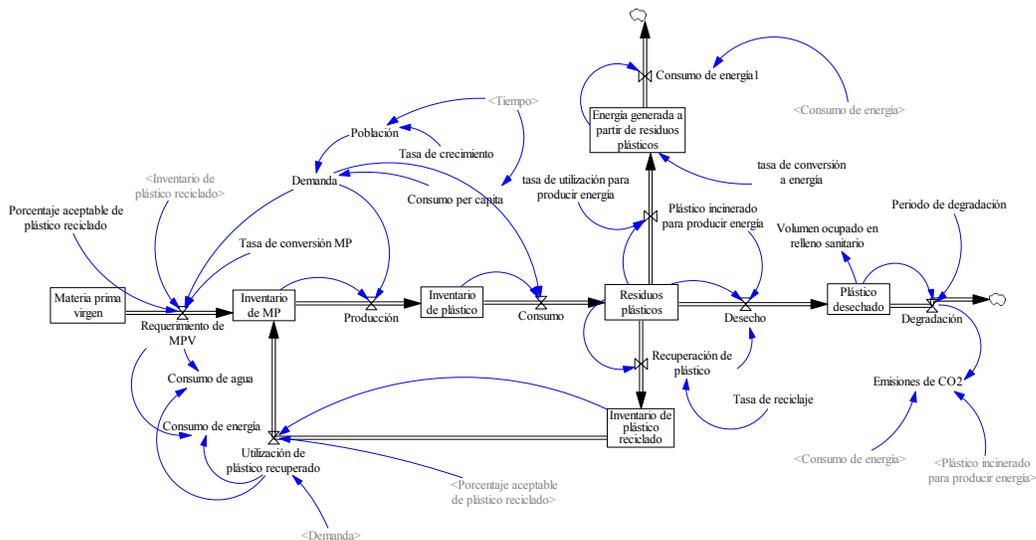
Figura 2. Diagrama de Influencias



Construcción del modelo

A partir de la representación causal descrita se construye el diagrama de Forrester, presentado en la figura 3.

Figura 3. Diagrama de Forrester
MP: Materia prima. MPV: Materia prima virgen.



A partir de este diagrama, y utilizando la información relacionada con los residuos de envases plásticos en Colombia, se han realizado la simulación y el modelo. Se contemplan diferentes escenarios mostrados, en la tabla 1, donde se realizan modificaciones respecto a la tasa de reciclaje, y se expone la proporción de envases de tereftalato de polietileno (PET, por su sigla en inglés) que se utilizarían para la generación de energía.

De esta manera, los escenarios 1 y 2, junto con el caso “Base del análisis 1”, contemplan solamente el reciclaje o reuso sin la opción de incineración. Por su parte, los escenarios 3 y 4 y el caso “Base del análisis 2” contemplan la opción de incineración (*waste to energy*). Cabe destacar que los análisis del componente 2 considerarán la tasa de reciclaje actual del 24 %, según las fuentes oficiales colombianas.

Tabla 1. Escenarios de análisis

Escenarios	
Análisis 1: Variación de tasa de reciclaje	
Base (actual)	24 %
Escenario 1	40 %
Escenario 2	50 %
Análisis 2: Variación de la proporción de PET reciclado destinada a generación de energía	
Base	0 %
Escenario 3	40 %
Escenario 4	50 %

Análisis

Respecto a los resultados, se presentan las figuras 4, 5, 6 y 7, relacionadas con los impactos ambientales de la reutilización y reúso, sin considerar la estrategia *waste to energy* (incineración), solamente variando las tasas de reciclaje.

