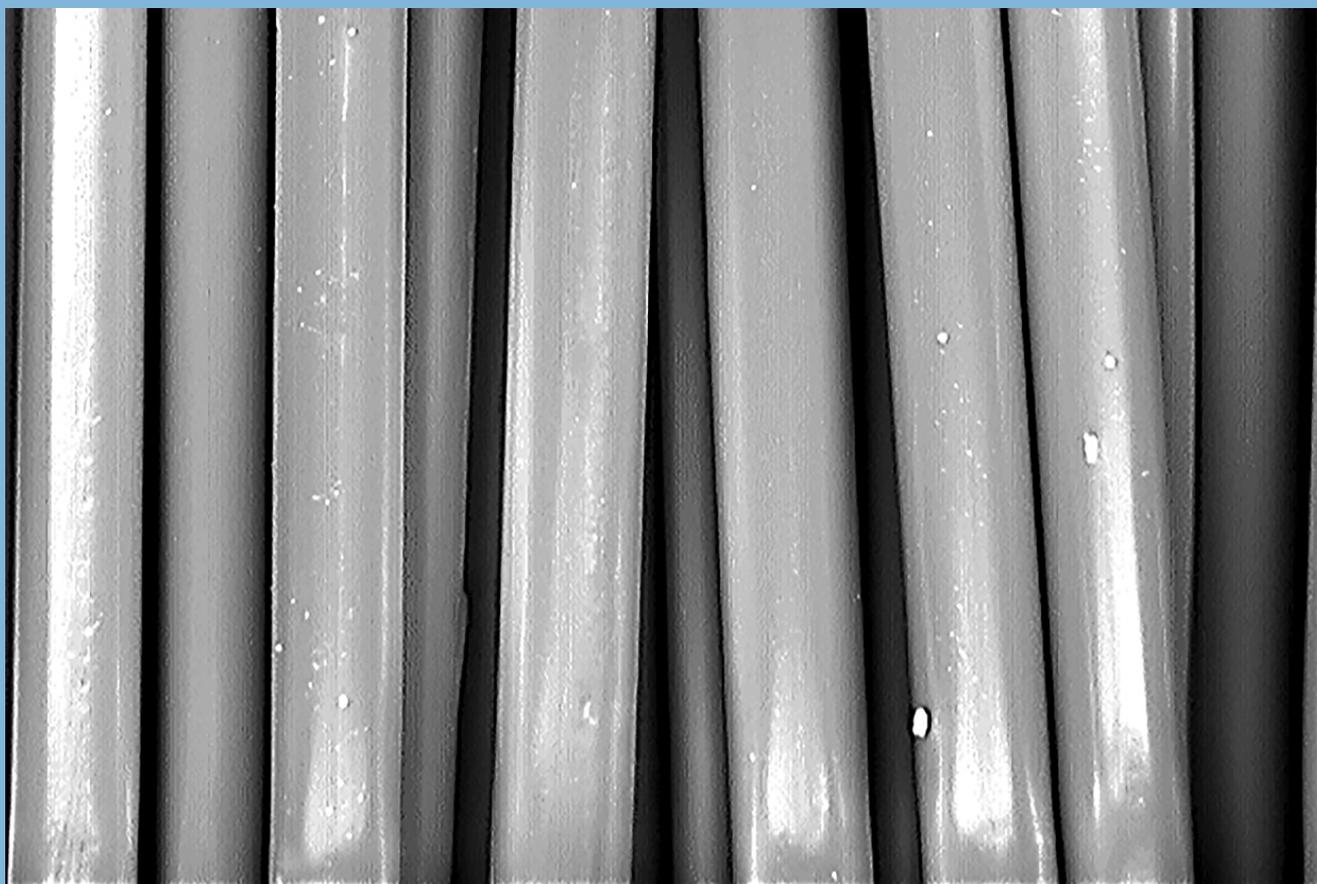


MUTIS

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

 EDITORIAL
UTADEO

MUTIS

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

e-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
MARCO GIRALDO BARRETO

Coordinador Editorial
JUAN CARLOS GARCÍA SAENZ

Director de Arte y Diseño
LUIS CARLOS CELIS CALDERÓN

Corrector de estilo
MILENA ESPINOSA (español)
LEONARDO PAIPILLA PARDO(inglés)

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*.

Editor

GERARD OLIVAR TOST

Editores de sección

JAVIER HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ
Ciencias Naturales

CÉSAR DÍAZ
Ingeniería

Comité Editorial

ISAAC DYNER REZONZEW
Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia
MICHAEL J. AHRENS
Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia
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 de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia
ANDRÉS FELIPE SUÁREZ ESCOBAR
Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia
ALBA GRACIELA ÁVILA
Universidad de los Andes, Colombia
ANDRÉS FELIPE LÓPEZ
Universidad de La Sabana, Colombia
SILVIO ALEJANDRO LÓPEZ PASOS
Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca,
Colombia

Actualmente el contenido está indexado e incluido en EBSCO, Latindex, DOAJ, BASE, Google Scholar, REDIB, Academia.edu, Mendeley, Directory of Research Journals Indexing, ROAD

CONTENIDO

Vol. 8 n.º 1, enero-junio 2018

Editorial

Gerard Olivar-Tost 5

ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN – RESEARCH ARTICLES

Caracterización de geotextiles usando Microscopia Electrónica de Barrido
Characterization of geotextiles with Scanning Electron Microscope
Darwin Dubay Rodríguez Pino, Henry Yecid Bustos Castañeda, Martin Eduardo Espitia Nery 7

Producción de nanofibras poliméricas mediante el proceso de *electrospinning* y su uso potencial
Production of polymeric nanofibers by electrospinning process and its potential use
Alis Pataquiwa Mateus, Sebastián Coba Daza 17

Evaluación a nivel laboratorio de la capacidad de remoción de materia orgánica de *Chlorella vulgaris* en las aguas residuales de la PTAR Salitre
Laboratory evaluation of the organic matter removal capacity of *Chlorella vulgaris* in wastewater from the Salitre WWTP
Juan Andrés Sandoval Herrera, Brian Orlando Malo Malo, Julián Camilo Cartagena Arévalo, Diego Rubio Fernández 34

Effect of pH and temperature on photocatalytic oxidation of methyl orange using black sand as photocatalyst
Efecto del pH y la temperatura sobre la oxidación fotocatalítica de naranja de metilo usando arena negra como fotocatalizador
Alejandra Ibatá Soto, Rafael Nikolay Agudelo Valencia, Andrés Felipe López Vásquez 43

Inclusión de la Responsabilidad Social Empresarial en los currículos de Ingeniería Industrial, Administración y Mercadeo en Colombia
Inclusion of Corporate Social Responsibility in the curricula of Industrial Engineering, Administration and Marketing in Colombia
Eliasib Naher Rivera Aya 55

Instrucciones para autores 65

EDITORIAL

Vol. 8 (1) pp. 5-6, enero-junio del 2018

Apreciados lectores:

En nombre del equipo editorial de la revista *Mutis*, el cual empiezo a liderar a partir de este primer número de 2018, les envío un cálido saludo.

En esta edición contamos con cinco artículos de gran calidad: los dos primeros se encuentran relacionados con el área de caracterización y producción de materiales a través del uso de técnicas e instrumentos físicos; las siguientes dos contribuciones entran de lleno en temas de ingeniería química; por su parte, el último trabajo atañe a cuestiones educativas y de responsabilidad social empresarial. Quisiera brevemente presentar cada uno de ellos. Espero que disfruten de su lectura y estudio.

El primer artículo, titulado Caracterización de geotextiles usando Microscopía Electrónica de Barrido, fue escrito por tres profesores del Grupo de Estudios e Investigación en Ingeniería Civil (GEIIC) de Uniminuto. Los geotextiles son materiales sintéticos semejantes en apariencia a los textiles, los cuales están formados por fibras poliméricas y cuentan con diversas aplicaciones en el área de la geotecnia, entre otras disciplinas. Este trabajo lleva a cabo la caracterización de dos tipos de geotextiles, FORTEX y FIBERTEX, mediante el uso de microscopia electrónica de barrido (MEB) y espectroscopia de energía dispersa, permitiendo establecer su potencial para aplicaciones industriales.

“Producción de nanofibras poliméricas mediante el proceso de *electrospinning* y su uso potencial” es el título de la siguiente contribución. Los autores de este artículo de revisión, adscritos a la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, nos informan acerca de la técnica de *electrospinning*, la cual es empleada para la fabricación de materiales unidimensionales; concretamente, la producción de nanofibras de polímeros. En el documento se enfatiza la importancia de los parámetros de procesamiento, la solución y los ambientes para el éxito del proceso. Además, se describen las diferentes aplicaciones de esta técnica en campos de acción tales como la generación de energía y la ingeniería de tejidos, ambiental y de alimentos.

La tercera contribución de este número lleva por título “Evaluación a nivel laboratorio de la capacidad de remoción de materia orgánica de *Chlorella vulgaris* en las aguas residuales de la PTAR Salitre”. Los autores de este trabajo estudian parte de los procesos que se realizan en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) El Salitre, cuyo tratamiento primario no logra una remoción de materia orgánica mayor a 60 %. A partir de este hallazgo, se lleva a cabo un biotratamiento de las aguas residuales con la microalga *Chlorella vulgaris* previo a su vertimiento. Con el objetivo de evaluar la eficiencia del sistema, las principales variables estudiadas son, como es habitual, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST).

El cuarto artículo, escrito en lengua inglesa, lleva por título "Effect of pH and temperature on photocatalytic oxidation of methyl orange using black sand as photocatalyst". Sus autores, adscritos a la Universidad Libre y la Universidad de La Sabana, explican en este interesante artículo el papel del naranja de metilo (colorante ampliamente usado en la industria textil y de cueros), cuya degradación por medio de tratamientos convencionales y

algunos procesos modernos de oxidación avanzada se convierte en un reto para los profesionales de la ingeniería química. Esta investigación empleó arena negra como fotocatalizador alternativo con el fin de evaluar la influencia del pH y la temperatura en el proceso de oxidación de este colorante.

El artículo que cierra este número se titula “Inclusión de la Responsabilidad Social Empresarial en los currículos de Ingeniería Industrial, Administración y Mercadeo en Colombia”, escrito por el profesor Eliasib Naher Rivera de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Esta contribución presenta los resultados de una investigación sobre la formación en Responsabilidad Social Empresarial (RSE) en los programas de pregrado en Ingeniería Industrial, Administración y Mercadeo ofrecidos en Colombia. Una posible continuación de este interesante estudio puede orientarse a identificar la manera en que los empresarios valoran las competencias de los egresados en cuanto a la aplicación de la RSE, puesto que, como señala el autor, frecuentemente se hace referencia al desbalance entre lo que espera la sociedad de los profesionales y aquello que ofrece la universidad.

Los aguardamos en nuestro próximo número.

¡Un abrazo!

Gerard Olivar-Tost

Editor

<http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1377>

Caracterización de geotextiles usando Microscopia Electrónica de Barrido

Characterization of geotextiles with Scanning Electron Microscope

Darwin Dubay Rodríguez Pino

Líder del grupo de investigación GICEMET del SENA e investigador de GEIIC de la Universidad Minuto de Dios, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-1172-1295>
drodriguezp@sena.edu.co

Henry Yecid Bustos Castañeda

Docente e investigador del grupo de investigación GEIIC de la Universidad Minuto de Dios, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-2983-9910>
hbustos@uniminuto.edu

Martin Eduardo Espitia Nery

Docente y líder del grupo de investigación GEIIC de la Universidad Minuto de Dios, Colombia
<https://orcid.org/0000-0001-5626-3051>
mespitia@uniminuto.edu

Fecha de recepción: 12 de junio del 2018

Fecha de aceptación: 17 de septiembre de 2018

Sugerencia de citación: Rodríguez Pino, D., Bustos Castañeda-H. y Espitia Nery, M. (2018).

Caracterización de geotextiles usando microscopia electrónica de barrido. *Mutis*, 8(1) 7-16, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1372>

Editor: Javier Hernández Fernández

RESUMEN

Los geotextiles son materiales sintéticos de gran deformabilidad compuestos por fibras poliméricas. Estos se asemejan a los textiles (telas) y pueden ser enrollados, cortados y cosidos. Son empleados para obras de ingeniería, particularmente en aplicaciones geotécnicas. Existen dos tipos de geotextiles: los tejidos y los no tejidos, lo cuales son utilizados en aplicaciones de filtración, drenaje, separación, reforzamiento, barrera y protección. Este trabajo desarrolla un proceso de caracterización usando microscopia electrónica de barrido (MEB) y espectroscopia de energía dispersa, con el fin de determinar características morfológicas y químicas de dos tipos de geotextiles: FORTEX y FIBERTEX. A partir del análisis espectrográfico se encuentra la distribución de los elementos químicos en estos materiales. Así mismo, a través de la observación con microscopia electrónica se identifican las características morfológicas que permiten establecer el potencial de los geotextiles para nuevos usos en la industria electrónica, tales como la generación de energía y la impresión de microcircuitos y dispositivos en geotextiles.

Palabras clave: geotextiles, microscopia electrónica de barrido, espectroscopia de energía dispersa, FORTEX, FIBERTEX, tejidos.



ABSTRACT

Geotextiles are highly deformable synthetic materials formed by polymeric fibers similar to a fabric. As their name suggests, geotextiles are similar to textiles and can be rolled, cut and sewed. These are used for engineering works, particularly in geotechnical applications. There are two types of geotextiles: tissues and nonwovens, which are used for filtration, drainage, separation, reinforcement, barrier-building and protection. This work develops a characterization using scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS) in order to identify the morphological and chemical characteristics of two types of geotextiles: FORTEX and FIBERTEX. Chemical elements distribution and morphological characterization are based on spectrographic analysis. This allows establishing the potential of geotextiles for new uses in the electronics industry, such as energy generation on roads and the printing of microcircuits and electronic devices in geotextile fibers.

Keywords: Geotextiles, scanning electron microscopy, energy disperse spectroscopy, FORTEX, FIBERTEX, fabrics.

NOMENCLATURA

Microscopio electrónico de barrido (MEB): scanning electron microscopy (SEM).

Espectroscopia de energía dispersa (EED): energy dispersive spectroscopy (EDS).

INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad, los textiles han sido usados por el hombre en múltiples aplicaciones. Durante el desarrollo de la humanidad, se observa que los usos más comunes de estos materiales han tenido fines domésticos y funerarios (Anand, 2000). La evolución de la tecnología textil y cómo las formas de los tejidos cambiaron en la edad de bronce y la edad de hierro son factores relevantes para comprender la importancia de estas materias primas. También es necesario considerar cómo las diferentes invasiones territoriales e intercambios culturales no solo permitieron la evolución de la tecnología sino además su transferencia en determinadas culturas.

La evolución de los textiles se resume en una línea del tiempo que se remonta a la prehistoria, cuando los primeros hombres usaban cuero de animal para cubrirse del frío y como protección ante las condiciones climáticas. Es solo hasta la edad de bronce que los antiguos fenicios empezaron a desarrollar técnicas de hilado de fibras naturales, con el fin de mejorar las propiedades de las cubiertas. Luego, durante la edad de hierro, se comenzaron a implementar técnicas de tejido artesanal (Bhushan, 2010).

La época más representativa de la evolución textil corresponde a aquella en que las culturas más

representativas de la antigüedad (egipcia, fenicia, china, tailandesa, japonesa, bizantina, entre otras) lograron la fabricación masiva de textiles y la aplicación de técnicas de estampado y color (GEO Matrix, 2017).

El crecimiento de la industria textil ha tenido hitos importantes desde la edad industrial, ya que los desarrollos tecnológicos han permitido el mejoramiento de las técnicas de fabricación y la optimización de la producción de fibras y textiles. Para el año 2000, la producción mundial de este sector alcanzaba los \$ 60 billones de dólares y presentaba una expectativa de crecimiento de 3,8% (The Bombay Textile Research Association, 2012; Velde, 2008).

Adicionalmente, desde 1997 se ha presentado un auge por avanzar en el desarrollo de textiles técnicos¹ (COTEC, 2014), los cuales contienen componentes tecnológicos más avanzados que permiten adicionar y transformar los textiles en materiales con propiedades especiales. Es así como los ingenieros y profesionales de diferentes áreas han realizado esfuerzos por generar avances en este tipo de materias primas, buscando satisfacer las necesidades propias de cada sector. A partir de tales esfuerzos, por

1 Textiles técnicos: textiles especializados con propiedades diferentes a los textiles regulares que entregan valor agregado a los materiales.

ejemplo, ha sido posible fabricar geotextiles, para lo cual se requiere de un alto nivel de conocimiento en áreas como la ingeniería civil (Anand, 2000; Jahan, 2018). Así mismo, estos desarrollos han permitido la generación de textiles para la industria médica y otras industrias debido a las propiedades especiales de este tipo de fibras, entre las que destaca la resistencia al fuego (típicamente empleados por bomberos), la protección antibalas (para uso policial) y otras aplicaciones (DuPont Engineering Polymers, 2000). A diferencia de otros tipos de hilos para la obtención de textiles, los hilos de los geotextiles se clasifican entre las fibras químicas, ya que generalmente son obtenidos de manera artificial.

La investigación sobre geotextiles es escasa y la información sobre materiales específicos para su elaboración es reducida. Como muestra de ello, la búsqueda en la base de datos SCOPUS arroja tan solo 22 resultados (SCOPUS, 2018) para la palabra clave “geotex”, mientras que las bases ScienceDirect y Springerlink arrojan 35 y 36 resultados, respectivamente. Además, al combinar la búsqueda entre “geotextil” y “SEM”, no se presenta resultado alguno. Por esta razón, resulta relevante llevar a cabo exploraciones sobre estos materiales a través de SEM y EDS.

Este documento presenta la caracterización de dos tipos de geotextiles (FORTEX y FIBERTEX) usando microscopia electrónica de barrido (MEB) y espectroscopia de energía dispersa (EDS). El estudio del cual deriva este artículo permitió descubrir propiedades y características morfológicas y químicas de estas fibras que potencialmente permitirán su uso en aplicaciones no convencionales, tales como la generación de energía y la impresión de microcircuitos, con el fin de generar valor agregado en la construcción de vías y obras civiles.