Figura 4. Comportamiento esperado del consumo de agua ante variaciones en la tasa de reciclaje

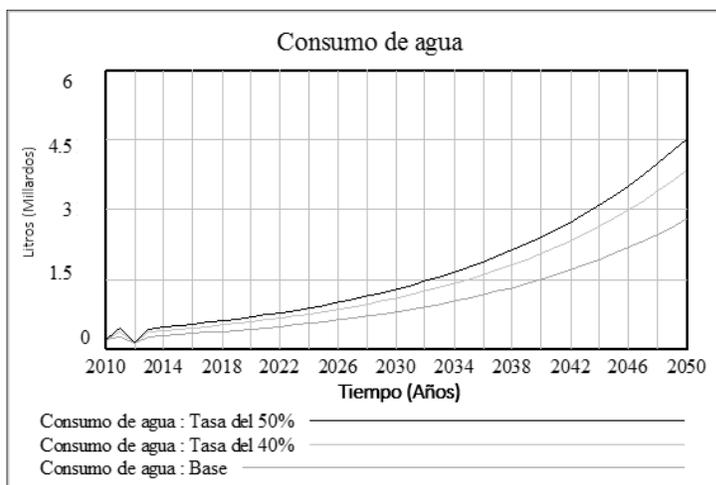


Figura 5. Comportamiento esperado del consumo de energía ante variaciones en la tasa de reciclaje

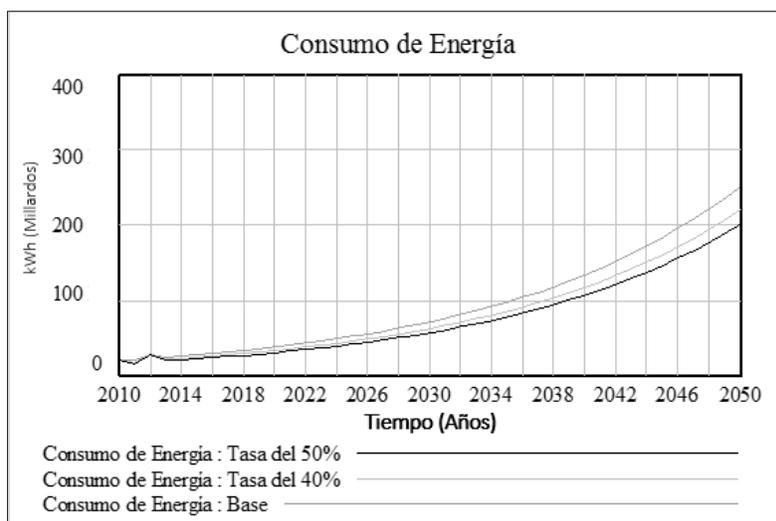


Figura 6. Comportamiento esperado en el tiempo del volumen ocupado en el relleno sanitario ante variaciones en la tasa de reciclaje

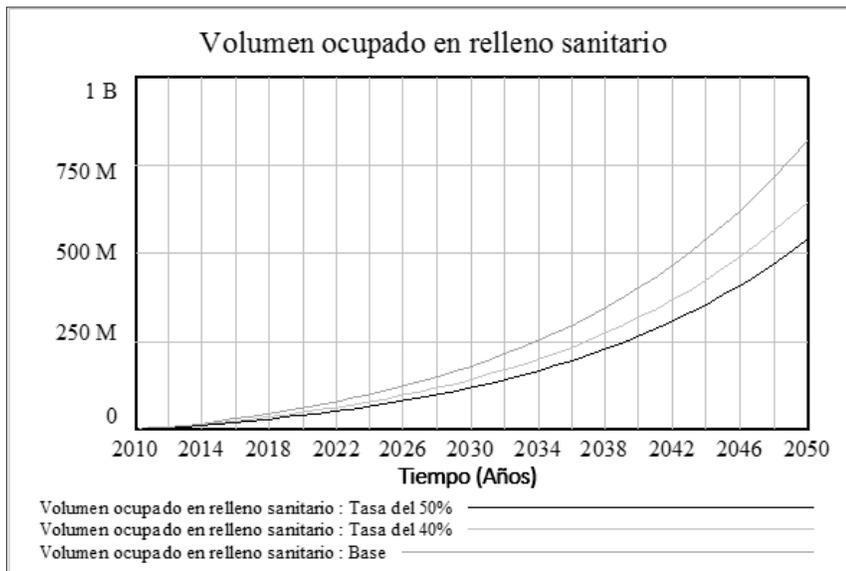
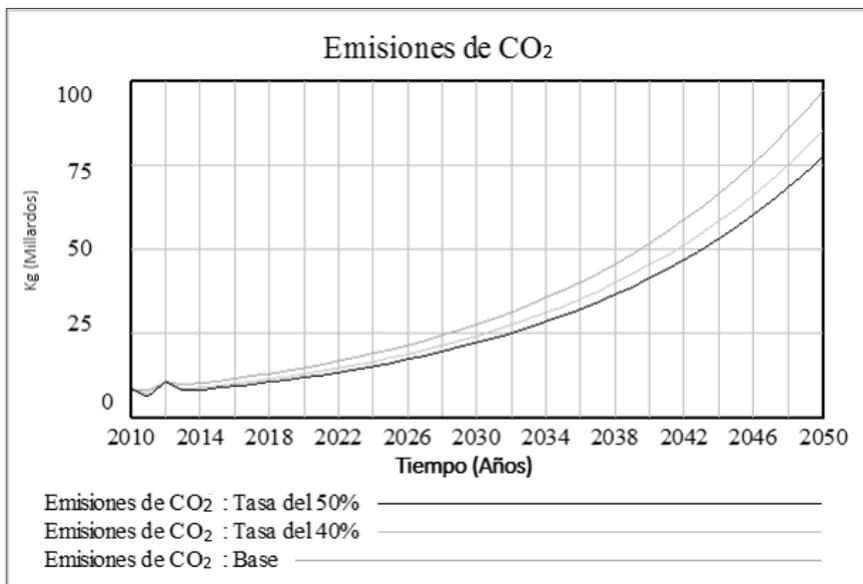


Figura 7. Comportamiento esperado de las emisiones de CO2 ante variaciones en la tasa de reciclaje



Frente al análisis 1 se aprecia que, a medida que aumenta la tasa de reciclaje, aunque se incrementan los consumos de agua, los otros tres indicadores utilizados muestran disminución. Este aspecto ofrece un punto que debe estudiarse en el futuro, pues si el comportamiento de todos los indicadores que se estén considerando no es el mismo, es decir, si todos au-

mentan o disminuyen según el escenario estudiado, surge la necesidad de realizar un análisis global que considere la importancia de cada indicador de acuerdo con el estudio que se está realizando y los indicadores involucrados en el mismo.

Además, al considerar la importancia y los valores obtenidos por estos indicadores en cada escenario se estará frente a un problema multicriterio que deberá ser abordado con metodologías apropiadas para finalmente poder generar una conclusión global respecto a cuál escenario es el que mejor comportamiento presenta en el sistema.

Sin embargo, como en este artículo se busca explorar la alternativa *waste to energy*, se presentan los resultados del análisis 2 en las figuras 8, 9, 10 y 11.

Figura 8. Comportamiento esperado del consumo de agua ante variaciones en la tasa de utilización para generar energía

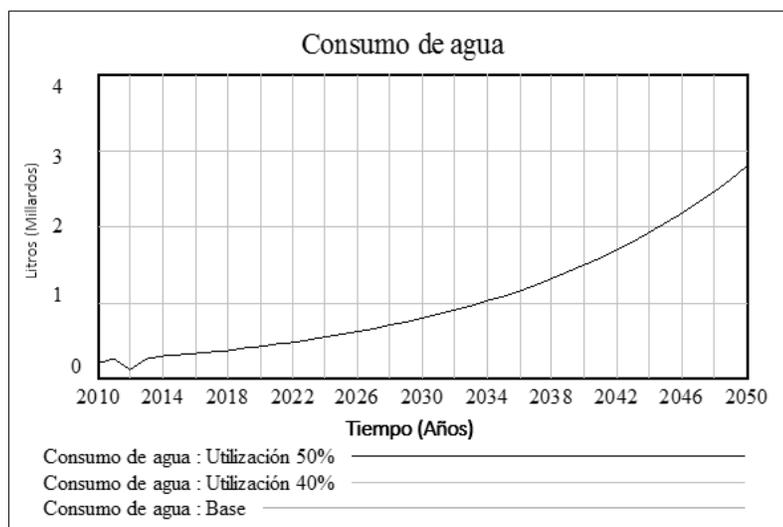


Figura 9. Comportamiento esperado del consumo de energía ante variaciones en la tasa de utilización para generar energía