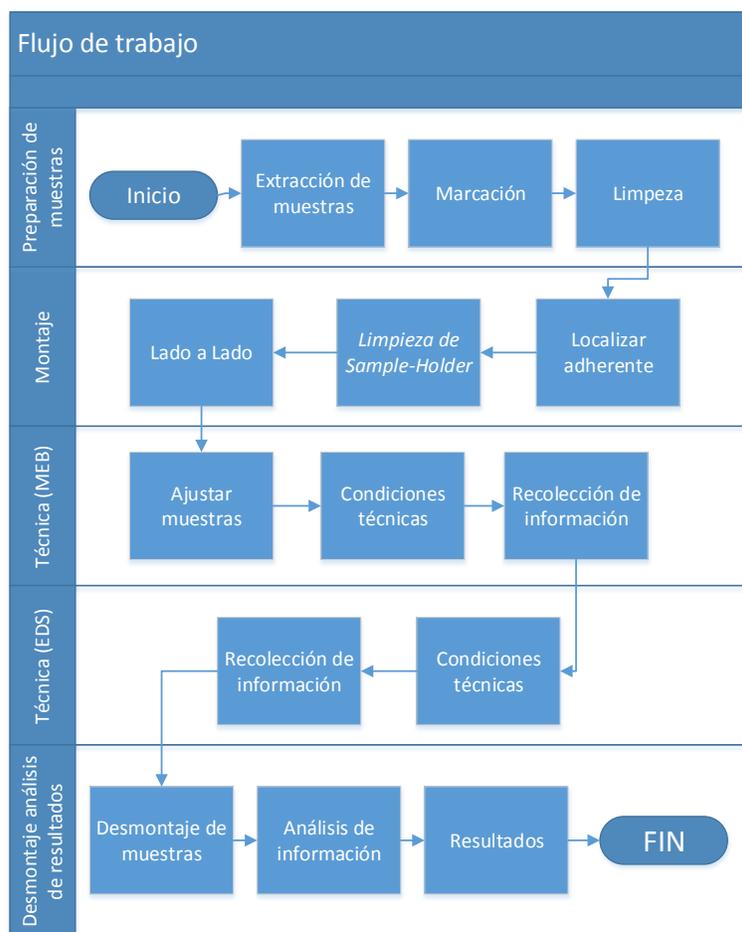
MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se explica la metodología experimental empleada para el desarrollo del presente estudio, teniendo en cuenta el tratamiento de las muestras, el montaje del microscopio electrónico de barrido, las condiciones experimentales de la caracterización y los parámetros técnicos configurados para la observación de las muestras. Como parte de la caracterización de los tejidos que comprenden la estructura que

conforma los geotextiles, se siguen estrictamente los parámetros de temperatura y humedad ambientales comprendidos en un rango de 18-20 °C y 40-50 % HR.

La Figura 1 muestra el flujo de la metodología usada, señalando la secuencia desde la preparación de las muestras, pasando por el uso de técnicas de caracterización, el desmontaje de muestras y el análisis de la información.

Figura 1. Metodología y flujo de trabajo para el proceso de experimentación.



Preparación de muestras

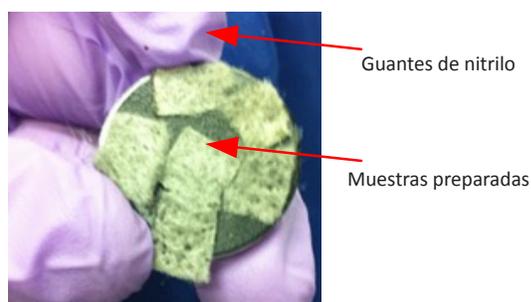
Para la preparación de las muestras se tuvo en cuenta la estructura de las fibras de los geotextiles, con el fin de no afectar las características morfológicas y químicas durante el proceso de preparación y montaje. Las características principales de los 2 geotextiles usados son:

Tabla 1. Características de geotextiles objeto de análisis.

Nombre del geotextil	Características y aplicaciones
FIBERTEX	Geotextil no tejido, con fibras vírgenes de polipropileno en seco, extruidas, cardadas y punzonadas, altas propiedades de abrasión, alta resistencia dimensional y uniformidad, resistencia a altas temperaturas, elongación superior a 50%. Aplicaciones en filtros, drenajes y separación de suelos para la construcción y protección de geo membranas.
FORTEX	Geotextil tejido con fibras de multifilamento de poliéster de alta tenacidad (PET), caracterizado por presentar alto desempeño mecánico e hidráulico. Resistencia a U.V componentes biológicos y químicos presentes en los suelos. Aplicaciones en vías, aeropuertos, terraplenes ferrocarriles, edificaciones, diques, presas, parqueaderos, áreas deportivas, plataformas, muros de contención, taludes de alta pendiente, canales, márgenes de ríos, laderas, presas, puertos, bermas y aproches.

Las muestras son preparadas a partir de un corte realizado con tijeras de costura. Para ello, se siguieron los siguientes pasos:

- Extracción de dos secciones de fibra FORTEX – BX30.
- Extracción de dos secciones de fibra FIBERTEX – F20.
- Limpieza de la muestra usando nitrógeno (lado A y lado B).
- La manipulación de las muestras se realiza usando guantes de nitrilo durante toda la etapa de manipulación de muestras (Figura 2).

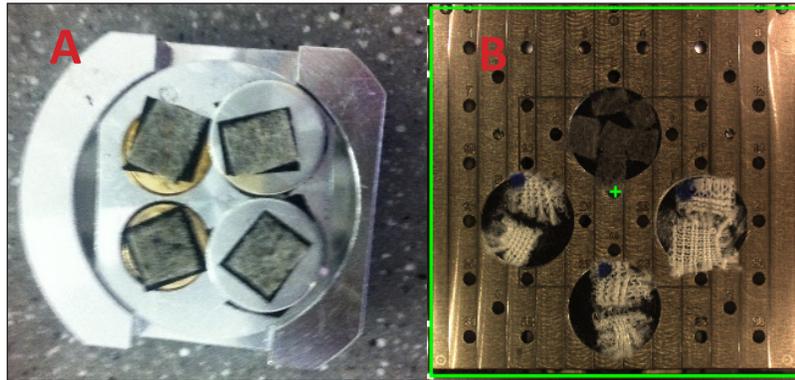
Figura 2. Resultado de muestras preparadas, montaje y manipulación.

Montaje

El montaje de las muestras para realizar tanto el análisis del lado A como B de cada muestra es realizado sobre un *Sample-Holder* de 13 mm de radio, el cual puede ser empleado en microscopios electrónicos de barrido (Figura 3). Además, se usó cinta conductora de carbono para adherir las muestras de geotextil al *Sample-Holder* del microscopio, esto con el fin de evitar que las muestras se carguen

electroestáticamente de forma instantánea. La Figura 4 ilustra dos tipos de *Sample-Holders*: el de la izquierda corresponde al *Sample-Holder* de un microscopio electrónico de barrido JEOL-6010LA, el de la derecha es un *Sample-Holder* Phenom XL.

Figura 3. A: Sample-Holder con montaje de geotextil FIBERTEX en equipo JEOL-6010LA. B: Sample-Holder con montaje de geotextil FORTEX en equipo Phenom XL.

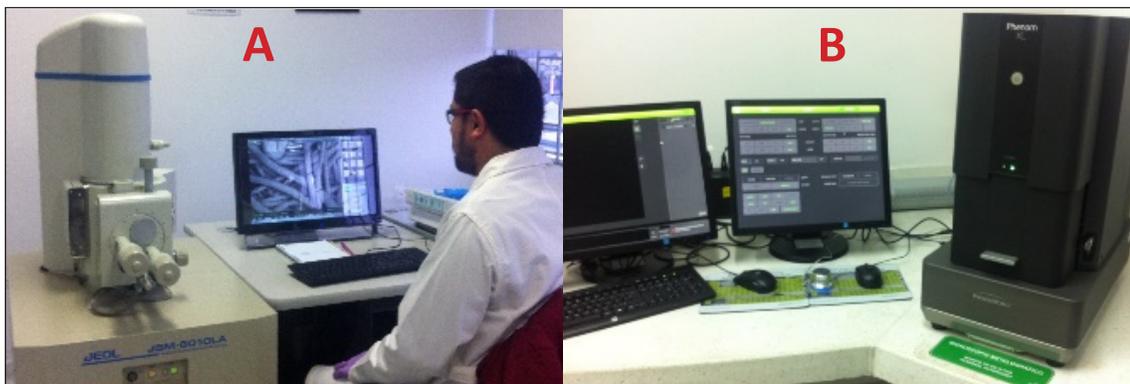


Técnica de caracterización con MEB

Para la observación de las muestras se usaron dos tipos de microscopios electrónicos de barrido. En el

primer barrido se usó un equipo JEOL-6010LA. Para la segunda etapa con integración del EDS, se usó un Phenom XL.

Figura 4. A: Microscopio electrónico de barrido SEM JEOL-6010LA. B: Microscopio electrónico de Barrido SEM Phenom XL.



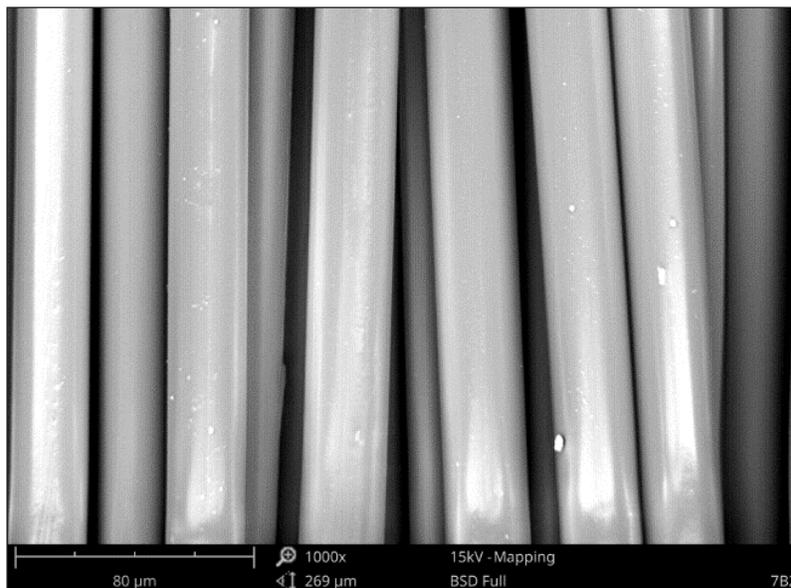
A continuación, se describe el procedimiento general efectuado:

- Se procede a generar vacío en la cámara del SEM (aplica para ambos modelos: modo bajo vacío).
- Se configuran las condiciones de rayo como voltaje (15 kV), las condiciones de cámara y de magnificación.
- Se toma imagen a 500X, 1.000X (Figura 5), 2.000X, 5.000X y 10.000X.
- Luego de registrar la información se procede a estabilizar la presión de la cámara y posteriormente se realiza el retiro de muestras.

Con el fin de lograr las condiciones técnicas necesarias para el análisis, se selecciona un rango de magnificación que no supere 10.000X, puesto que la intensidad del haz de electrones se concentraría en un área más reducida, generando así un deterioro del material de la muestra y una carga electrostática no deseada.

Las imágenes captadas de las fibras FORTEX muestran que estas tienen un diámetro estimado de $25 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$, mientras que en las fibras FIBERTEX existe mayor dispersión en las dimensiones, así como menor homogeneidad entre fibras, con un diámetro estimado de $28 \mu\text{m} \pm 11 \mu\text{m}$.

Figura 5. Imagen capturada con SEM Phenom XL de geotextil FORTEX a magnificación de 1.000X.



Técnica de caracterización con (EDS)

Como instrumento de análisis espectrográfico se usó el EDS del modelo Phenom XL, sistema que contiene una resolución de energía de ≤ 137 eV, un área activa de detección de 25 mm^2 y una ventana de (Si_3N_4) , aplicando el siguiente procedimiento:

Luego de tomar la imagen usando SEM, se procede a ejecutar un barrido o *mapping*² sobre la misma muestra y bajo las mismas condiciones.

Se aplica un barrido normal que por muestreo toma alrededor de 5 minutos.

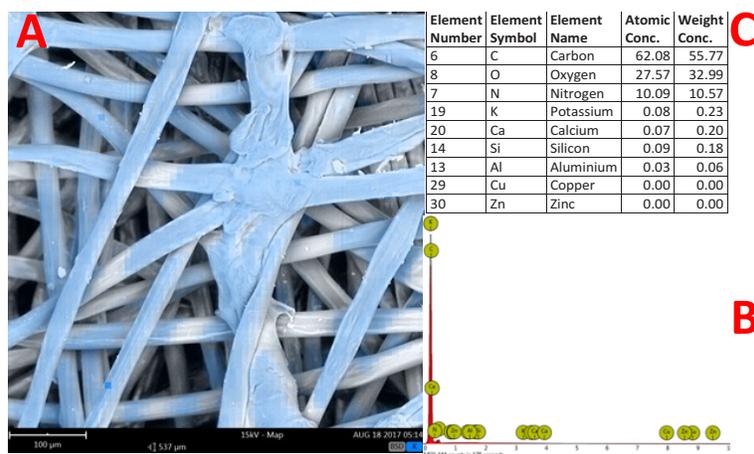
Se genera el registro de la información de *mapping*, espectrografía y distribución proporcional de los elementos químicos identificados (ver Figura 6).

Cada uno de los elementos identificados contiene una intensidad de energía que está relacionada con la cantidad de energía que se dispersa y que es capturada por el sensor. De esta forma se identifica que los picos más altos representados en el espectro corresponden a los materiales con alta probabilidad de localizarse en el punto analizado.

- Mapping*: rutina de barrido para análisis de espectro de energía dispersa en varios puntos de una muestra, en un recorrido bidimensional o en una superficie en dos dimensiones.

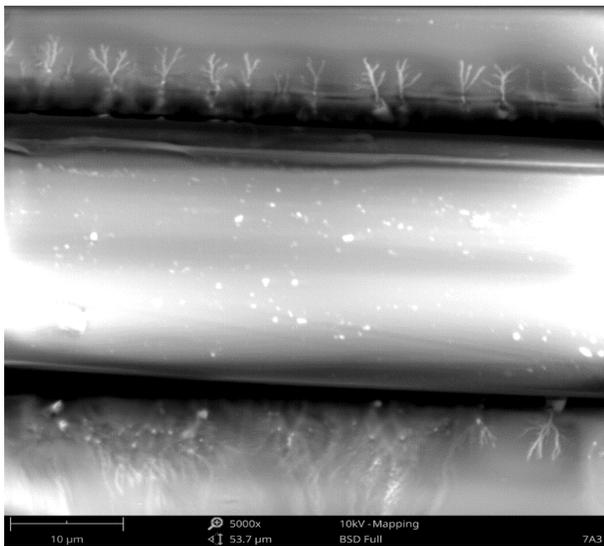
Al someter las fibras a una exposición prolongada del haz de electrones (tiempo promedio de 2 minutos) a una magnificación que oscila entre 5.000X y 10.000X, se encuentra que los patrones de alineación del haz de electrones generan patrones lineales de aproximadamente 250 nm de ancho. En la Figura 7 se ilustra la imagen de una muestra de fibra FORTEX sometida a una intensidad del haz de electrones a 10 kV, magnificación de 5.000X y una exposición de 3

Figura 6. A: mapping de geotextil FIBERTEX. B: espectro con distribución y cantidad de energía dispersa detectada por elemento identificado. C: tabla de elementos encontrados y su distribución porcentual en la muestra.



minutos. La imagen permite evidenciar la afectación lateral generada y la degradación del material de las fibras que componen este tejido. Esta reacción puede ser aprovechada para generar litografía de manera muy similar a como se realiza usando *focus ion beam lithography* (FIB).

Figura 7. Imagen de geotextil FORTEX sometida a intensidad prolongada del haz de electrones, magnificación de 5.000X.



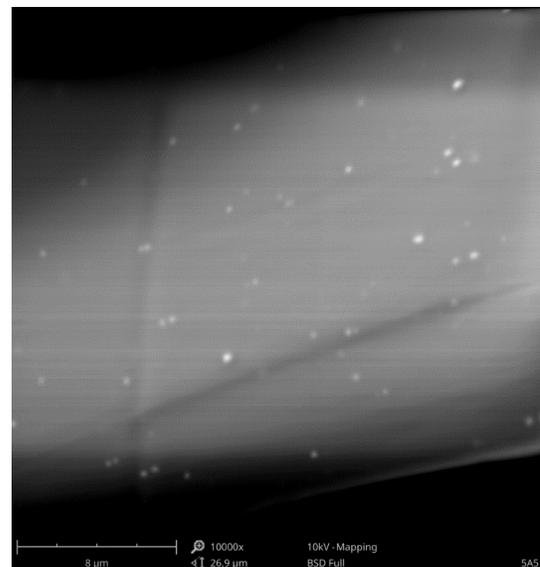
Para lograr integrar procesos de fabricación a nano escala sobre este material se requiere una caracterización del mismo que permita lograr una intervención controlada, con lo cual se pueda llevar a cabo litografía a escalas micro y nanométricas. Las posibilidades por descubrir son infinitas. Tanto es así que de lograr micro o nanolitografía sobre este material se podría realizar impresión de microcircuitos, modelamiento de micro y nanodispositivos, generación de energía con materiales piezoeléctricos, así como microsensores, microcanales, un sinnúmero de aplicaciones derivadas, y funcionalidades integradas en los geotextiles.

Aunque el alcance de este trabajo no llega a la caracterización del material para lograr micro y nanolitografía estructurada con condiciones plenamente definidas, se plantean hipótesis de las cuales derivan posibles trabajos futuros enfocados en explorar las posibilidades de las fibras y los tejidos de los geotextiles.

Existen varios trabajos en la literatura sobre micro y nanolitografía, así como sobre aplicaciones ya desarrolladas mediante el uso de técnicas tanto de caracterización como de fabricación. Una de las referencias más usadas es el cuaderno o *handbook* de nanotecnología de Barath Bhushan (2017), el cual muestra aplicaciones y técnicas que permiten lograr la fabricación de micro y nanodispositivos. En cuanto a la contribución de este trabajo, vale la pena mencionar que este se concentra en la determinación del potencial de los materiales empleados en los geotextiles para la generación de nuevas aplicaciones, a través de la integración de micro y nanotecnología.

Durante los procesos de caracterización de materiales con microscopía electrónica de barrido, los materiales se ven sometidos a un haz de electrones con una configuración de 10 kV y una magnificación de los 10.000X, tal como se muestra en la Figura 8, en donde se evidencian marcas lineales que fueron detectadas a una magnificación de 15.000X a 10 kV con una exposición de 1 minuto, aproximadamente, generando este patrón sobre la fibra que permite evidenciar el efecto litográfico sobre el mismo.

Figura 8. Litografía identificada en geotextil FORTEX cuadrante generado a 10.000X – 10 kV. Se observan nanopartículas y trazas de litografía.



Durante el proceso de caracterización también se observaron impurezas en el material del orden de los 500 nm a 2 µm de diámetro. Estas irregularidades se

presentan a pesar de aplicar estrictos protocolos de limpieza, los cuales son, sin embargo, insuficientes para remover partículas de esta magnitud. Por otra parte, se encuentra mayor homogeneidad en la distribución de las impurezas para el geotextil FORTEX, en comparación con el tejido FIBERTEX. Esto permite deducir que las fibras FORTEX tienen menor adherencia de partículas que las fibras FIBERTEX. Adicionalmente, se observa que las características morfológicas en tamaño de fibras son similares. Sin embargo, la distribución y tipo de tejido son distintos, puesto que los tejidos FIBERTEX son entrelazados y no uniformes, con aditivos incorporados, mientras que las fibras FORTEX presentan entrelazado uniforme sin aditivos. Esta característica es importante a la hora de integrar micro y nanodispositivos que se adhieran a las fibras.

RESULTADOS

Con el muestreo realizado, se encontró que del 98% de los resultados del *mapping* aplicando EDS a los geotextiles FORTEX, más del 70% están compuestos por oxígeno y más del 20% por carbono. En la muestra FIBERTEX, se encontró que del 97% del muestreo más del 60% es carbono, 25% oxígeno y 5% nitrógeno. Cabe resaltar que las fibras FORTEX son fabricadas en Colombia, mientras que las FIBERTEX son importadas de Alemania. En la Figura 9 se observan los dos geotextiles objeto de estudio a una misma magnificación (500X). En la Tabla 2 se muestra el resumen comparativo de ambos materiales.

Figura 9. A: imagen del geotextil FORTEX (tejido tomado con SEM a 500X).
B: imagen del geotextil FIBERTEX (no tejido, tomada con SEM a 500X).

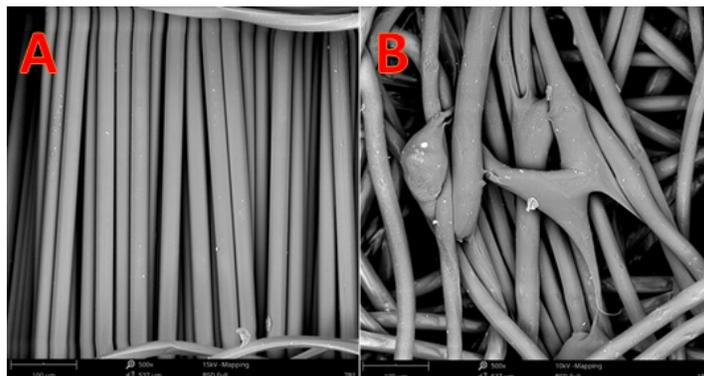


Tabla 2. Análisis de las características morfológicas y químicas de los geotextiles objeto de estudio.

Nombre del geotextil	Aplicaciones	Características morfológicas	Características químicas
FIBERTEX (imagen B) Material importado	Geotextil no tejido, con fibras vírgenes de polipropileno en seco, extruidas, cardadas y punzonadas, altas propiedades de abrasión, alta resistencia dimensional y uniformidad, resistencia a altas temperaturas, elongación superior al 50%. Aplicaciones en filtros, drenajes y separación de suelos en la construcción y protección de geomembranas.	Al ser un geotextil no tejido, se observa una clara dispersión en las fibras que conforman el geotextil, así como la presencia de aditivos que mejoran las propiedades mecánicas y químicas.	Se encuentra que el geotextil está compuesto en promedio por 60% de carbono, 25% de oxígeno, 5% de nitrógeno y el restante 10% corresponde a otros materiales como el potasio, el calcio y en silicio.

Nombre del geotextil	Aplicaciones	Características morfológicas	Características químicas
<p>FORTEX (imagen A)</p> <p>Material nacional</p>	<p>Geotextil tejido con fibras de multifilamento de poliéster de alta tenacidad (PET, caracterizado por presentar alto desempeño mecánico e hidráulico. Resistencia a UV componentes biológicos y químicos presentes en los suelos.</p> <p>Aplicaciones en vías, aeropuertos, terraplenes ferrocarriles, edificaciones, diques, presas, parqueaderos, áreas deportivas, plataformas, muros de contención, taludes de alta pendiente, canales, márgenes de ríos, diques, laderas, presas, puertos, bermas y aproches.</p>	<p>Al pertenecer a los geotextiles tejidos, se observa una morfología organizada de las fibras que conforman el geotextil, así como la no presencia de aditivos.</p>	<p>Se encuentra que el geotextil está compuesto en promedio por 70% de oxígeno, 20% de carbono y el restante 10% corresponde a otros materiales como el nitrógeno.</p>

Se encontró que las fibras FORTEX reaccionaron a la presencia del haz de electrones de forma altamente sensible, lo cual hizo que este material respondiera y presentara características que permitieron su modificación a micro y nanoescala; propiedad que no fue identificada en las fibras FIBERTEX.

Se encontró que las fibras FORTEX reportan menor adherencia de partículas de impurezas entre 500 nm y 2 µm de diámetro que las fibras FIBERTEX, característica que resulta importante a la hora de adherir micro o nanodispositivos a estas fibras.

CONCLUSIONES

Al encontrar características comparativas entre dos tipos de geotextiles a microescala, así como la aplicación de parámetros y procedimientos para la caracterización de este tipo de materiales poco explorados en otras aplicaciones, se encontró que las posibles aplicaciones en otras áreas se deben a las características morfológicas y químicas que estos geotextiles poseen. Por ello, características como la sensibilidad al haz de electrones posiblemente permitirán el uso de nanolitografía en este tipo de fibras.

De los resultados obtenidos, se puede inferir que las diferencias a nivel morfológico entre los dos geotextiles analizados se encuentran directamente relacionadas con el hecho de que sean tejidos o no tejidos, así como con sus propiedades físico-químicas, lo cual se ve representado en el tipo de aplicaciones determinadas por sus propiedades mecánicas y

químicas, tales como una gran resistencia a altas temperaturas, permeabilidad, abrasión, desempeño mecánico e hidráulico, resistencia a rayos UV entre otros (ver Tabla 2).

TRABAJOS FUTUROS

Una de las finalidades del trabajo global es encontrar una correlación y trazabilidad entre las propiedades a macro, micro y nanoescala, así como determinar propiedades especiales a micro y nanoescala que permitan dar nuevos usos a estas fibras en otras áreas y a través de distintas aplicaciones, tales como la impresión de microcircuitos que permitan la generación de energía por cambios de presión en su superficie (principio piezo-eléctrico) o la instalación de microsensores que permitan establecer puntos críticos en muros o terraplenes, ductos o vías de tráfico pesado.

Finalmente, de este trabajo puede derivar un catálogo de geotextiles con propiedades identificadas a micro y nanoescala, que contenga el análisis del uso de instrumentación típicamente usado para la caracterización de materiales a tales escalas, como es el caso de microscopios de fuerza atómica, electrónicos de barrido, rayos X, entre otros (Gates, 2018).

RECONOCIMIENTOS

Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA): Centro Metalmecánico, Centro de Manufactura Textil y del Cuero y Centro de Materiales y Ensayos, Regional-Distrito Capital.

Universidad Minuto de Dios: Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil.

Geomatrix: Empresa dedicada a la fabricación, venta e importación de geotextiles (suministro de muestras).

The Bombay Textile Research Association. (2012). *Hand Book of Geotextiles*. Bombay: BTRA.

Velde, J. K. (2008). *The role of textile and clothing industries in growth and development strategies*. N. C.: Odi.

REFERENCIAS

Anand, A. R. (2000). *Handbook of technical textiles*. Cambridge, UK: CRC Press.

Bhushan, B. (2010). *Handbook of Nanotechnology*. New York, NY, USA: Springer.

DuPont Engineering Polymers. (2000). *Technical handbook*. N. C.: Dupont.

Fundación COTEC para la Innovación Tecnológica. (2014). *Textiles Técnicos*. Recuperado en 2018 de: http://informecotec.es/media/N31_Textiles_Tec.pdf.

Gates, W. P., Dumadah, G., & Bouazza, A. (2018). Micro X-ray visualisation of the interaction of geosynthetic clay liner components after partial hydration. *Geotextiles and Geomembranes*, 46, 739-747.

GEO Matrix. (2017, 03 01). *Geo textiles*. Retrieved from: <https://www.geomatrix.co/>.

Ingold, T. (1994). *Geotextiles and Geomembranes Handbook*. Elsevier Ltd.

Jahan, M. W. (2018). Using a geotextile with flocculated filter backwash water and its impact on aluminium concentrations. *Geotextiles and Geomembranes*, 46, 759-769.

Koerner, R. (2016). *Geotextiles From Design to Applications*. Woodhead Publishing

SCOPUS (2018, 09 14). *SCOPUS*. Retrieved from: <https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/results/results>.

uri?numberOfFields=0&src=s&clickedLink=&edit=&editSaveSearch=&origin=searchbasic&authorTab=&affiliationTab=&advancedTab=&scint=1&menu=search&tablin=&searchterm1=geotex&field1=TITLE_ABS_KEY&dateTyp

Producción de nanofibras poliméricas mediante el proceso de *electrospinning* y su uso potencial

Production of polymeric nanofibers by *electrospinning* process and its potential use

Alis Pataquiva Mateus

Ingeniera Química de la Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Biotecnología de la Universidad de Sao Paulo y PhD en Ingeniería Biomédica de la Universidad de Porto
Profesora de la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-2953-5132>
alisy.pataquivam@utadeo.edu.co

Sebastián Coba Daza

Ingeniero Químico de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano
Profesor de la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-0613-5232>
jorges.cobad@utadeo.edu.co

Fecha de recepción: 14 de noviembre del 2017
Fecha de aceptación: 10 de septiembre del 2018

Sugerencia de citación: Pataquiva Mateus, A. y Coba Daza, S. (2018).
Producción de nanofibras poliméricas mediante el proceso de *electrospinning* y su uso potencial. *Mutis* 8(1) 17-33,
doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1375>

Editor: Gerard, Olivar-Tost

RESUMEN

En este artículo de revisión se presentan las diferentes formas de fabricación de nanofibras de polímeros haciendo énfasis tanto en la técnica de *electrospinning*, la cual es un proceso sencillo, versátil y adecuado para la fabricación de materiales unidimensionales (1D), como en los parámetros que se deben considerar al utilizar este método; además, se señala la importancia de los parámetros de procesamiento (voltaje, distancia y flujo), de solución (concentración, viscosidad y tensión superficial) y ambientales (temperatura y humedad). Finalmente, se mencionan las distintas aplicaciones que involucran nanofibras en campos de acción como energía, ingeniería de tejidos, medio ambiente y alimentos.

Palabras clave: fibras, *electrospinning*, aplicaciones, nanotecnología.

ABSTRACT

This review article presents different ways to synthesize polymer nanowires emphasizing the electrospinning technique, which is a simple, versatile, and suitable process for the production of unidimensional structures (1D), and the parameters that should be considered when using this method; besides, it accents the importance of processing parameters (voltage, distance, and flow), solution parameters (concentration, viscosity, and superficial



tension), and environmental parameters (temperature and humidity). Finally, it shows the different applications of nanowires in fields such as energy, tissue engineering, environment, and food.

Keywords: nanofibers, electrospinning, applications, nanotechnology.

INTRODUCCIÓN

El uso creciente de materiales unidimensionales (1D) como nanofibras, nanohojas, nanotubos, nanocables y nanocintas ha aumentado significativamente en los últimos años, debido a sus propiedades y a su gran potencial de aplicabilidad (Alivisatos *et al.*, 1998; Ozin, 1992; Schulz, 2000; Wang, Shen, Yao y Park, 2009; Wernsdorfer y Sessoli, 1999). Las técnicas para la creación de dichos materiales son muy variadas e

incluyen la litografía, la vía hidrotérmica, así como la deposición química en fase vapor (Wang, 2000).

Cuando las estructuras pasan de tener un tamaño micrométrico a submicrométrico, sus propiedades cambian (Haider, Haider y Kang, 2015). En la Tabla 1 se muestra como estos cambios se ven reflejados en la aparición de características importantes (Zheng-Ming, Zhang, Kotaki y Ramakrishna, 2003).

Tabla 1. Comparación de propiedades de un material al reducir su tamaño

Tamaño micrométrico	Tamaño submicrométrico
Baja proporción área/volumen	Alta proporción área/volumen
Bajo desempeño de propiedades mecánicas	Alto desempeño de propiedades mecánicas
Baja capacidad de funcionalizar la superficie	Alta capacidad de funcionalizar la superficie

Fuente: elaboración propia.

La técnica de *electrospinning*, también llamada electrohilado, hace uso de las fuerzas eléctricas para producir fibras de tamaño micro y nanométrico (Ahn *et al.*, 2006): se realiza una descarga de alto voltaje sobre la solución polimérica, la cual forma un cono llamado cono de Taylor, del cual se desprenden las fibras (Doshi y Reneker, 1995; Taylor, 1969). Diferentes parámetros –como voltaje, caudal, distancia, humedad, concentración del polímero usado, entre otros– influyen en el proceso (Li y Wang, 2013a), por lo que es necesario tener en cuenta cada uno de estos a fin de proporcionar el tamaño de fibra adecuado según los requerimientos.

El aumento de publicaciones¹ acerca de la técnica de *electrospinning* para la producción de nanofibras se debe a la facilidad de esta técnica (Haider *et al.*, 2015),

al volumen que puede producir, a su fácil escalabilidad (Da Silva Vaz, Vieira Costa y De Moraes, 2017) y a la aplicabilidad del producto obtenido (Liang, Hsiao y Chu, 2007). En la Figura 1 se muestra el número de publicaciones en la base de datos Scopus (2017) que incluyen la palabra *electrospinning* entre 2007 y 2017; se evidencia que esta técnica ha atraído cada vez más la atención de los investigadores.

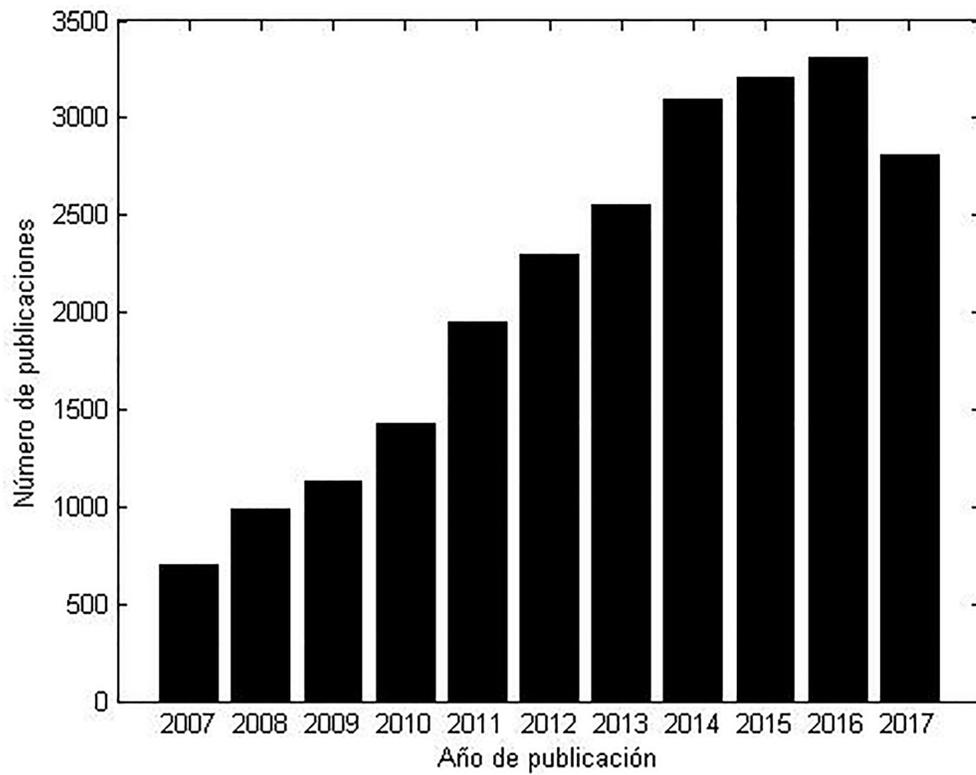
En este artículo de revisión se presentan las diferentes rutas de fabricación para la producción de nanofibras, y se profundiza en la técnica de *electrospinning*, haciendo énfasis en el efecto de las variables de operación y en las promisorias aplicaciones de este tipo de material en distintos campos de aplicación.

RUTAS DE FABRICACIÓN

Existen diferentes rutas de síntesis para la fabricación de nanofibras de polímero (ver Figura 2). A continuación, se explican cada una de estas rutas.

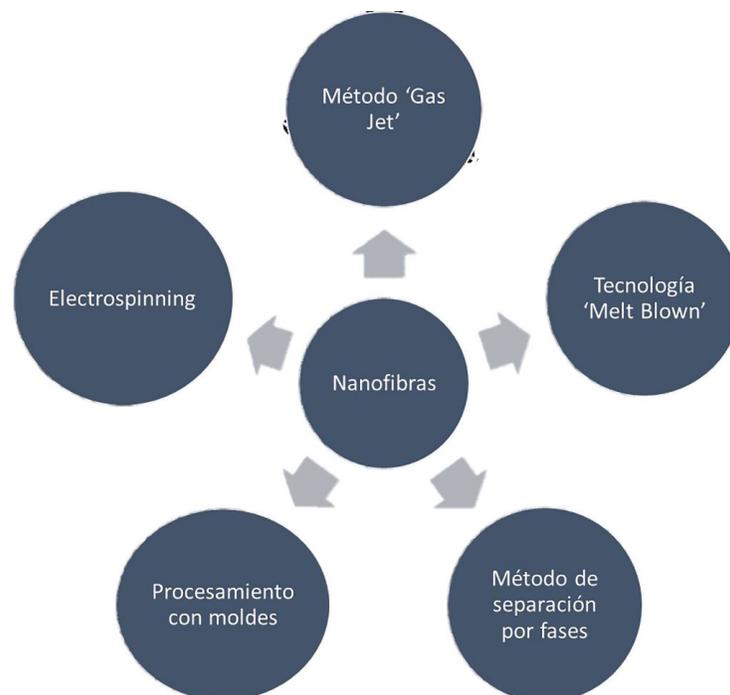
1 Por publicaciones se entiende: artículos científicos, documentos de conferencias, revisiones, artículos de prensa, revisión de conferencias, capítulos de libros, erratas, notas, encuestas cortas, editoriales, libros, cartas, artículos de negocios e informes.