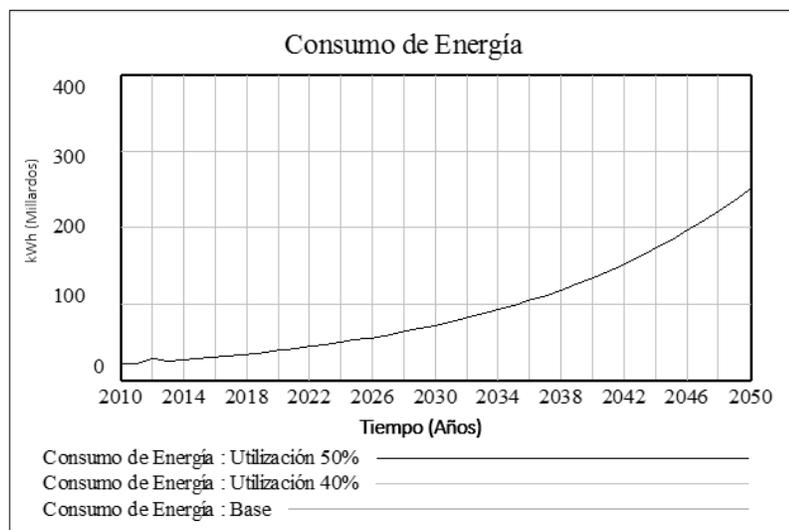


Figura 10. Comportamiento esperado del volumen ocupado en el relleno sanitario ante variaciones en la tasa de utilización para generar energía

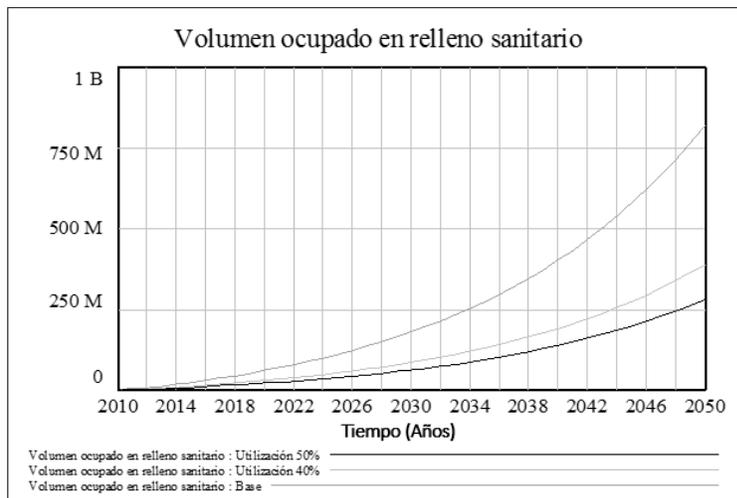
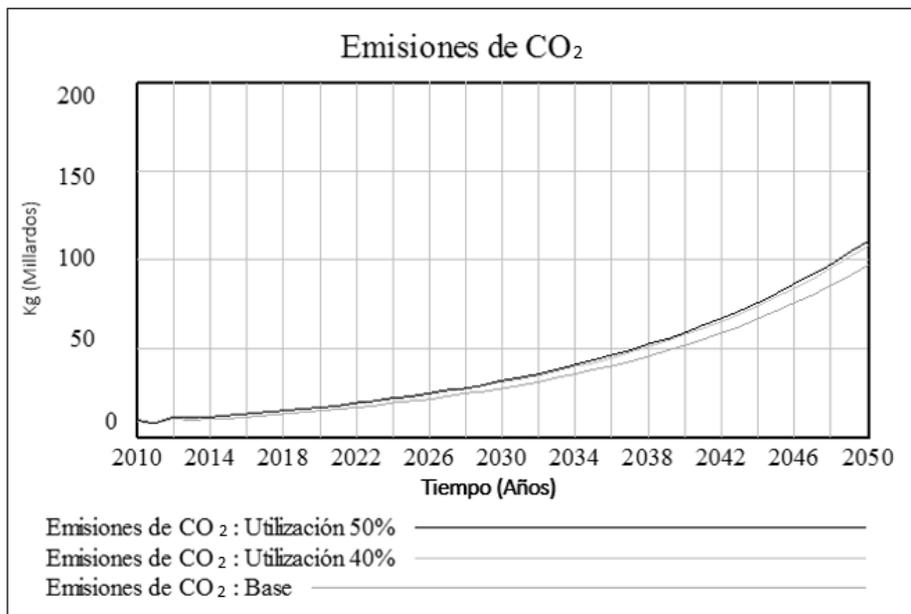