Figura 1. Número de publicaciones con la palabra *electrospinning*



Fuente: Scopus (2017).

Figura 2. Rutas de síntesis para la fabricación de nanofibras.



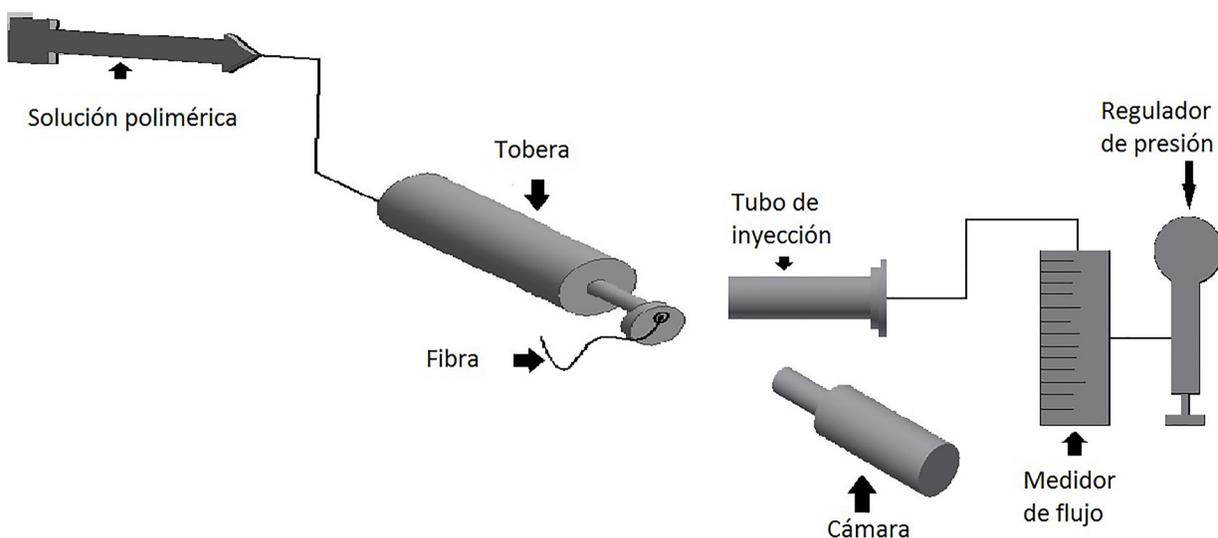
Fuente: elaboración propia.

Método *gas jet*

El procesamiento de nanofibras por el método *gas jet* consiste en varios pasos: primero, la solución polimérica se lleva a una tobera y se extrude a flujo constante por medio de una bomba; cuando la solución polimérica llega al final del capilar acoplado a la tobera, se encuentra con un flujo constante de gas (generalmente aire) proveniente de un sistema de expansión de gas; a continuación, el gas evapora

el solvente y se genera un hilo, que finalmente se recolecta a unos cuantos centímetros para su posterior uso (Benavides, Jana y Reneker, 2012; Reneker, 2003, 2004; Reneker, Chun y Ertley, 2002) (ver Figura 3). Con esta técnica se obtienen fibras de tamaño micrométrico y nanométrico, los cuales dependen de la capacidad de evaporación del solvente, la velocidad y la presión del gas, entre otros factores (Benavides, Jana y Reneker, 2013).

Figura 3. Esquema de producción de nanofibras con el método *gas jet*.



Fuente: elaboración propia.

Tecnología *melt blown*

El procesamiento de nanofibras mediante la tecnología *melt blown* consiste en la extrusión de un polímero fundido a través de un orificio: cuando la primera gota de polímero sale por dicho orificio, un flujo de gas caliente (generalmente aire) se suministra a 45 °C por encima y por debajo (ver Figura 4), produciendo así un cono y consecutivamente el hilo, el cual es recolectado en un colector (Ellison, Phatak, Giles, Macosko y Bates, 2007). Esta técnica permite la fabricación de fibras de tamaño nanométrico y, además, es amigable con el medio ambiente (Nayak, 2017).

una serie de condiciones termodinámicas no favorables para la estabilidad, como exponerla a otro solvente inmisible o disminuir la temperatura por debajo de la curva binodal de solubilidad; estas condiciones no favorables hacen que el polímero tome una ruta para establecer su equilibrio con el sistema. Esta ruta resulta en la formación de estructuras nanométricas como las nanofibras, que se obtienen una vez se elimina el solvente (He, Nie y Feng, 2014) (ver Figura 5). Por lo general, esta técnica se emplea en la fabricación de nanofibras naturales con miras a ser aplicadas en la ingeniería de tejidos (Ma y Zhang, 1999).

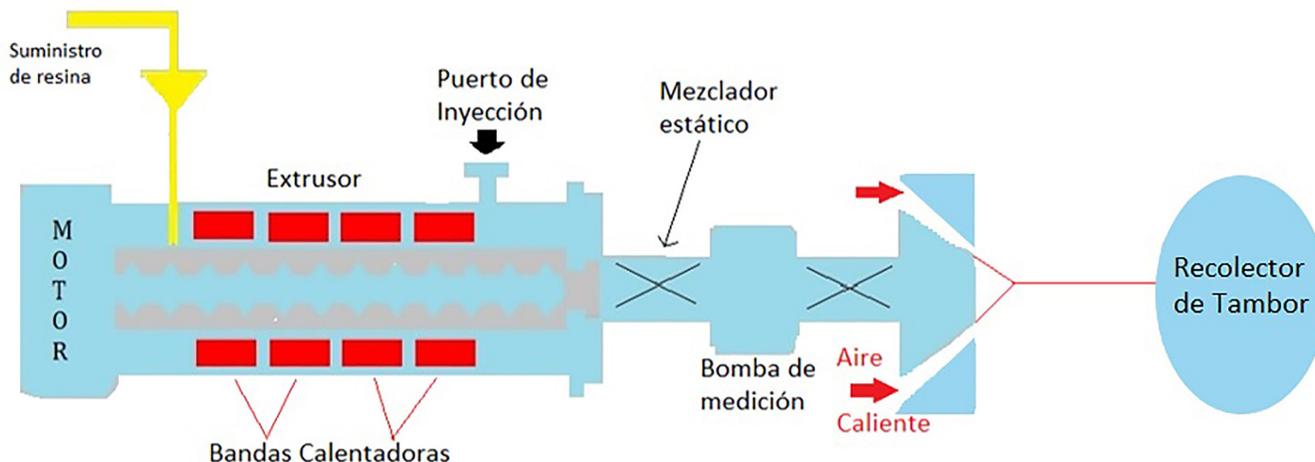
Método de separación por fases

La producción de fibras por el método de separación por fases consiste en proporcionar a la solución polimérica

Procesamiento con moldes

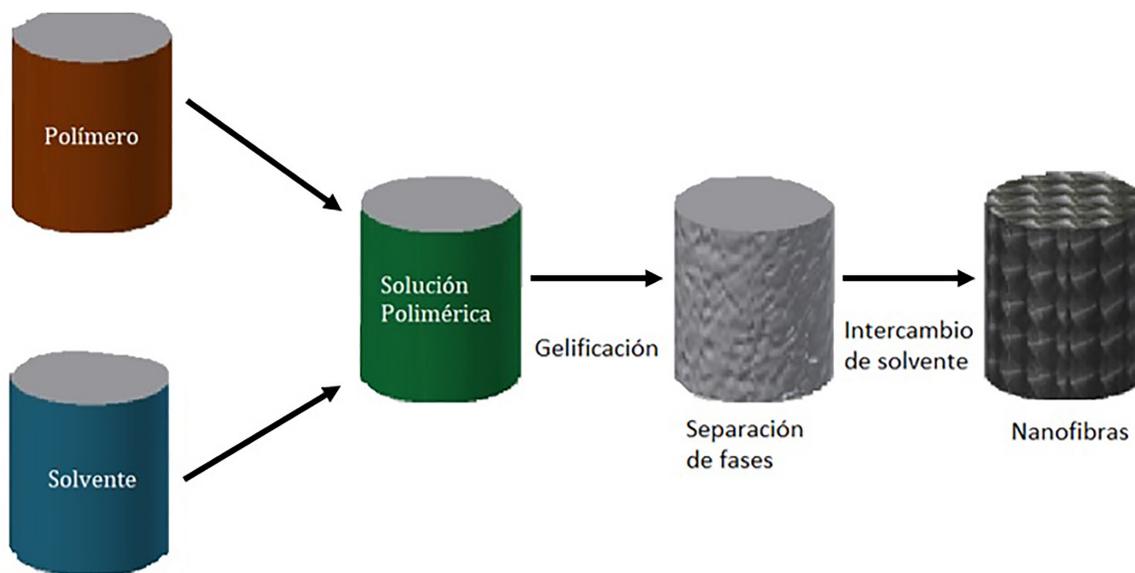
El procesamiento con moldes es una técnica efectiva para controlar la morfología en la producción de materiales a escala nanométrica (Emre Kiyak

Figura 4. Esquema de producción de nanofibras con la tecnología *melt blown*.



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Esquema de producción de nanofibras con el método de separación por fases.

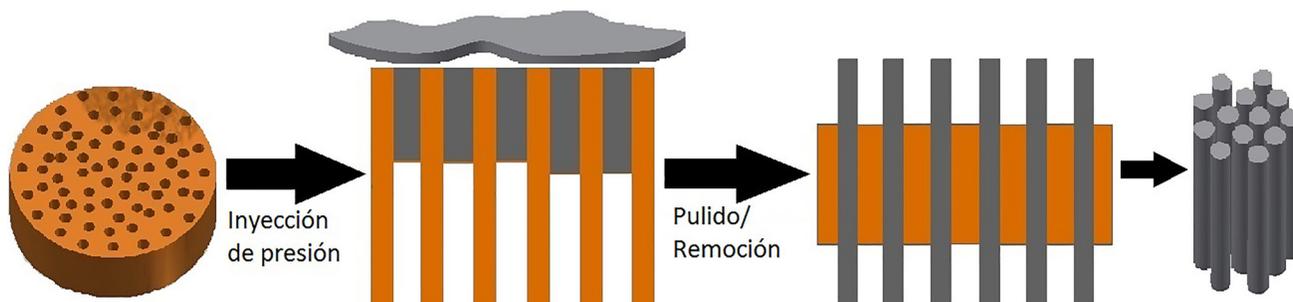


Fuente: elaboración propia.

y Cakmak, 2014; Wang y Qi, 2008). Esta técnica proporciona un tamaño adecuado del material que se quiere producir, por cuanto el molde facilita que se rellenen las estructuras con el elemento apropiado; de esta manera, se obtienen diferentes tipos de materiales unidimensionales como nanotubos, nanofibras, nanocintas, entre otros (Al-Kaysi *et al.*, 2009; Liang *et al.*, 2016) (ver Figura 6). Aunque esta

ruta de síntesis es atractiva porque permite controlar el tamaño de las estructuras formadas (Naik *et al.*, 2009), es costosa porque los moldes de los precursores usados se obtienen por métodos de morfosíntesis como la litografía (Jiao *et al.*, 2006; Son *et al.*, 2004; Xia *et al.*, 2003); otra desventaja del proceso radica en la dificultad de deshacer el molde para obtener finalmente la estructura (Wang y Qi, 2008).

Figura 6. Esquema de producción de nanofibras con la técnica de procesamiento con moldes.



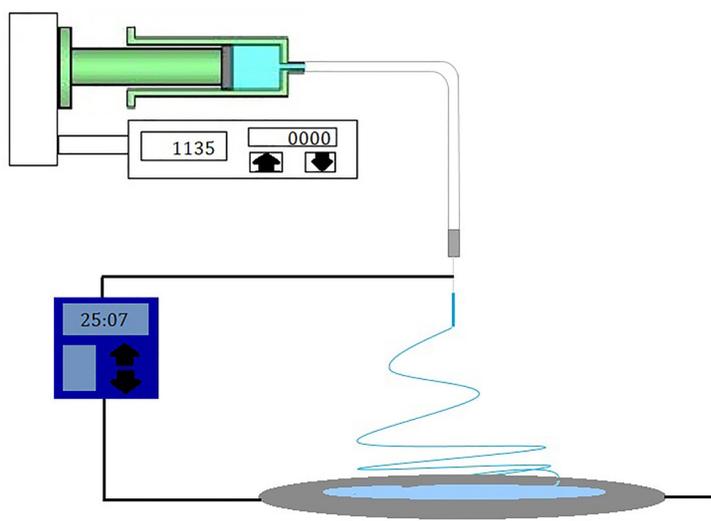
Fuente: elaboración propia.

Técnica de *electrospinning*

La técnica de *electrospinning* consiste en la creación de un cono, llamado cono de Taylor, debido a la acción de las fuerzas eléctricas sobre la superficie de un polímero del cual se obtienen las nanofibras y el colector utilizado (Deitzel, 2002; El-Newehy, Al-Deyab, Kenawy, y Abdel-Megeed, 2011; Nirmala, Navamathavan, El-Newehy y Kim, 2011; Pedicini y Farris, 2004; Reneker y Chun, 1996; Yuan, Zhang, Dong y Sheng, 2004) (ver Figura 7). En este proceso se pueden emplear tanto polímeros naturales y sintéticos como mezclas de polímeros y polímeros funcionalizados con diferentes materiales, lo cual permite un amplio rango de diversas aplicaciones (Li y Wang, 2013b).

Las características de las fibras obtenidas mediante *electrospinning* tienen gran potencial en aplicaciones como filtración, prendas protectoras, ingeniería de tejidos, apósitos para heridas, sistemas de liberación controlada de medicamentos, sensores y materiales ópticos, entre otros (Damodar, You y Chou, 2009; Rajesh, Ahuja y Kumar, 2009; Yoo, Kim y Park, 2009; Yang, Both, Yang, Walboomers y Jansen, 2009). El uso de polímeros funcionalizados con nanopartículas o diferentes materiales permiten que la matriz polimérica electrohilada se aplique en distintos ámbitos, por ejemplo: en catálisis, cuando se agregan nanopartículas o nanotubos de TiO_2 , así como en propiedades antimicrobianas y protectoras de rayos UV, cuando se agrega grafeno (Pant *et al.*, 2012).

Figura 7. Esquema de producción de nanofibras con la técnica de *electrospinning*.



Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 2 se comparan las diferentes rutas de síntesis para la producción de nanofibras y se incluyen tanto las ventajas como las desventajas de

cada método. A partir de esta información, se deduce que el *electrospinning* es una de las técnicas más atractivas.

Tabla 2. Comparación de las rutas de síntesis para la producción de nanofibras

Proceso	Facilidad de procesamiento	Ventajas	Desventajas	Referencias
Método <i>gas jet</i>	Fácil	Uso de aire como gas impulsor. Posibilidad de usar varios polímeros.	Problemas en el ajuste de la presión y el flujo de gas óptimo.	(Benavides <i>et al.</i> , 2012; Ghosh y Jana, 2015)
Tecnología <i>melt blown</i>	Fácil	Capacidad de manejo de muchos polímeros, así como mezclas de estos. No hay problemas por manejo de solventes.	Proceso apto únicamente para polímeros termoplásticos.	(Bhat y Malkan, 2002)
Método de separación por fases	Fácil	Posibilidad de adaptar propiedades mecánicas.	Bajo rendimiento. Limitado a ciertos polímeros.	(Poole y Owens, 2003)
Procesamiento con moldes	Difícil	Controlabilidad sobre la morfología del material obtenido. Materiales específicos y viables para aplicaciones en el campo biomédico.	Producción costosa por el uso de moldes que se deben fabricar con base en métodos como la litografía	(Vasita y Katti, 2006)
Técnica de <i>electrospinning</i>	Fácil	Económico. Fibras continuas. Facilidad de funcionalización. Posibilidad de fibras alineadas.	Uso de solventes orgánicos nocivos para la salud y el medio ambiente. Restricción en la controlabilidad.	(Kamiyama, Soeda, Nagajima y Tanaka, 2012; Poole y Owens, 2003)

Fuente: elaboración propia.

EFFECTOS DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN

La producción de nanofibras mediante el método de *electrospinning* está determinada por los parámetros operacionales del proceso, las características de la solución utilizada y los factores ambientales bajo los cuales se produce. A continuación, se profundizará sobre el efecto de cada uno de estos parámetros en la producción de nanofibras.

Parámetros de procesamiento

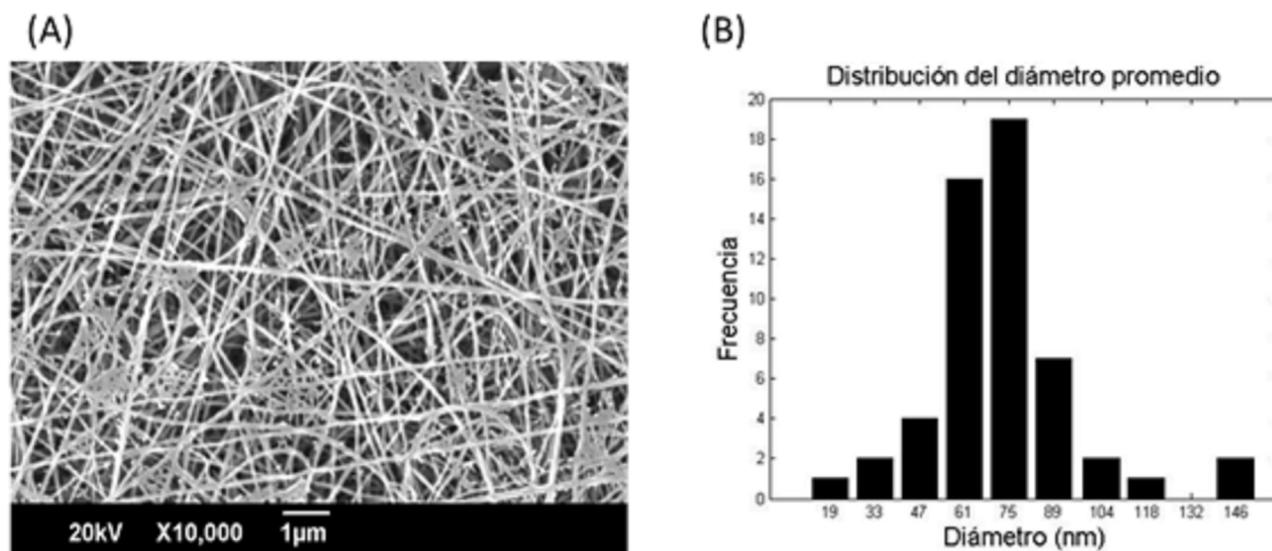
Voltaje. El voltaje desempeña un rol importante en este proceso, únicamente con un voltaje superior al umbral –o crítico– se genera un cono de Taylor que es expulsado hacia el colector empleado (Li y Wang, 2013a). El uso de altos voltajes facilita la formación de nanofibras de menor diámetro (Yuan *et al.*, 2004) y hace que el producto obtenido tenga forma de telaraña (Pant *et al.*, 2010) (ver Figura 8).

Caudal. El caudal es otro de los parámetros importantes en esta ruta de síntesis. En la literatura

se menciona que un flujo pequeño (entre 0.1 y 1 mL/h) es apropiado porque permite que la solución se polarice y, así, se pueda formar adecuadamente el cono de Taylor (Buchko, Chen, Shen y Martin, 1999). Asimismo, un flujo pequeño permite que el solvente utilizado se evapore y el polímero salga en forma de hilo (Li y Wang, 2013a). En el estudio de Buchko *et al.* (1999), un flujo igual a 0.66 mL/h en la producción de nanofibras de polisulfona (PSF) proporcionó diámetros aún más pequeños que los valores mencionados.

Distancia aguja-colector. Se ha probado que la distancia entre la aguja y el colector influye en el diámetro de la fibra obtenida (Ki *et al.*, 2005). Si la distancia es muy pequeña, la formación de nanofibras se ve afectada debido a que el solvente no tiene suficiente tiempo para evaporarse; por el contrario, si la distancia es muy grande, las fibras tienden a formar gotas que afectan su uniformidad (Li y Wang, 2013a). Por esta razón, es importante usar un método de optimización como lo hacen Yuan *et al.* (2004) en su estudio, donde concluyen que los parámetros más importantes en el procesamiento y fabricación de

Figura 8. Formación de nanofibras de *nylon* con una configuración tipo telaraña, donde (A) es la micrografía obtenida con voltaje = 29 kV, flujo = 3 mL/h y distancia ajuga-colector = 9 cm, y (B) es la distribución del diámetro promedio de las nanofibras obtenidas.



Fuente: elaboración propia.

nanofibras son: la distancia aguja-colector, el caudal, el voltaje y la concentración de la solución utilizada.

Colector. Los colectores usados durante el proceso de *electrospinning* son importantes porque son el sustrato donde se depositan las fibras. Las características de los colectores están determinadas por varios factores; sin embargo, se recomienda que sean superficies conductoras (generalmente aluminio) para que la descarga de alto voltaje se realice adecuadamente; además, el colector usado debe desprenderse rápidamente de la fibra una vez esta se ha depositado allí. Los colectores que se utilizan actualmente son: mallas (Wang *et al.*, 2005), cuadrículas (Sundaray *et al.*, 2004), tambores rotatorios o varillas giratorias (Xu, Inai, Kotaki y Ramakrishna, 2004), baños líquidos (Ki *et al.*, 2007), entre otros.

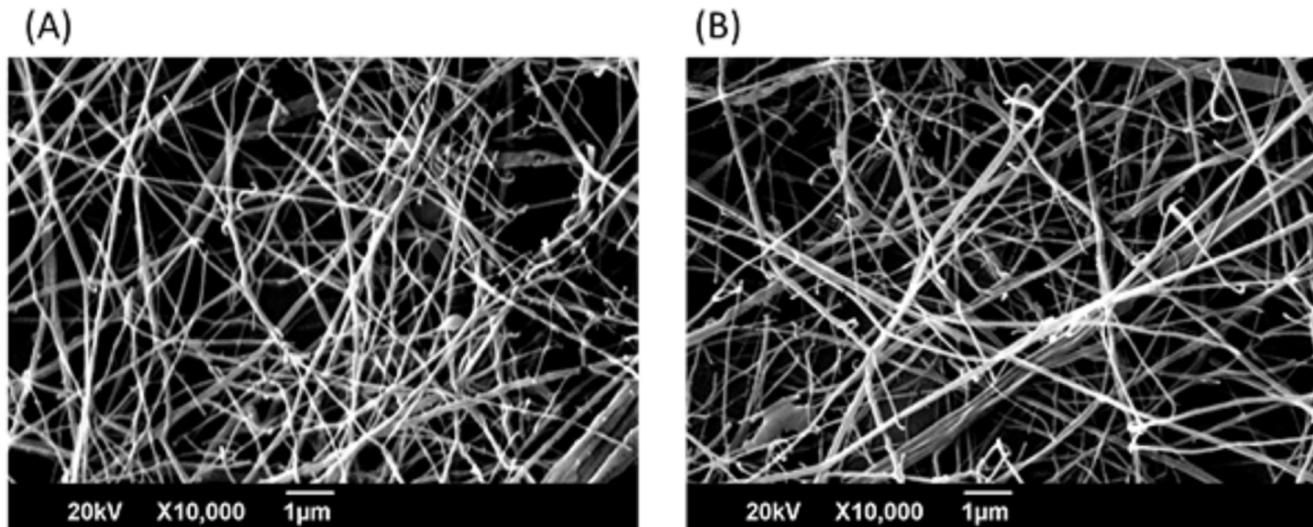
Parámetros de la solución

Concentración y polímero. Este método permite la producción de nanofibras de diferentes polímeros, siempre y cuando estos puedan solubilizarse. En la Figura 9 se comparan nanofibras de *nylon* y PVP obtenidas mediante el proceso de *electrospinning*. La concentración de la solución empleada es de gran importancia: cuando la concentración es muy baja, se obtienen micro o nanopartículas y, si se aumenta un

poco la concentración, aparecen nanofibras con gotas, es decir, fibras no uniformes; si la concentración es adecuada, las nanofibras se producen continuamente, pero, si es muy alta, no hay producción de nanofibras (Li y Wang, 2013a).

Peso molecular y viscosidad. Es importante conocer el peso molecular del polímero usado, ya que determina indirectamente la viscosidad de la solución debido a las cadenas de los enlaces poliméricos (Li y Wang, 2013a). Por tanto, la viscosidad debe tenerse en cuenta tanto en el bombeo o impulso del polímero como en la formación del cono de Taylor, dado que una viscosidad muy elevada no permite que se genere el cono, ocasiona la expulsión de polímero por la aguja e impide la creación de las fibras. Por otro lado, si la viscosidad es muy baja, no se pueden obtener fibras continuas y uniformes, por lo que es necesario ajustar el valor de la viscosidad (y de la concentración) para conseguir el tamaño y las características morfológicas adecuadas de las fibras (Sukigara, Gandhi, Ayutsede, Micklus y Ko, 2003).

Figura 9. Micrografía SEM de nanofibras (A) de PVP con voltaje = 27 kV, flujo = 5 mL/h y distancia aguja-colector = 9 cm, y (B) de nylon con voltaje = 29 kV, flujo = 1 mL/h y distancia aguja-colector = 13 cm.



Fuente: elaboración propia

Parámetros ambientales

Temperatura y humedad. Los parámetros ambientales más importantes a tener en cuenta en la producción de nanofibras de polímero con *electrospinning* son la temperatura y la humedad. Se ha demostrado que, a medida que la temperatura incrementa, el diámetro de las fibras (fibras de poliamida-6) disminuye; el rango de temperatura adecuado para la fabricación de fibras de este polímero va desde 20 °C (ambiente) hasta 60 °C (Mit-uppatham, Nithitanakul y Supaphol, 2004). En cuanto a la humedad, una poca cantidad de vapor de agua en el ambiente hace que el solvente pueda evaporarse más rápido, lo cual facilita la formación de las fibras; sin embargo, cuando la humedad del ambiente es alta, el diámetro de las nanofibras aumenta porque se neutralizan las cargas sobre la superficie del cono de Taylor, haciendo que las fuerzas eléctricas disminuyan; el rango de humedad adecuado para la fabricación de nanofibras está entre 0% y 50% (Casper, Stephens, Tassi, Chase y Rabolt, 2003).

APLICACIONES

La técnica de *electrospinning* tiene una gran variedad de aplicaciones en la industria debido a su versatilidad en cuanto a formas y materiales. A continuación,

se presentan las aplicaciones que han sido más estudiadas, las cuales van desde la ingeniería de tejidos hasta los alimentos.

Ingeniería de tejidos

Diferentes polímeros naturales y sintéticos electrohilados se han empleado como scaffolds (o andamios celulares) en la regeneración de ciertos tejidos especializados, entre los que se encuentran:

- Piel: polímeros empleados como matrices extracelulares (ECM) transitorias para la regeneración cutánea en quemaduras o heridas, protegiendo de infecciones y de pérdida de fluidos (Braghirolli, Steffens y Pranke, 2014; Van der Veen, Boekema, Ulrich y Middelkoop, 2011).
- Nervio: polímeros empleados como uniones entre los puntos terminales de un nervio afectado por un corte o trauma físico, de manera que se pueda realizar reconexión unidireccional y crecimiento orientado de los axones y las células de Schwann (Braghirolli *et al.*, 2014; Masaeli *et al.*, 2013).
- Vasos sanguíneos: polímeros empleados para guiar el contacto y la adhesión de las células hospederas, incrementando la respuesta biológica

y la regeneración vascular (Braghirolli *et al.*, 2014; Mrówczyński *et al.*, 2014).

- Cartilago: polímeros empleados como scaffolds para el sembrado celular de condrocitos y la regeneración de tejido cartilaginoso, el cual se caracteriza por presentar un comportamiento anisotrópico debido a la orientación y organización de la matriz extracelular.
- Hueso: polímeros empleados como facilitadores de reparación de tejido óseo afectado por traumas o enfermedades, y habitualmente funcionalizados con factores osteogénicos y/o materiales nanoestructurados, como hidroxiapatita, que permiten tener resistencia mecánica y diferenciación celular osteogénica (Braghirolli *et al.*, 2014; Jose *et al.*, 2010; Lee, Rim, Jung y Shin, 2010).
- Columna vertebral: polímeros empleados para guiar la regeneración espontánea de neuronas y axones; sin embargo, los métodos efectivos para su reconstrucción son muy escasos y no han permitido contrarrestar totalmente el déficit permanente funcional y neurológico causado por trauma, degradación o inflamación del tejido, o necrosis celular (Braghirolli *et al.*, 2014; Du *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2013).

Adicionalmente, la técnica de *electrospinning* ha sido empleada en la fabricación de *scaffolds* que, además de mostrar resistencia mecánica y estar diseñados con precisión, permiten actuar de manera local, selectiva y controlada. Si bien se deben considerar muchas variables, como la solubilidad y estabilidad del agente a ser encapsulado, también se debe tener en cuenta la naturaleza y estructura de la fibra, de manera que permita una liberación que evite concentraciones tóxicas que vayan al torrente sanguíneo (Khalf y Madihally, 2017; Kruger, Benck, Singer y Kramer, 2012)

Energía

Entre las tecnologías que producen energía libre de carbono, se encuentran las celdas de combustible de óxido sólido (SOFC, por sus siglas en inglés), las cuales han sido la tecnología líder en las últimas décadas. Las SOFC son sistemas de conversión de energía que convierten los combustibles directamente en energía a través de reacciones electroquímicas. Como las celdas

de combustible evitan el proceso de combustión que prevalece en las tecnologías convencionales de producción de energía, emiten mucho menos carbono (Pintauro *et al.*, 2007; Tsipis y Kharton, 2008).

Las SOFC tienen una eficiencia muy alta que generalmente aumenta cuando se introduce la cogeneración; su principal ventaja es la flexibilidad en cuanto a combustible, ya que puede usar hidrógeno o cualquier hidrocarburo. Una SOFC consiste en un ánodo, un cátodo y un electrolito; un combustible y un oxidante se introducen en el ánodo y el cátodo, respectivamente; la reacción electroquímica tiene lugar debido a la diferencia en el potencial químico a través del electrolito sólido, el cual se selecciona de modo que solo permite que los iones de óxido lo atraviesen y bloqueen los electrones; por lo tanto, se utiliza un circuito externo para aprovechar esta concentración de electrones (Pintauro *et al.*, 2007; Tsipis y Kharton, 2008).

Desde hace varios años, el electrohilado se ha utilizado en las SOFC para dar soporte con nanofibras de polímero, brindando continuidad junto con una serie de métodos innovadores como el prensado isostático en frío, la extrusión y la fundición en gel (Aruna, Balaji, Kumar y Prakash, 2017; Orera, Laguna-Bercero y Larrea, 2014). La producción de energía limpia ha sido el principal campo de investigación durante este siglo y probablemente lo seguirá siendo. Se ha evidenciado una creciente preocupación por el medio ambiente, así como una intensa contaminación, en la cual la energía es determinante debido a la generación de gases de efecto invernadero. Por esto, la necesidad de producir energía limpia se ha vuelto más importante que nunca (Aruna *et al.*, 2017).

La técnica de electrohilado es un método eficiente y prometedor en la producción de nanofibras. Si se utiliza adecuadamente, tendrá un gran impacto en cómo se fabrican los electrodos SOFC, en los que actualmente predomina la cerámica en polvo. Dado que se trata de una técnica de producción rentable que proporciona una microestructura muy favorable en términos de porosidad continua y sitios de reacción relativamente más altos que con electrodos en polvo, las nanofibras han mejorado significativamente el rendimiento de las SOFC, duplicando la densidad de potencia y reduciendo su polarización en medio de técnicas de química verde (Aruna *et al.*, 2017).

Medio ambiente

La creciente preocupación por el cambio climático y la contaminación hídrica y atmosférica ha suscitado estudios exhaustivos sobre la posibilidad de descontaminar las fuentes acuíferas por medio de métodos fotocatalíticos, con diferentes catalizadores sostenidos sobre matrices poliméricas electrohiladas (Patil *et al.*, 2017). Yang *et al.* (2013) desarrollaron un compuesto de polipirrol con Ag-TiO₂ y demostraron una capacidad fotocatalítica interesante, que puede utilizarse en el tratamiento de aguas. Otros estudios que usan nanopartículas, nanotubos y nanohojas de TiO₂ o de ZnO en diferentes estados cristalinos, como rutilo o anatasa, aportan a una solución efectiva de la degradación de compuestos orgánicos en el agua (Ganesh, Nair, Raut, Walsh y Ramakrishna, 2012; Lai, Wang, Zhao, Fong y Zhu, 2013; Lang, Wu y Xu, 2012; Meng *et al.*, 2011).

Además, las nanofibras obtenidas mediante el proceso de *electrospinning* tienen la capacidad de estar en sistemas de filtración de alta eficiencia, los cuales retienen compuestos o elementos como metales pesados (Celebioglu, Yildiz y Uyar, 2017; Faccini *et al.*, 2015). Por ejemplo, los valores de eficiencia obtenidos en fibras electrohiladas de *nylon-6* son del orden de 99.993%; mientras que, en filtros comerciales, esta eficiencia es de aproximadamente 99.97% (Barhate y Ramakrishna, 2007). Estos sistemas pueden emplearse para gases o líquidos; en el caso de aguas residuales obtenidas en plantas de tratamiento, las nanofibras son funcionalizadas con nanopartículas para reducir la actividad microbiana patógena (Lev, Holba, Kalhotka, Mikula y Kimmer, 2012).

Por otro lado, los sistemas de sensores se basan en un circuito electrónico que puede detectar cambios físicos y químicos en su superficie debido a la absorción de un estimulante químico; estos estimulantes modifican las propiedades eléctricas del circuito (sensor) y, de esta forma, se pueden correlacionar los cambios en las mediciones eléctricas con cantidades medibles (Patil *et al.*, 2017). Recientemente, se han evaluado sensores basados en nanofibras de diferentes polímeros, los cuales se emplean en la detección de contaminantes de agua y suelo, como sensores de temperatura y de campo magnético, y en el control de emisiones y alarmas de gas (Kumar, Al-Dossary, Kumar y Umar, 2015).

Alimentos

El desperdicio y la protección de alimentos son problemas tanto económicos como sociales. En el sector de alimentos, las nanofibras tienen una aplicación de alto impacto en el empaque y conservación de estos. Dumitriu, Mitchell, Davis y Vasile (2017) desarrollaron estudios sobre la capacidad antioxidante de nanofibras de poli(α -caprolactona) con vitamina E para usar en empaques alimenticios y demostraron que la gran área superficial de las nanofibras, junto con la adición del agente antioxidante (vitamina E), proporciona al material las características adecuadas para retardar el deterioro de los alimentos por acción enzimática y oxidante.

Otra aplicación interesante de las nanofibras en alimentos es la nanoencapsulación de componentes bioactivos (agentes bioactivos se encuentran dentro de las nanofibras), los cuales son moléculas que proveen beneficios a la salud humana como la prevención de aparición de enfermedades causadas por actividad oxidante, inflamatoria o cancerígena (Wen, Zong, Linhardt, Feng y Wu, 2017). Recientes estudios demuestran que la encapsulación de componentes, como enzimas, proteínas, probióticos, entre otros, es un medio eficiente porque protege a estas moléculas del oxígeno no deseado debido a reacciones de oxidación; además, la encapsulación permite mejorar la estabilidad de las moléculas bioactivas y la capacidad de incrementar la viabilidad de probióticos, los cuales son importantes para fabricar alimentos funcionales. Otra ventaja es la habilidad de enmascarar olores y sabores para mejorar la aceptación de un producto, así como el control sobre la preservación de los alimentos en la cadena de frío (Fabra, López-Rubio y Lagaron, 2016; Pérez-Masiá, López-Rubio, Fabra y Lagaron, 2014; Wen *et al.*, 2017).

CONCLUSIONES

El proceso de *electrospinning* se caracteriza por ser simple, rentable y versátil para la producción de nanofibras; además, es atractivo porque proporciona fibras funcionales en el rango de micrómetros y nanómetros, lo cual permite tener características como alta relación superficie/volumen, adecuada porosidad y morfologías adaptables. Los parámetros de procesamiento, de solución y ambientales que influyen en la producción de nanofibras son de gran

importancia, ya que estos deben responder a los requerimientos de las diferentes aplicaciones en cuanto a la morfología de las nanofibras. El uso de nanofibras en los campos de energía, ingeniería de tejidos, medio ambiente y alimentos tiene un gran potencial para la solución de problemáticas de alto impacto. Por último, persisten retos acerca del uso de fibras electrohiladas, relacionados con el modelamiento bajo diferentes parámetros y las aplicaciones tanto en alimentos como en medicina para la liberación controlada de nutrientes y medicamentos, respectivamente.