Figura 11. Comportamiento esperado de las emisiones de CO₂ ante variaciones en la tasa de utilización para generar energía

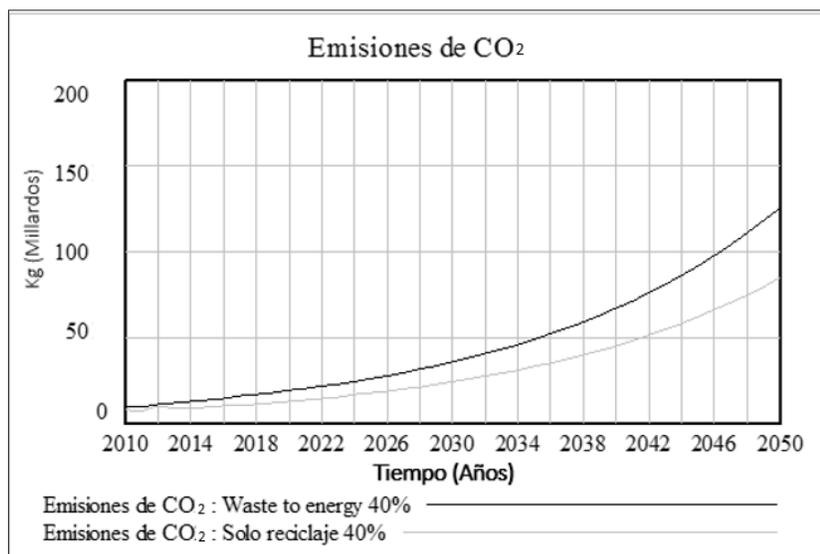


Como se puede apreciar, el consumo de agua y energía no se ve afectado; sin embargo, mientras la tasa de utilización aumenta, el volumen del relleno sanitario disminuye, pero las emisiones de CO₂ se incrementan.

Falta, sin embargo, un análisis más, que consiste en evaluar las emisiones de CO₂ de la alternativa *waste*

to energy frente a la alternativa de reutilización o reúso al mismo nivel. Se presenta entonces la figura 12, donde se comparan las emisiones para un nivel de reutilización del 40 % en la alternativa de reciclaje, y un nivel de utilización del mismo 40 % para la generación de energía.

Figura 12. Comportamiento esperado de las emisiones de la alternativa *waste to energy* frente al reciclaje



Como se puede apreciar en la figura 12, las emisiones son mayores para la alternativa *waste to energy*, por lo cual, aunque no se puede generalizar, se puede afirmar que, respecto al PET, a la luz de las emisiones de CO₂ que produce su incineración, es mejor desarrollar estrategias encaminadas a su reutilización, en lugar de utilizarlo para la generación de energía.

Esto quiere decir que, si se considera una alternativa *waste to energy* aplicada a los envases PET para generar energía eléctrica a partir de su incineración, no será ambientalmente amigable, pues producirá más emisiones de CO₂ que si dichos envases se reutilizan. Pero no quiere decir que las estrategias *waste to energy* no sean apropiadas para otros materiales, como, por ejemplo, los residuos orgánicos, que en Colombia constituyen una parte muy significativa de los residuos sólidos domiciliarios (cerca del 50 %), lo cual amerita el desarrollo de futuros trabajos relacionados con el tema.

CONCLUSIONES

La situación abordada en este estudio es un tema de actualidad y sobre el cual existen muchas presiones y discusiones. Con este modelo se pretende hacer una contribución en el proceso de aclarar las mejores decisiones con respecto a los impactos ambientales de alternativas como el *waste to energy*.

Aunque los resultados presentados no pueden generalizarse, sobre el tema de las emisiones a la atmósfera de CO₂ proveniente de la combustión de PET se puede afirmar que es mejor trabajar en la reutilización y el reciclaje de los residuos de este material que usarlos para la generación de energía mediante su incineración.