REFERENCIAS

- Ahn, Y. C., Park, S. K., Kim, G. T., Hwang, Y. J., Lee, C. G., Shin, H. S. y Lee, J. K. (2006). Development of high efficiency nanofilters made of nanofibers. *Current Applied Physics*, 6(6), 1030-1035. doi: 10.1016/j.cap.2005.07.013
- Al-Kaysi, R. O., Ghaddar, T. H. y Guirado, G. (2009). Fabrication of One-Dimensional Organic Nanostructures Using Anodic Aluminum Oxide Templates. *Journal of Nanomaterials*, 2009, 1-14. doi: 10.1155/2009/436375
- Alivisatos, P., Barbara, P. F., Castleman, A. W., Chang, J., Dixon, D. A., Klein, M. L., ... Thompson, M. E. (1998). From Molecules to Materials: Current Trends and Future Directions. *Advanced Materials*, 10(16), 1297-1336. doi: 10.1002/(SICI)1521-4095(199811)10:16<1297::AID-ADMA1297>3.0.CO;2-7
- Aruna, S. T., Balaji, L. S., Kumar, S. S. y Prakash, B. S. (2017). Electrospinning in solid oxide fuel cells – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 673-682. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.003
- Barhate, R. S. y Ramakrishna, S. (2007). Nanofibrous filtering media: Filtration problems and solutions from tiny materials. *Journal of Membrane Science*, 296(1), 1-8. doi: 10.1016/j.memsci.2007.03.038
- Benavides, R. E., Jana, S. C. y Reneker, D. H. (2012). Nanofibers from Scalable Gas Jet Process. *ACS Macro Letters*, 1(8), 1032-1036. doi: 10.1021/mz300297g
- Benavides, R. E., Jana, S. C. y Reneker, D. H. (2013). Role of Liquid Jet Stretching and Bending Instability in Nanofiber Formation by Gas Jet Method. *Macromolecules*, 46(15), 6081-6090. doi: 10.1021/ma400900s
- Bhat, G. S. y Malkan, S. R. (2002). Extruded continuous filament nonwovens: Advances in scientific aspects. *Journal of Applied Polymer Science*, 83(3), 572-585. doi: 10.1002/app.2259
- Braghirolli, D. I., Steffens, D. y Pranke, P. (2014). Electrospinning for regenerative medicine: a review of the main topics. *Drug Discovery Today*, 19(6), 743-753. doi: 10.1016/j.drudis.2014.03.024
- Buchko, C. J., Chen, L. C., Shen, Y. y Martin, D. C. (1999). Processing and microstructural characterization of porous biocompatible protein polymer thin films. *Polymer*, 40(26), 7397-7407. doi: 10.1016/S0032-3861(98)00866-0
- Casper, C. L., Stephens, J. S., Tassi, N. G., Chase, D. B. y Rabolt, J. F. (2003). Controlling Surface Morphology of Electrospun Polystyrene Fibers: Effect of Humidity and Molecular Weight in the Electrospinning Process. *Macromolecules*, 37(2), 573-578. doi: 10.1021/MA0351975
- Celebioglu, A., Yildiz, Z. I. y Uyar, T. (2017). Electrospun crosslinked poly-cyclodextrin nanofibers: Highly efficient molecular filtration thru host-guest inclusion complexation. *Scientific Reports*, 7. doi: 10.1038/s41598-017-07547-4
- Da Silva Vaz, B., Vieira Costa, J. A. y De Moraes, M. G. (2017). Production of polymeric nanofibers with different conditions of the electrospinning process. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 22(2). doi: 10.1590/s1517-707620170002.0180
- Damodar, R. A., You, S.-J. y Chou, H.-H. (2009). Study the self cleaning, antibacterial and photocatalytic properties of TiO₂ entrapped PVDF membranes. *Journal of Hazardous Materials*, 172(2-3), 1321-1328. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.07.139
- Deitzel, J. (2002). Electrospinning of polymer nanofibers with specific surface chemistry. *Polymer*, 43(3), 1025-1029. doi: 10.1016/S0032-3861(01)00594-8

- Doshi, J. y Reneker, D. H. (1995). Electrospinning process and applications of electrospun fibers. *Journal of Electrostatics*, 35(2-3), 151-160. doi: 10.1016/0304-3886(95)00041-8
- Du, B., Zeng, C., Zhang, W., Quan, D., Ling, E. y Zeng, Y. (2014). A comparative study of gelatin sponge scaffolds and PLGA scaffolds transplanted to completely transected spinal cord of rat. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 102(6), 1715-1725. doi: 10.1002/jbm.a.34835
- Dumitriu, R. P., Mitchell, G. R., Davis, F. J. y Vasile, C. (2017). Functionalized Coatings by Electrospinning for Anti-oxidant Food Packaging. *Procedia Manufacturing*, 12, 59-65. doi: 10.1016/j.promfg.2017.08.008
- El-Newehy, M. H., Al-Deyab, S. S., Kenawy, E.-R. y Abdel-Megeed, A. (2011). Nanospider Technology for the Production of Nylon-6 Nanofibers for Biomedical Applications. *Journal of Nanomaterials*, 2011, 1-8. doi: 10.1155/2011/626589
- Ellison, C. J., Phatak, A., Giles, D. W., Macosko, C. W. y Bates, F. S. (2007). Melt blown nanofibers: Fiber diameter distributions and onset of fiber breakup. *Polymer*, 48(11), 3306-3316. doi: 10.1016/j.polymer.2007.04.005
- Emre Kiyak, Y. y Cakmak, E. (2014). Nanofiber Production Methods. *Electronic Journal of Textile Technologies / Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(3), 49-60. Recuperado de http://teknolojikarastirmalar.com/pdf/tr/04_2014_8_3_1169_1945.pdf
- Fabra, M. J., López-Rubio, A. y Lagaron, J. M. (2016). Use of the electrohydrodynamic process to develop active/bioactive bilayer films for food packaging applications. *Food Hydrocolloids*, 55, 11-18. doi: 10.1016/j.foodhyd.2015.10.026
- Faccini, M., Borja, G., Boerrigter, M., Morillo Martín, D., Martínez Crespiera, S., Vázquez-Campos, S., ... Amantia, D. (2015). Electrospun Carbon Nanofiber Membranes for Filtration of Nanoparticles from Water. *Journal of Nanomaterials*, 2015, 1-9. doi: 10.1155/2015/247471
- Ganesh, V. A., Nair, A. S., Raut, H. K., Walsh, T. M. y Ramakrishna, S. (2012). Photocatalytic superhydrophilic TiO₂ coating on glass by electrospinning. *RSC Advances*, 2(5), 2067-2072. doi: 10.1039/c2ra00921h
- Ghosh, M. y Jana, S. C. (2015). Bi-component inorganic oxide nanofibers from gas jet fiber spinning process. *RSC Advances*, 5(127), 105313-105318. doi: 10.1039/C5RA20963C
- Haider, A., Haider, S. y Kang, I.-K. (2015). A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology. *Arabian Journal of Chemistry*. doi: 10.1016/j.arabjc.2015.11.015
- He, C., Nie, W. y Feng, W. (2014). Engineering of biomimetic nanofibrous matrices for drug delivery and tissue engineering. *Journal of Materials Chemistry B*, 2(45), 7828-7848. doi: 10.1039/C4TB01464B
- Jiao, S., Xu, L., Jiang, K. y Xu, D. (2006). Well-Defined Non-spherical Copper Sulfide Mesocages with Single-Crystalline Shells by Shape-Controlled Cu₂O Crystal Templating. *Advanced Materials*, 18(9), 1174-1177. doi: 10.1002/adma.200502386
- Jose, M. V., Thomas, V., Xu, Y., Bellis, S., Nyairo, E. y Dean, D. (2010). Aligned Bioactive Multi-Component Nanofibrous Nanocomposite Scaffolds for Bone Tissue Engineering. *Macromolecular Bioscience*, 10(4), 433-444. doi: 10.1002/mabi.200900287
- Kamiyama, M., Soeda, T., Nagajima, S. y Tanaka, K. (2012). Development and application of high-strength polyester nanofibers. *Polymer Journal*, 44(10), 987-994. doi: 10.1038/pj.2012.63
- Khalf, A. y Madihally, S. V. (2017). Recent advances in multiaxial *electrospinning* for drug delivery. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 112, 1-17. doi: 10.1016/j.ejpb.2016.11.010
- Ki, C. S., Baek, D. H., Gang, K. D., Lee, K. H., Um, I. C. y Park, Y. H. (2005). Characterization of gelatin nanofiber prepared from gelatin-formic acid solution. *Polymer*, 46(14), 5094-5102. doi: 10.1016/j.polymer.2005.04.040

- Ki, C. S., Kim, J. W., Hyun, J. H., Lee, K. H., Hattori, M., Rah, D. K. y Park, Y. H. (2007). Electrospun three-dimensional silk fibroin nanofibrous scaffold. *Journal of Applied Polymer Science*, 106(6), 3922-3928. doi: 10.1002/app.26914
- Kruger, B., Benck, U., Singer, T. y Kramer, B. K. (2012). Drug-induced impairment of renal function. *Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 137(38), 1873-1877. doi: 10.1055/s-0032-1305312
- Kumar, R., Al-Dossary, O., Kumar, G. y Umar, A. (2015). Zinc Oxide Nanostructures for NO₂ Gas-Sensor Applications: A Review. *Nano-Micro Letters*, 7(2), 97-120. doi: 10.1007/s40820-014-0023-3
- Lai, C., Wang, X., Zhao, Y., Fong, H. y Zhu, Z. (2013). Effects of humidity on the ultraviolet nanosensors of aligned electrospun ZnO nanofibers. *RSC Advances*, 3(18), 6640-6645. doi: 10.1039/c3ra23420g
- Lang, L., Wu, D. y Xu, Z. (2012). Controllable Fabrication of TiO₂ 1D-Nano/Micro Structures: Solid, Hollow, and Tube-in-Tube Fibers by Electrospinning and the Photocatalytic Performance. *Chemistry - A European Journal*, 18(34), 10661-10668. doi: 10.1002/chem.201200378
- Lee, J. H., Rim, N. G., Jung, H. S. y Shin, H. (2010). Control of Osteogenic Differentiation and Mineralization of Human Mesenchymal Stem Cells on Composite Nanofibers Containing Poly[lactic-co-(glycolic acid)] and Hydroxyapatite. *Macromolecular Bioscience*, 10(2), 173-182. doi: 10.1002/mabi.200900169
- Lev, J., Holba, M., Kalhotka, L., Mikula, P. y Kimmer, D. (2012). Improvements in the Structure of Electrospun Polyurethane Nanofibrous Materials Used for Bacterial Removal from Wastewater. *International Journal of Theoretical and Applied Nanotechnology*, 1(1), 16-20. doi: 10.11159/ijtan.2012.003
- Li, Z. y Wang, C. (2013a). Effects of Working Parameters on Electrospinning. En *One-Dimensional nanostructures* (pp. 15-28). Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-36427-3_2
- Li, Z. y Wang, C. (2013b). Introduction of Electrospinning. En *One-Dimensional nanostructures* (pp. 1-13). Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-36427-3_1
- Liang, D., Hsiao, B. S. y Chu, B. (2007). Functional electrospun nanofibrous scaffolds for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 59(14), 1392-1412. doi: 10.1016/j.addr.2007.04.021
- Liang, L., Kang, X., Sang, Y. y Liu, H. (2016). One-Dimensional Ferroelectric Nanostructures: Synthesis, Properties, and Applications. *Advanced Science*, 3(7). doi: 10.1002/adv.201500358
- Liu, J., Chen, Q., Zhang, Z., Zheng, Y., Sun, X., Cao, X., ... Jiang, P. (2013). Fibrin scaffolds containing ectomesenchymal stem cells enhance behavioral and histological improvement in a rat model of spinal cord injury. *Cells Tissues Organs*, 198(1), 35-46. doi: 10.1159/000351665
- Ma, P. X. y Zhang, R. (1999). Synthetic nano-scale fibrous extracellular matrix. *Journal of Biomedical Materials Research*, 46(1), 60-72. Recuperado de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10357136>
- Masaeli, E., Morshed, M., Nasr-Esfahani, M. H., Sadri, S., Hilderink, J., Van Apeldoorn, A., ... Moroni, L. (2013). Fabrication, Characterization and Cellular Compatibility of Poly(Hydroxy Alkanoate) Composite Nanofibrous Scaffolds for Nerve Tissue Engineering. *PLOS ONE*, 8(2). doi: 10.1371/journal.pone.0057157
- Meng, X., Shin, D.-W., Yu, S. M., Jung, J. H., Kim, H. I., Lee, H. M., ... Yoo, J.-B. (2011). Growth of hierarchical TiO₂ nanostructures on anatase nanofibers and their application in photocatalytic activity. *CrystEngComm*, 13(8), 3021-3029. doi: 10.1039/c0ce00765j
- Mit-uppatham, C., Nithitanakul, M. y Supaphol, P. (2004). Ultrafine Electrospun Polyamide-6 Fibers: Effect of Solution Conditions on Morphology and Average Fiber Diameter. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 205(17), 2327-2338. doi: 10.1002/macp.200400225

- Mrówczyński, W., Mugnai, D., De Valence, S., Tille, J. C., Khabiri, E., Cikirikcioglu, M., ... Walpoth, B. H. (2014). Porcine carotid artery replacement with biodegradable electrospun poly-ε-caprolactone vascular prosthesis. *Journal of Vascular Surgery*, 59(1), 210-219. doi: 10.1016/J.JVS.2013.03.004
- Naik, N., Caves, J., Kumar, V., Chaikof, E. y Allen, M. G. (2009). A template-based fabrication technique for spatially-designed polymer micro/nanofiber composites. *Digest of Technical Papers. International Conference on Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems, 2009*, 1869-1872. doi: 10.1109/SENSOR.2009.5285711
- Nayak, R. (2017). *Polypropylene nanofibers. Melt electrospinning versus meltblowing*. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-61458-8
- Nirmala, R., Navamathavan, R., El-Newehy, M. H. y Kim, H. Y. (2011). Preparation and electrical characterization of polyamide-6/chitosan composite nanofibers via electrospinning. *Materials Letters*, 65(3), 493-496. doi: 10.1016/j.matlet.2010.10.066
- Orera, V. M., Laguna-Bercero, M. A. y Larrea, A. (2014). Fabrication Methods and Performance in Fuel Cell and Steam Electrolysis Operation Modes of Small Tubular Solid Oxide Fuel Cells: A Review. *Frontiers in Energy Research*, 2(22). doi: 10.3389/fenrg.2014.00022
- Ozin, G. A. (1992). Nanochemistry: Synthesis in diminishing dimensions. *Advanced Materials*, 4(10), 612-649. doi: 10.1002/adma.19920041003
- Pant, H. R., Bajgai, M. P., Yi, C., Nirmala, R., Nam, K. T., Baek, W. y Kim, H. Y. (2010). Effect of successive electrospinning and the strength of hydrogen bond on the morphology of electrospun nylon-6 nanofibers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 370(1-3), 87-94. doi: 10.1016/j.colsurfa.2010.08.051
- Pant, H. R., Park, C. H., Tijjing, L. D., Amarjargal, A., Lee, D.-H. y Kim, C. S. (2012). Bimodal fiber diameter distributed graphene oxide/nylon-6 composite nanofibrous mats via electrospinning. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 407, 121-125. doi: 10.1016/j.colsurfa.2012.05.018
- Patil, J. V., Mali, S. S., Kamble, A. S., Hong, C. K., Kim, J. H. y Patil, P. S. (2017). Electrospinning: A versatile technique for making of 1D growth of nanostructured nanofibers and its applications: An experimental approach. *Applied Surface Science*, 423, 641-674. doi: 10.1016/j.apsusc.2017.06.116
- Pedicini, A. y Farris, R. J. (2004). Thermally induced color change in electrospun fiber mats. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 42(5), 752-757. doi: 10.1002/polb.10711
- Pérez-Masiá, R., López-Rubio, A., Fabra, M. J. y Lagaron, J. M. (2014). Use of electrohydrodynamic processing to develop nanostructured materials for the preservation of the cold chain. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 26, 415-423. doi: 10.1016/j.ifset.2014.10.010
- Pintauro, P., Mather, P., Arnoult, O., Choi, J., Wycisk, R. y Lee, K. M. (2007). Composite Membranes for Hydrogen/Air PEM Fuel Cells. *ECS Transactions*, 11(1), 79-87. doi: 10.1149/1.2780917
- Poole, C. P. y Owens, F. J. (2003). *Introduction to nanotechnology*. John Wiley & Sons.
- Rajesh, Ahuja, T. y Kumar, D. (2009). Recent progress in the development of nano-structured conducting polymers/nanocomposites for sensor applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 136(1), 275-286. doi: 10.1016/J.SNB.2008.09.014
- Reneker, D. H. (2003). *Process and apparatus for the production of nanofibers*. Google Patents. Recuperado de <https://www.google.ch/patents/US6520425>
- Reneker, D. H. (2004). *Process and apparatus for the production of nanofibers*. Google Patents. Recuperado de <http://www.google.ch/patents/US6695992>
- Reneker, D. H. y Chun, I. (1996). Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning. *Nanotechnology*, 7(3).

- Reneker, D. H., Chun, I. y Ertley, D. (2002). *Process and apparatus for the production of nanofibers*. Google Patents. Recuperado de <https://www.google.ch/patents/US6382526>
- Schulz, W. (2000). Nanotechnology: The next big thing. *Chemical and Engineering News*, 78(18), 41-47. doi: 10.1021/cen-v078n018.p041
- Scopus. (2017). *Journal title list*. Recuperado de <https://www.scopus.com>
- Son, D. H., Hughes, S. M., Yin, Y. y Alivisatos, A. Paul (2004). Cation Exchange Reactions in Ionic Nanocrystals. *Science*, 306(5698), 1009-1012. doi: 10.1126/science.1103755
- Sukigara, S., Gandhi, M., Ayutsede, J., Micklus, M. y Ko, F. (2003). Regeneration of *Bombyx mori* silk by electrospinning—part 1: processing parameters and geometric properties. *Polymer*, 44(19), 5721-5727. doi: 10.1016/S0032-3861(03)00532-9
- Sundaray, B., Subramanian, V., Natarajan, T. S., Xiang, R.-Z., Chang, C.-C. y Fann, W.-S. (2004). Electrospinning of continuous aligned polymer fibers. *Applied Physics Letters*, 84(7), 1222-1224. doi: 10.1063/1.1647685
- Taylor, G. (1969). Electrically Driven Jets. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 313(1515), 453-475. doi: 10.1098/rspa.1969.0205
- Tsipis, E. V. y Kharton, V. V. (2008). Electrode materials and reaction mechanisms in solid oxide fuel cells: a brief review. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 12(11), 1367-1391. doi: 10.1007/s10008-008-0611-6
- Van der Veen, V. C., Boekema, B. K. H. L., Ulrich, M. M. W. y Middelkoop, E. (2011). New dermal substitutes. *Wound Repair and Regeneration*, 19(s1), s59-s65. doi: 10.1111/j.1524-475X.2011.00713.x
- Vasita, R. y Katti, D. S. (2006). Nanofibers and their applications in tissue engineering. *International Journal of Nanomedicine*, 1(1), 15-30. Recuperado de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17722259>
- Wang, G., Shen, X., Yao, J. y Park, J. (2009). Graphene nanosheets for enhanced lithium storage in lithium ion batteries. *Carbon*, 47(8), 2049-2053. doi: 10.1016/j.carbon.2009.03.053
- Wang, H. y Qi, L. (2008). Controlled Synthesis of Ag₂S, Ag₂Se, and Ag Nanofibers by Using a General Sacrificial Template and Their Application in Electronic Device Fabrication. *Advanced Functional Materials*, 18(8), 1249-1256. doi: 10.1002/adfm.200700953
- Wang, X., Um, I. C., Fang, D., Okamoto, A., Hsiao, B. S. y Chu, B. (2005). Formation of water-resistant hyaluronic acid nanofibers by blowing-assisted electro-spinning and non-toxic post treatments. *Polymer*, 46(13), 4853-4867. doi: 10.1016/j.polymer.2005.03.058
- Wang, Z. L. (2000). Characterizing the Structure and Properties of Individual Wire-Like Nanoentities. *Advanced Materials*, 12(17), 1295-1298. doi: 10.1002/1521-4095(200009)12:17<1295::AID-ADMA1295>3.0.CO;2-B
- Wen, P., Zong, M.-H., Linhardt, R. J., Feng, K. y Wu, H. (2017). Electrospinning: A novel nano-encapsulation approach for bioactive compounds. *Trends in Food Science & Technology*, 70, 56-68. doi: 10.1016/j.tifs.2017.10.009
- Wernsdorfer, W. y Sessoli, R. (1999). Quantum phase interference and parity effects in magnetic molecular clusters. *Science*, 284(5411), 133-135. doi: 10.1126/science.284.5411.133
- Xia, Y., Yang, P., Sun, Y., Wu, Y., Mayers, B., Gates, B., ... Yan, H. (2003). One-Dimensional Nanostructures: Synthesis, Characterization, and Applications. *Advanced Materials*, 15(5), 353-389. doi: 10.1002/adma.200390087
- Xu, C. Y., Inai, R., Kotaki, M. y Ramakrishna, S. (2004). Aligned biodegradable nanofibrous structure: a potential scaffold for blood vessel engineering. *Biomaterials*, 25(5), 877-886. Recuperado de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14609676>
- Yang, F., Both, S. K., Yang, X., Walboomers, X. F. y Jansen, J. A. (2009). Development of an electrospun nano-apatite/PCL composite membrane for GTR/GBR

application. *Acta Biomaterialia*, 5(9), 3295-3304.
doi: 10.1016/J.ACTBIO.2009.05.023

Yang, Y., Wen, J., Wei, J., Xiong, R., Shi, J. y Pan, C. (2013). Polypyrrole-Decorated Ag-TiO₂ Nanofibers Exhibiting Enhanced Photocatalytic Activity under Visible-Light Illumination. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5(13), 6201-6207. doi: 10.1021/am401167y

Yoo, H. S., Kim, T. G. y Park, T. G. (2009). Surface-functionalized electrospun nanofibers for tissue engineering and drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 61(12), 1033-1042. doi: 10.1016/J.ADDR.2009.07.007

Yuan, X., Zhang, Y., Dong, C. y Sheng, J. (2004). Morphology of ultrafine polysulfone fibers prepared by electrospinning. *Polymer International*, 53(11), 1704-1710. doi: 10.1002/pi.1538

Zheng-Ming, H., Zhang, Y.-Z., Kotaki, M. y Ramakrishna, S. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 63(15), 2223-2253. doi: 10.1016/S0266-3538(03)00178-7

Evaluación a nivel laboratorio de la capacidad de remoción de materia orgánica de *Chlorella vulgaris* en las aguas residuales de la PTAR Salitre

Laboratory evaluation of the organic matter removal capacity of *Chlorella vulgaris* in wastewater from the Salitre WWTP

Juan Andrés Sandoval Herrera

Ingeniero Químico de la Universidad Industrial de Santander
Profesor de la Universidad de América, Bogotá, Colombia
<https://orcid.org/0000-0001-8957-1421>
juan.sandoval@profesores.uamerica.edu.co

Brian Orlando Malo Malo

Ingeniero Químico de la Universidad de América, Bogotá, Colombia

Julián Camilo Cartagena Arévalo

Ingeniero Químico de la Universidad de América, Bogotá, Colombia

Diego Rubio Fernández

Biólogo de la Universidad Militar Nueva Granada, Maestría en Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, Colombia
Profesor de la Universidad de América, Bogotá, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-0760-9567>
diego.rubio@investigadores.uamerica.edu.co

Fecha de recepción: 15 de septiembre del 2017

Fecha de aceptación: 2 de julio del 2018

Sugerencia de citación: Sandoval Herrera, J. A., Malo Malo, B. O., Cartagena Arévalo, J.C. y Rubio Fernández, D. (2018). Evaluación a nivel laboratorio de la capacidad de remoción de materia orgánica de *Chlorella vulgaris* en las aguas residuales de la PTAR Salitre. *Mutis*, 8(1), 34-42, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1368>

Editor: Gerard Olivar-Tost

RESUMEN

El proceso primario realizado por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Salitre no logra una remoción mayor del 60% de materia orgánica. En esta investigación se realizó un biotratamiento con la microalga *Chlorella vulgaris* de las aguas residuales tratadas por esta planta, antes de su vertimiento, haciendo énfasis en la remoción de materia orgánica por demanda química de oxígeno y sólidos suspendidos totales, para evaluar su eficiencia. También se evaluó la incidencia de la microalga en otros parámetros fisicoquímicos. Una vez culminado el biotratamiento, se analizaron los parámetros mencionados en el sobrenadante para comparar los resultados del tratamiento químico realizado por la PTAR Salitre (remoción por DQO de 35,30% y 57,51% por SST) con el mejor resultado del biotratamiento (muestra 1: 81,80% por DQO y 89,91% por SST). Finalmente, se obtuvo un mejor porcentaje de remoción de DQO con respecto a los resultados de trabajos similares de otros autores.

Palabras clave: biorremediación, aguas residuales, remoción de materia orgánica, microalga.



ABSTRACT

The primary process carried out by the Salitre Wastewater Treatment Plant (WWTP) does not achieve a removal rate higher than 60% of organic matter. In this research, a biotreatment was done with the microalgae *Chlorella vulgaris* of the wastewater treated by this plant, prior to its dumping, with an emphasis on the removal of organic matter by chemical demand of oxygen and total suspended solids, in order to evaluate its efficiency. The incidence of microalgae in other physicochemical parameters was also evaluated. At the end of the biotreatment, the mentioned parameters were analyzed in the supernatant to compare the results of the chemical treatment performed by the Salitre WWTP (COD removal of 35.30% and 57.51% by SST) with the best biotreatment result (Sample 1: 81.80% by COD and 89.91% by SST). Finally, a better CDO removal percentage was achieved in relation to similar works by other authors.

Keywords: bioremediation, wastewater, organic matter removal, microalgae.

INTRODUCCIÓN

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Salitre, ubicada en el noroccidente de la ciudad de Bogotá, trata 4 m³/s de aguas residuales provenientes de la cuenca El Salitre-Torca, la cual está conformada por seis localidades: Suba, Engativá, Chapinero, Barrios Unidos, Teusaquillo y Usaquén, y tiene una población de 2.850.200 personas. El tratamiento que se realiza en esta planta es de tipo primario químicamente asistido (Guerrero, 1996; Metcalf & Eddy Inc., 1981; Ramalho, 2003; Romero, 2004).

Aunque por ahora no se realiza ningún otro tratamiento en la PTAR Salitre, hoy en día existen nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales domiciliarias como la electrocoagulación, la radiación ultravioleta, el ultrasonido y la biorremediación. Esta última consiste en la utilización de microorganismos para depurar contaminantes en el suelo y el agua (Acosta, 2004; Chacón, Andrade, Cárdenas, Araujo y Morales, 2004; Garbisu, Amézaga y Alkorta, 2002; Tafur y Estrada, 2015); por ejemplo, la biorremediación emplea microalgas como la *Chlorella vulgaris* (Herrera, 2010; Olarte y Valencia, 2016; Wang *et al.*, 2010). No obstante, esta tecnología aún no está implementada a gran escala en Colombia.

El objetivo del presente artículo es evaluar el uso de la microalga *Chlorella vulgaris* para la remoción de materia orgánica de las aguas tratadas en la PTAR Salitre a nivel de laboratorio, mediante la adecuación de las condiciones de cultivo que garanticen su crecimiento; el acondicionamiento de la microalga al nuevo sustrato: agua residual; y el análisis de los parámetros fisicoquímicos relacionados con la

eventual disminución de carga de materia orgánica en el efluente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del agua residual

El primer paso del tratamiento realizado en la PTAR Salitre consiste en la retención de los residuos sólidos en el cribado grueso, mediante rejas paralelas separadas entre sí cinco centímetros. De ahí, el agua es conducida al cribado fino, donde los residuos pequeños son retirados por medio de rastrillos y depositados en una banda transportadora que los lleva, junto con los residuos gruesos removidos en el cribado grueso, hacia el contenedor para su disposición final. A continuación, en los canales de grasas y desarenadores, se adiciona cloruro férrico y un polielectrolito aniónico al agua para facilitar la coagulación de las partículas en suspensión y separar las arenas y grasas por sedimentación y decantación, respectivamente. Después, el agua pasa a unos decantadores para remover la materia que aún contiene. Finalmente, se vierte al río Bogotá con un porcentaje de 40% a 50% de materia orgánica (Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá, s.f.).

El punto de partida de este proyecto fue el análisis de las propiedades fisicoquímicas del agua que sale de la planta para ser vertida al río Bogotá. En la Tabla 1 se presentan los valores promedio del muestreo puntual, realizado el 5 de septiembre de 2016.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica del agua residual tratada

Característica fisicoquímica	Resultado	Unidad
pH	7,63	
Alcalinidad	225	mg-CaCO ₃ /L
Conductividad	833	µs/cm
Sólidos suspendidos totales (SST)	116	mg/L
Sólidos totales (ST)	704	mg/L
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	92	mg/L
Sólidos volátiles (SV)	410	mg/L
DQO	361	mg/L-O ₂
Turbiedad	89	NTU

Fuente: elaboración propia con base en datos de la PTAR Salitre del 5 de septiembre del 2016.

Desarrollo del cultivo

La finalidad de esta etapa del proceso fue obtener una cantidad suficiente de biomasa de microalga *Chlorella vulgaris* para llevar a cabo las pruebas posteriores.

Condiciones iniciales. Con base en la literatura consultada (Abalde, Cid, Fidalgo, Torres y Herrero, 1995; Ángel y Pimienta, 2012; Monroy, 2014; Moronta, Mora y Morales, 2006; Pearsall y Loose, 1936; Velasco, Barros-Gómez, Ospina-Salazar y Trujillo, 2009), se establecieron las condiciones iniciales: agitación del cultivo por medio de flujo de aire continuo a 4 L/min; iluminación mediante luz natural; fotoperiodo de 12 horas de luz por 12 horas de oscuridad; pH entre 6 y 7 durante todo el cultivo; temperatura entre 17 y 25 °C; se emplearon cuatro recipientes de vidrio de 250 mL, a los que se adicionaron 200 mL de medio de cultivo, compuesto por agua y fertilizante agrícola de nombre comercial Foliagro, y 20 mL de microalga; tanto los materiales como el medio de cultivo Foliagro fueron previamente esterilizados mediante autoclave a 121 °C y 15 psi durante 30 minutos.

Escalamiento. A los 16 días, después de evaluar que el crecimiento de la microalga había alcanzado su fase estacionaria, se realizó un primer escalamiento a dos recipientes de 4 L, manteniendo la misma concentración de microalga. En cada recipiente se agregaron 1 L de medio de cultivo y 100 mL de microalga cultivada en los recipientes iniciales. A los 33 y a los 41 días se repitió el escalamiento, con las mismas cantidades de medio de cultivo y de microalga, hasta obtener 3,3 L de cultivo en cada recipiente.

Preexperimentación

Cabe aclarar que, en este estudio, se utilizó agua residual tratada (ART) sin esterilizar, que no fue objeto de ensayos microbiológicos debido a las limitaciones del estudio. Por lo tanto, fue necesario verificar la capacidad de adaptación de la microalga a este nuevo sustrato. Para esto, se prepararon cuatro muestras cuya composición se indica en la Tabla 2. El volumen de cultivo restante se empleó para evaluar la incidencia de la adaptación previa de la microalga en los resultados de la remoción de materia orgánica.

Tabla 2. Composiciones de los cultivos de microalga usados en la preexperimentación

Muestra	Volumen	Porcentaje de vol. de microalga
Muestra 1	150 mL microalga /150 mL ART	50%
Muestra 2	90 mL microalga / 210 mL ART	30%
Muestra 3	30 mL microalga / 270 mL ART	10%

Fuente: elaboración propia.

Desarrollo de la biorremediación en el laboratorio

Las condiciones empleadas en esta etapa del proceso fueron las mismas que se usaron en la

preexperimentación. En la Tabla 3 se indica la composición de las muestras preparadas. Las muestras preparadas con microalga adaptada (MA) son la 4, la 5 y la 6; mientras que las preparadas con microalga no adaptada (MNA) son la 7, la 8 y la 9.

Tabla 3. Composiciones de los cultivos de microalga usados en la experimentación

Muestra	Volumen	Porcentaje de vol. de microalga
Muestra 4	100 mL MA / 900 mL ART	10%
Muestra 5	200 mL MA / 800 mL ART	20%
Muestra 6	300 mL MA / 700 mL ART	30%
Muestra 7	100 mL MNA / 900 mL ART	10%
Muestra 8	200 mL MNA / 800 mL ART	20%
Muestra 9	300 mL MAN / 700 mL ART	30%
Blanco	1000 mL ART	0%

Fuente: elaboración propia.

Análisis

Crecimiento del cultivo. La concentración celular se midió por medio del conteo de células en la cámara de Neubauer (Arredondo y Voltolina, 2007; Bastidas, s.f.; Universidad del País Vasco, s.f.). La velocidad de crecimiento por día (μ) se calculó de la siguiente manera según Wang *et al.* (2010):

$$\mu = \frac{\ln \left(\frac{X_2}{X_1} \right)}{t_2 - t_1}$$

Donde X_1 y X_2 son la concentración celular inicial y final, respectivamente, y t es el tiempo en días.

Parámetros fisicoquímicos. Después de los 15 días del biotratamiento, en la etapa final, se separó la microalga de su medio de cultivo, empleando centrifugación (Muylaert, K., *et al.*, 2018). La biomasa residual fue dispuesta como abono orgánico. El líquido sobrenadante se empleó en los análisis fisicoquímicos realizados de acuerdo con los estándares internacionales (American Public Health Association [APHA], American Water Works Association [AWWA], Water Environment Federation [WEF], 2012): sólidos totales, sólidos volátiles, sólidos suspendidos volátiles, pH, turbiedad (Carpio, 2007),

alcalinidad y conductividad (Recinto Universitario de Mayagüez, s.f.). El porcentaje de remoción de materia orgánica se determinó con base en la variación de dos parámetros: sólidos suspendidos totales (SST) y demanda química de oxígeno (DQO), según los procedimientos sugeridos por APHA *et al.* (2012). La ecuación que se utilizó en ambos casos fue:

$$\%R = \frac{\text{Entrada (agua cruda)} - \text{Salida (agua tratada)}}{\text{Entrada (agua cruda)}} \times 100\%$$

Donde %R es el porcentaje de remoción; *Entrada* es el valor inicial del parámetro (SST o DQO) en el agua cruda que, en este caso, es el agua residual tratada por la PTAR; y *Salida* es el valor final después del tratamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento del cultivo

Preexperimentos. En la Tabla 4 se presentan los resultados promedio de los conteos realizados para las muestras con microalga no adaptada al ART en los diferentes porcentajes volumétricos empleados.

Tabla 4. Velocidad de crecimiento específico en los preexperimentos

Muestra	Porcentaje de vol. de microalga	Concentración celular inicial (cél/mL)	Concentración celular final (cél/mL)	Tiempo (días)	Tasa de crecimiento (cél mL ⁻¹ d ⁻¹)
1	50%	1E+07	1,2E+07	11	0,018
2	30%	2,9E+06	7,6E+06	15	0,069
3	10%	2,4E+06	4,7E+06	15	0,048

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la tabla anterior, la mayor velocidad específica de crecimiento se obtuvo con un 30% de volumen de microalga y la menor, con un 50%; esta última evidenció el inicio de la fase de muerte a los 11 días, por lo que se detuvo el cultivo en ese tiempo. Se podría decir que el crecimiento óptimo de la microalga para este nuevo sustrato (ART) se encontraría entre 10 y 30% de volumen. Otros autores han encontrado 0,109 cél mL⁻¹d⁻¹ para *Chlorella* sp. en cultivos *in vitro* con agua residual de la ciénaga Miramar (Barrancabermeja, Santander) (Tafur y Estrada, 2015), 0,42 cél mL⁻¹d⁻¹ para *Synechocystis*

minuscula en cultivos con agua residual urbana (Jonte, Rosales, Yépez, Beltrán y Morales, 2007) y una velocidad de crecimiento específica de 0,296 d⁻¹ para *Chlorella* sp. en cultivo a nivel de laboratorio con purines (Cervera, 2011). El menor crecimiento obtenido en este estudio se debe posiblemente a la no esterilización del ART.