Respecto a los resultados del análisis 1, se insiste en el estudio multicriterio de los impactos ambientales, pues, como se ha podido apreciar, algunos indicadores muestran una respuesta favorable, mientras que otros demuestran lo contrario.

Finalmente, se propone continuar explorando la alternativa *waste to energy* desde otras perspectivas, como la eficiencia energética, la contribución en la gestión de los residuos sólidos, y mediante la utilización de otro tipo de residuos, por ejemplo, el componente orgánico de los residuos urbanos.

REFERENCIAS

- Ahmad, K. (2012). A System Dynamics Modeling of Municipal Solid Waste Management Systems in Delhi. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 1(4), 628-641.
- Amigun, B., Musango, J. K., y Stafford, W. (2011). Biofuels and sustainability in Africa. *Renew Sustain Energy*, 15(13), 60-72.
- Aracil, J. (1995). Dinámica de sistemas (4.ª ed.). Publicaciones de Ingeniería de Sistemas. Madrid: Isdefe.
- Bazbauers, D. E., Berzina, G., y Davidsen, A. (2014). System dynamics model for analyzing effects of eco-design policy on packaging waste management system. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 175-190.
- Cimren, E., Bassi, A., y Fiksel, J. (2010). T21-Ohio, a system dynamics approach to policy assessment for sustainable development: A waste to profit case study. *Sustainability*, 2(9), 2814-2832, <http://doi.org/10.3390/su2092814>
- Dasgupta, T. (2014). Review on energy modeling of urban municipal solid waste management system to the City of Lake, Bhopal. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 3(8), 1031-1035.
- Dyson, B., y Chang, N.-B. (2005). Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 25(7), 669-79, <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.10.005>
- El Hanandeh, A., y El Zein, A. (2011). Are the aims of increasing the share of green electricity generation and reducing GHG emissions always compatible ?. *Renewable Energy*, 36(11), 3031-3036, <http://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.034>
- Feng, Y. Y., Chen, S. Q., y Zhang, L. X. (2013). System dynamics modeling for urban energy consumption and CO₂ emissions: A case study of Beijing, China. *Ecological Modelling*, 252, 44-52, <http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.09.008>
- Greenpace. (2011). Nuevas tecnologías para el tratamiento de residuos urbanos: viejos riesgos y ninguna solución. *Publicaciones Greenpace*, pp. 38.
- Jönsson, O., Polman, E., Jensen, J. K., Eklund, R., Schyl, H., y Ivarsson, S. (2003). Sustainable Gas Enters the European Gas Distribution System. *Danish Gas Technology Center*.
- Nijkamp, P., y Kourtit, K. (2013). The "New Urban Europe": global challenges and local responses in the urban century. *Eur. Plan. Stud*, 21(3), 291-315.
- Nuhoğlu, H., y Nuhoğlu, M. (2007). System Dynamics Approach In Science and Technology Education. *Turkish Science Education*, 4(2), 91-108.
- OECD. (2013). Municipal waste. *Factbook 2013: Economic, Environmental and Social Statistics*. OECD Publishing.
- Poletto, J. A., y da Silva, C. L. (2009). Influencia de la separación de residuos sólidos urbanos para reciclaje en el proceso de incineración con generación de energía. *Información Tecnológica*, 20(2), 105-112.
- Schwaninger, M., y Pérez Ríos, J. (2008). System dynamics and cybernetics: a synergetic pair. *System Dynamics Review*, 24(2), 145-174, <http://10.1002/sdr.400>
- Simonetto, E. D. O., Modro, N. R., y Dalmolin, L. C. (2013). Assessment of Energy Saving in Waste Recycling using System Dynamics. *ReA UFSM*, 6(2), 319-332, <http://doi.org/10.5902/198346597166>
- Wäger, P. A, y Hilty, L. M. (2002). A Simulation system for waste management - from system dynamics modelling to decision support. *Structure*, 174-179.

MUTIS

REVISTA DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO

Instrucciones para autores

ENVÍOS DE ARTÍCULOS

La revista *Mutis* acepta permanentemente los siguientes tipos de artículos:

1. Artículo de investigación científica y tecnológica: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos terminados de investigación.
2. Artículo de métodos: documento que presenta la invención o estandarización de un método experimental, computacional, o educativo, entre otros.
3. Artículo de revisión (estado del arte): es una revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias, con el fin de dar cuenta sobre los avances y las tendencias de desarrollo de un campo particular de las ciencias naturales e ingeniería.
4. Comunicación corta: documento que presenta resultados parciales de una investigación en desarrollo cuya publicación sea de gran importancia.

Los trabajos que se presentan a consideración de la revista *Mutis*, se deben enviar vía correo electrónico a revista.mutis@utadeo.edu.co con copia a javier.hernandez@utadeo.edu.co y cesaro.diaz@utadeo.edu.co (Asunto: artículo revista *Mutis*) en formato de procesador de texto habilitado para modificaciones (Microsoft Word). El artículo debe estar escrito en español o inglés, con una extensión máxima de 25 páginas (incluyendo tablas, figuras y referencias), con márgenes simétricos de 2 cm, sin columnas, con títulos y subtítulos alineados a la izquierda, en letra Times New Roman, tamaño 12 y en espacio doble. Para facilitar el proceso de evaluación, se deben numerar todos los renglones del trabajo. Los trabajos deben tener la siguiente estructura y cumplir con los siguientes requisitos:

Tipo de artículo. El tipo de artículo (*short communication, research article o review article*) debe ser colocado en mayúscula, negrilla y alineado a la derecha en la parte superior.

Título. El título debe representar con precisión y de manera concisa el contenido del trabajo sin exceder 15 palabras. Se debe escribir con letras tamaño de fuente 16, en minúsculas, en negrilla y alineado a la izquierda.

Título corto. Debe sugerirse un título corto de no más de 5 palabras que resuma el título original, el cual se colocará en las páginas impares del texto publicado.

Autores. Debe escribirse nombre completo de los autores, separados por comas y tamaño de fuente 12. El autor para correspondencia debe marcarse con un asterisco como superíndice al final del apellido. Cada afiliación debe estar precedido por el número que se insertó como superíndice al final del apellido de cada autor. No se deben incluir títulos académicos ni las posiciones o cargos que los autores ocupan. Las afiliaciones se deben escribir en este orden: Universidad, facultad, programa, laboratorio o grupo (si aplica), dirección, ciudad, país, *correo electrónico del autor para correspondencia. Ejemplo:

Yvonne Sarmiento Rangel,¹ Ariadna Hazel Vergel^{2*}

¹Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Departamento de Ciencias Naturales y Ambientales. Grupo de Investigación Genética, Biología Molecular y Bioinformática – (Genbimol), Carrera 4 n.º 22-61, Bogotá D. C., Colombia. CP 011110

²Instituto de Investigaciones de Viandas Tropicales (INIVIT), Apartado 6, Santo Domingo, Villa Clara, Cuba. CP 53000.
Correo electrónico: arhazel@inivit.cu

Resumen. Debe tener un máximo de 250 palabras. El texto del resumen debe ir en tamaño de fuente 12 Times New Roman. El resumen debe incluir objetivo, métodos, resultados concretos de la investigación y una conclusión general.

Palabras clave. Deben escogerse un máximo de 5 palabras claves. Palabras diferentes incluidas en el título.

Abstract. Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés del resumen que aparece en español. Se usa el mismo estilo ya descrito para el resumen en español.

Keywords. Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés de las palabras clave que aparecen en español. Se usa el mismo estilo ya descrito para las palabras clave en español.

Introducción. Donde se habla sobre el origen de la investigación, interés y visión general del tema a tratar.

Materiales y métodos. No aplica para artículo de revisión. Descripción detallada de técnicas, equipos y reactivos utilizados en el desarrollo de la investigación.

Resultados. No aplica para artículo de revisión. Donde se hace una presentación clara de los resultados de investigación.

Discusión. Donde se realiza la interpretación y análisis de los resultados de investigación comparándolo con resultados previamente publicados. Pueden presentarse tablas o figuras para sintetizar los resultados. Si se han realizado análisis estadísticos se deberá describir la procedencia de los datos y el método estadístico empleado.

Conclusiones. Deben basarse en los resultados obtenidos y estar relacionados con la hipótesis o planteamiento del problema descrito en la introducción.

Agradecimientos. Los autores agradecerán de manera corta y concisa a instituciones o personas que hayan aportado de manera relevante a la investigación. Es de carácter opcional.

Ecuaciones. Las ecuaciones se deben escribir centradas con respecto al texto principal y se deben numerar continuamente a lo largo del texto. Cada ecuación debe estar enumerada con un número entre paréntesis ubicado en el margen derecho del texto. El significado

y las unidades deben explicarse inmediatamente después de la ecuación en que se utilicen por primera vez.

Cantidades y unidades. Para todas las cantidades numéricas, se debe utilizar una coma para separar los miles y un punto para indicar las cifras decimales. Se recomienda utilizar el Sistema Internacional de Unidades.

Tablas. Las tablas se deben numerar continuamente a lo largo del texto. El encabezado de cada tabla debe incluir la palabra **Tabla** (en negrilla) seguida del número arábigo consecutivo correspondiente, y de una breve descripción del contenido de la tabla. Tanto el encabezado como el contenido de la tabla se deben escribir en tamaño de fuente 10. Solo deben usarse líneas horizontales para separar las entradas de la tabla. No deben usarse líneas verticales para separar las columnas. En el caso de necesitarse algún pie de tabla, este debe estar escrito con tamaño de fuente 8. Las tablas no deben duplicar la información dada en las figuras.

Figuras. Las figuras (o fotografías) se deben numerar de manera consecutiva a lo largo del texto. El rótulo de cada figura debe estar en parte inferior de la figura y debe incluir la palabra **Figura** (en negrilla) seguida del número arábigo correspondiente, y de una breve descripción del contenido de la figura. El rótulo de la figura se debe escribir en tamaño de fuente 10. Las figuras deben incluirse como imágenes originales importadas o copiadas al archivo del trabajo desde una herramienta gráfica (por ejemplo, de *Microsoft Excel*) con una resolución de 300 dpi de tal manera que la legibilidad no se sacrifique cuando el tamaño de las figuras se ajuste durante el proceso de edición. No se publicará por ningún motivo información de fotografías descargadas por internet sin el permiso expreso del autor.

Referencias bibliográficas. Se debe utilizar a lo largo del texto el sistema de citación APA que utiliza los apellidos de autores seguidos del año de publicación entre paréntesis. La lista de las referencias se debe dar al final del documento después de la sección de Conclusiones y debe estar organizada en orden alfabético de acuerdo a la inicial del primer apellido del primer autor. En esta lista solamente se deben colocar las referencias citadas en el texto. Todas las referencias se deben escribir en tamaño de fuente 12 Times New Roman.

EJEMPLOS:

ARTÍCULO

Giraldo, G., Talens, P., Fito, P., & Chiralt, A. (2003). Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *Journal of food Engineering*, 58(1), 33-43.

LIBRO

Shames, I. H., & Shames, I. H. (1982). *Mechanics of fluids* (pp. 8-36). New York: McGraw-Hill.

CAPÍTULO DE LIBRO

Bertucco, A. &. (2002). Micronization of a polysaccharide by a supercritical antisolvent technique. En J. &. Williams (ed), *Supercritical Fluids Methods and Protocols*. (pp. 335-412). New Jersey: Humana Press, Inc.

DOCUMENTO DE INTERNET

Benson, T. (Nov. 17, 2005). *Forces on a Rocket*. Consultado en octubre 2, 2008, Disponible en: <http://exploration.grc.nasa.gov/education/rocket/rktfor.html>, accesado el XX de XX de XXXX

TESIS DE GRADO

Yépez, B. (2009). Glicerólisis e hidrólisis de triglicéridos saturados, en dióxido de carbono supercrítico. Tesis Doctoral, Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

En caso de dudas comunicarse con los editores (revista.mutis@utadeo.edu.co, cesaro.diaz@utadeo.edu.co, javier.hernandez@utadeo.edu.co). Estas instrucciones quedan supeditadas a los cambios que el Comité Editorial disponga.



EDITORIAL
UTADEO

ESTA REVISTA ELECTRÓNICA
ES EDITADA POR LA
UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ
JORGE TADEO LOZANO.
SE FINALIZÓ
EN EL MES DE MAYO
DE 2017