Fase de biotratamiento. En la Tabla 5 se muestran los resultados de la evaluación del crecimiento celular en las muestras 4 a 9.

Tabla 5. Velocidad de crecimiento específico en los preexperimentos

Muestra	Porcentaje de vol. de microalga	Concentración celular inicial (cél/mL)	Concentración celular final (cél/mL)	Tasa de crecimiento (cél mL ⁻¹ d ⁻¹)
4	10%MA	1,4E+06	3E+06	0,054
5	20% MA	2,5E+06	3,7E+06	0,028
6	30% MA	2,3E+06	4,7E+06	0,051
7	10%MNA	1,1E+06	3,7E+06	0,087
8	20% MNA	2,4E+06	4,3E+06	0,042
9	10% MNA	2,4E+06	5,1E+06	0,054

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la tabla anterior, la muestra 7 obtuvo la mayor velocidad de crecimiento (10% MNA) con 0,087 cél mL⁻¹ d⁻¹. Las muestras 4 (10% MA) y 9 (30% MNA) también presentaron un alto valor. La muestra 2 obtuvo el menor crecimiento (20% MA) con 0,028 cél mL⁻¹ d⁻¹. Por tanto, a igual concentración volumétrica, las muestras no adaptadas al ART alcanzan la mayor velocidad de crecimiento específico. Finalmente, es claro que, en promedio, las mayores

tasas de crecimiento celular se alcanzan con 10% de microalga, adaptada o no.

Remoción de materia orgánica

En la PTAR. Aunque la PTAR Salitre no realiza un tratamiento biológico secundario, los resultados de remoción de materia orgánica se toman como línea base para futuras implementaciones de nuevas

tecnologías. Para tal efecto, el día 5 de septiembre de 2016 se obtuvieron los siguientes resultados de remoción de materia orgánica según registros de la PTAR Salitre:

Porcentaje de remoción por sólidos suspendidos totales (SST):

$$\% R_{SST} = \frac{273 \text{ mg/L} - 116 \text{ mg/L}}{273 \text{ mg/L}} \times 100\% = 57,51\%$$

Porcentaje de remoción por demanda química de oxígeno (DQO):

$$\% R_{DQO} = \frac{558 \frac{\text{mg}}{\text{L}} O_2 - 361 \text{ mg/L } O_2}{558 \text{ mg/L } O_2} \times 100\% = 35,30\%$$

Con la microalga *Chlorella vulgaris*. Tras finalizar el biotratamiento y separar la biomasa de su medio de cultivo, se realizó el análisis de los parámetros fisicoquímicos del líquido sobrenadante y se obtuvieron los porcentajes que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Porcentaje de remoción de materia orgánica

Muestra	Porcentaje de remoción de SST	Porcentaje de remoción de DQO
4	89,91	81,80
5	79,31	73,19
6	72,84	73,43
7	68,19	71,83
8	55,17	64,99
9	57,76	64,99
Blanco	82,76	62,55

Fuente: elaboración propia.

Como se indica en la tabla anterior, la muestra 4, correspondiente al 10% de volumen de microalga previamente adaptada al agua residual, fue la que presentó mejores porcentajes de remoción. El blanco presentó resultados similares a los alcanzados por dicha muestra.

En la Tabla 7 se resumen los valores de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en la muestra que reportó mejores resultados (muestra 4), el blanco analítico y la caracterización del agua residual tratada por la PTAR Salitre (ART) con la que se inició el estudio.

Tabla 7. Resultados de los parámetros fisicoquímicos

Parámetro	Resultados		
	ART	Blanco	Muestra 4
Sólidos totales (mg/L)	704	367	364
Sólidos volátiles (mg/L)	410	119	99
Sólidos suspendidos volátiles (mg/L)	92	18	13
pH	7,63	8,08	6,3
Turbiedad (NTU)	89	11	7
Alcalinidad (mg-CaCO ₃ /L)	225	134	19
Conductividad (µs/cm)	833	985	609
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	116	20	13
Demanda química de oxígeno (mg/L-O ₂)	361	78	73

Fuente: elaboración propia.

Aunque los valores que se obtuvieron en el blanco son similares a los de la mejor muestra de microalga (10% de volumen), la remoción que alcanzó esta última es mayor, particularmente en cuanto a DQO. Finalmente, en la Tabla 8 se comparan los resultados obtenidos en

el presente estudio con aquellos obtenidos por otros autores; se encontró que solamente un estudio (Zhou *et al.*, 2012) reportó un porcentaje mayor de remoción de DQO pero con una especie de microalga diferente.

Tabla 8. Comparación con resultados de otros estudios

!	%R _{DQO}	Especie	Referencia
0,412 d-1	50,9	<i>Chlorella sp.</i>	Wang <i>et al.</i> (2010)
1,510 gL-1d-1	89,0	<i>Auxenochlorella protothecoides</i>	Zhou <i>et al.</i> (2012)
0,200 gL-1d-1	77,0	<i>Chlorella kessleri</i>	Li <i>et al.</i> (2012)
0,125 gL-1d-1	70,0	<i>Chlorella protothecoides</i>	Li <i>et al.</i> (2012)
0,284 cél mL-1d-1	76,0	<i>Chlorella vulgaris</i>	Herrera (2010)
No disponible	54,8	<i>Chlorella sp.</i>	Chacón <i>et al.</i> (2004)
0,176 cél mL-1d-1	35,6	<i>Scenedesmus sp.</i>	Andrade, Vera, Cárdenas y Morales (2009)
0,086 gL-1d-1	30,9	<i>Chlorella vulgaris</i>	Olarte y Valencia (2016)
0,054 cél mL-1d-1	81,8	<i>Chlorella vulgaris</i>	Este estudio

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Se logró adecuar el cultivo de la microalga *Chlorella vulgaris* empleando agua residual como parte de su medio de cultivo. Las muestras cultivadas con microalga adaptada presentaron mejores resultados en cuanto a remoción de materia orgánica que las no adaptadas. Los crecimientos alcanzados son bajos en comparación con lo que se reporta en la literatura, con diferentes tipos de aguas residuales industriales y domésticas; sin embargo, los porcentajes de remoción de materia orgánica por DQO obtenidos en este estudio son mayores, excepto en un caso reportado (ver Tabla 8). La muestra 4 (MA con 10% de volumen de microalga) alcanzó porcentajes de remoción de materia orgánica por DQO de 81,80% y por SST de 89,91%, los cuales son mayores que aquellos registrados en la PTAR Salitre con tratamiento primario, donde los valores fueron de 35,30% por DQO y 57,51% por SST.

Se encontró que no existe una relación directa entre la velocidad de crecimiento del cultivo y la remoción de materia orgánica: la muestra 1 obtuvo mejores resultados en los análisis fisicoquímicos realizados después del biotratamiento aun teniendo una de las menores velocidades de crecimiento

(0,028 cél mL⁻¹ d⁻¹), lo cual confirma las observaciones realizadas por Wang *et al.* (2010). El blanco analítico reportó resultados muy similares a los de la muestra 1 posiblemente debido a que, al utilizar inyección de aire como fuente de agitación en el laboratorio, el oxígeno realiza un tratamiento biológico sobre el agua residual, lo cual no justificaría el uso de la microalga para la remoción de materia orgánica a escala de laboratorio; aunque a escala industrial la inyección de oxígeno no es rentable económicamente, la agitación se lograría por medio del flujo continuo del agua residual. Para futuras investigaciones, se sugiere tener en cuenta la concentración de oxígeno disuelto a fin de entender el mecanismo de reducción de materia orgánica desarrollado por la microalga, así como esterilizar el agua residual para eliminar cualquier microorganismo competidor.

REFERENCIAS

- Abalde, J., Cid, A., Fidalgo, P., Torres, E. y Herrero, C. (1995). *Microalgas: cultivos y aplicaciones. Monografía N.º 26*. La Coruña, España: Universidade da Coruña.
- Acosta, E. (2004). *Evaluación de la remoción de nutrientes de aguas de porqueriza mediante el uso de microalgas*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. (2012). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*.
- Andrade, C., Vera, A., Cárdenas, C. y Morales, E. (2009). Biomass production of microalga *Scenedesmus* sp. with wastewater from fishery. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*, 32(2), 126-134.
- Ángel, C. y Pimenta, W. (2012). *Evaluación de la incidencia del nitrógeno en el medio de cultivo bold basal para la producción de biomasa de la microalga Chlorella vulgaris en un fotobiorreactor, para la obtención de ácidos grasos*. Colombia: Fundación Universidad de América.
- Arredondo, B. y Voltolina, D. (2007). *Métodos y herramientas analíticas en la evaluación de la biomasa microalgal*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.
- Bastidas, O. (s.f.). *Conteo celular con hematocitómetro. Uso elemental del hematocitómetro*. Recuperado de <http://www.celeromics.com/es/resources/docs/Articles/Conteo-Camara-Neubauer.pdf>
- Carpio, T. (2007). *Turbiedad por nefelometría (método B)*. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Cervera del Castillo, O. (2011). *Tratamiento de purines para la producción de biomasa microalgal. (Tesis de maestría)*. Universidad de Almería, España.
- Chacón, C., Andrade, C., Cárdenas, C., Araujo, I. y Morales, E. (2004). Uso de *Chlorella* sp. y *Scenedesmus* sp. en la remoción de nitrógeno, fósforo y DQO de aguas residuales urbanas de Maracaibo, Venezuela. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 38(2).
- Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá. (s.f.). *Planta de tratamiento de aguas residuales PTAR Salitre*. Recuperado de http://www.acueducto.com.co/guatoc/contingencia/contenidos/ambiental/ptar_salitre.html
- Garbisu, C., Amézaga, I. y Alkorta, I. (2002). Biorremediación y ecología. *Ecosistemas*, 11(3).
- Guerrero, J. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. Colombia: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Herrera, N. (2010). *Utilización de la microalga Chlorella vulgaris en la remoción de contaminantes orgánicos provenientes de las aguas residuales de la empresa Conalsebos a escala laboratorio (tesis de pregrado)*. Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia.
- Jonte, L., Rosales, N., Yépez, M., Beltrán, B. y Morales, E. (2007). Respuesta de la cianobacteria *Synechocystis minuscula* a sustratos orgánicos en condiciones mixotróficas. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 41(1), 1-136.
- Lenntech. (s.f.). *Centrifugación y centrifugadores*. Recuperado de <http://www.lenntech.es/centrifugacion.htm>
- Li, Y., Zhou, W., Hu, B., Min, M., Chen, P. y Ruan, R. R. (2012). Effect of light intensity on algal biomass accumulation and biodiesel production for mixotrophic strains *Chlorella kessleri* and *Chlorella protothecoide* cultivated in highly concentrated municipal wastewater. *Biotechnology and Bioengineering*, 109(9), 2222-2229.
- Metcalf & Eddy Inc. (1981). *Ingeniería de aguas residuales*. Barcelona, España: Editorial Labor, S. A.
- Monroy, C. (2014). *Cultivo de Chlorella vulgaris en medio bold basal modificado en condiciones de luminosidad baja y caracterización de extracto líquido de lombricomposta como sustituto de medio de cultivo*. Xalapa, México: Universidad Veracruzana.

- Moronta, R., Mora, R. y Morales, E. (2006). Respuesta de la microalga *Chlorella sorokiniana* al pH, salinidad y temperatura en condiciones axénicas y no axénicas. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 23(1).
- Muylaert, K., Bastiaens, L., Vandamme, D., & Gouveia, L. (2018). *Harvesting of microalgae: Overview of process options and their strengths and drawbacks*. In *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts* (pp. 113-132).
- Olarte, E. y Valencia, M. (2016). *Evaluación del uso de la microalga Chlorella vulgaris en el tratamiento de aguas industriales (Vinazas)*. Colombia: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Recinto Universitario de Mayagüez. (s.f.). *Parámetros físicoquímicos: alcalinidad*. Recuperado de <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-alcalinidad.pdf>
- Pearsall, W. y Loose, L. (1936). The growth of *Chlorella vulgaris* in pure culture. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 121 (824), 451-501.
- Ramalho, R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona, España: Editorial Reverté.
- Romero, J. A. (2004). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Tafur, J. E. y Estrada, L. (2015). Tratamiento de aguas residuales *in vitro* por medio de la microalga *Chlorella* sp en el municipio de Barrancabermeja, Colombia. *Revista CITECSA*, 6(10), 5-19.
- Universidad del País Vasco. (s.f.). *Cámara de contaje Neubauer improved*. Recuperado de http://insilico.ehu.es/camara_contaje/neubauer_improved.php
- Velasco, L. A., Barros-Gómez, J., Ospina-Salazar, G. H. y Trujillo, C. A. (2009). Efecto de la intensidad lumínica, temperatura y salinidad sobre el crecimiento de la microalga *Isochrysis galbana* (Clon T-ISO). *Intropica*, 4, 93-99.
- Wang, L., Min, M., Li, Y., Chen, P., Chen, Y., Liu, Y., ... Ruan, R. (2010). Cultivation of green algae *Chlorella* sp. in different wastewaters from municipal wastewater treatment plant. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 162(4):1174-1186.
- Zhou, W., Li, Y., Min, M., Hu, B., Zhang, H., Ma, X., ... Ruan, R. (2012). Growing wastewater-born microalga *Auxenochlorella protothecoides* UMN280 on concentrated municipal wastewater for simultaneous nutrient removal and energy feedstock production. *Applied Energy*, 98, 433-440.

Effect of pH and Temperature on photocatalytic oxidation of methyl orange using black sand as photocatalyst

Efecto del pH y la temperatura sobre la oxidación fotocatalítica de naranja de metilo usando arena negra como fotocatalizador

Alejandra Ibatá Soto

Engineering Faculty, Environmental Engineering,
Universidad Libre, Colombia
<https://orcid.org/0000-0001-6570-6547>
alejandra.ibatas@unilibrebog.edu.co

Rafael Nikolay Agudelo Valencia

Engineering Faculty, Environmental Engineering,
Universidad Libre, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-6646-7725>
rafaeln.agudelov@unilibre.edu.co

Andrés Felipe López Vásquez

Department of Chemical Engineering,
Universidad Nacional de Colombia – sede Manizales, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-6411-5494>
aflopezv@unal.edu.co

Fecha de recepción: 2 de agosto del 2017

Fecha de aceptación: 7 de diciembre de 2017

Sugerencia de citación: Ibatá Soto, A., Agudelo Valencia, R. N., y López Vásquez, A. F. (2018).

Effect of pH and Temperature on Photocatalytic Oxidation of Methyl Orange using Black Sand as Photocatalyst. *Mutis*, 8(1), 43-54, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1373>

Editor: Javier Hernández Fernández

ABSTRACT

Azo dyes are considered hazardous compounds for the environment and human health. Methyl orange is one type of azo dyes and it is widely used in textile, leather, and other chemical industries. The degradation of this compound is a challenge for traditional treatments. Advanced oxidation processes such as heterogeneous photocatalysis, sonolysis, radiolysis, etc., become an alternative for mineralizing organic compounds by producing a highly oxidant agent ($\text{OH}\cdot$). Nowadays, a great number of research studies have tried to modify TiO_2 with metals in order to improve the degradation of hazardous pollutants such as azo dyes. This study used black sand as an alternative photocatalyst, evaluating the influence of pH (2, 5, 3 and 8) and temperature (20, 25, 30 and



35°C) on the photocatalytic oxidation of methyl orange. Black sand was magnetically separated. The fraction that showed the best characteristics for dye degradation was used. Experimental results allowed establishing that methyl orange photocatalytic oxidation is best performed at pH 2 and 30°C, with a degradation percentage of 96.93%. The reaction follows a pseudo-first order kinetic. In addition, the kinetic coefficient found at different temperatures was correlated using Arrhenius equation in order to determinate changes in the kinetic coefficient depending on the temperature. The equation pre-exponential coefficient was 374782115.1 and energy activation was $-58,104.4 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Keywords: Azo dyes, kinetic evaluation, heterogeneous photocatalysis, pH and temperature influence.

RESUMEN

Los colorantes azo son considerados compuestos peligrosos para el medio ambiente y la salud humana. Uno de estos compuestos es el naranja de metilo el cual ha sido ampliamente utilizado en industrias textiles, de cuero y otras industrias químicas. La degradación de este compuesto se ha convertido en un reto mediante tratamientos convencionales. Algunos procesos de oxidación avanzada como la fotocatalisis heterogénea, la sonólisis, la radiólisis, etc., constituyen una alternativa para la mineralización de compuestos orgánicos gracias a la generación in-situ de un radical altamente oxidante ($\text{OH}\bullet$). En la actualidad, un gran número de investigaciones han tratado de modificar el TiO_2 con metales para mejorar la degradación de contaminantes peligrosos como los colorantes azo. En este estudio se utilizó arena negra como una alternativa de fotocatalizador para evaluar el efecto del pH (2,0, 5,8 y 8,0) y la temperatura (20, 25, 30 y 35 °C) en el proceso de oxidación fotocatalítica del naranja de metilo. Debido a las características del mineral, se aplicaron diferentes campos magnéticos para obtener fracciones que fueron utilizadas como semiconductor, de las cuales se utilizó la que exhibió mejores condiciones para la degradación del colorante. Los resultados experimentales permitieron determinar que la oxidación fotocatalítica de naranja de metilo presentó una mayor eficiencia con un pH 2.0 y a 30° C, con un porcentaje de degradación de 96.93 %. La reacción observada describió una cinética de pseudo primer orden y mediante la ecuación de Arrhenius se determinó el coeficiente cinético a diferentes temperaturas. El coeficiente pre exponencial de la ecuación fue de 374782115,1 y la energía de activación fue de $-58104,4 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Palabras clave: colorantes azo, evaluación cinética, fotocatalisis heterogénea, influencia del pH y la temperatura.

INTRODUCTION

Hazardous compounds such as azo dyes are known to be a major problem for the environment since their degradation process is not easily carried out by means of traditional treatments. Methyl orange (MO) is an azo dye considered as one of the main water pollutants (Figueroa, Vázquez & Alvarez-Gallegos, 2009; Hai, Yamamoto, Nakajima, & Fukushi, 2011; Martínez-Huitle & Brillas, 2009; Muda *et al.*, 2010). Produced for textile, leather and pharmaceutical industries, the degradation of this compound can be easily performed by reduction at cathode because of its positive high redox potential (Feng *et al.*, 2009).

Photocatalytic processes have emerged with several advantages for organic wastewater treatment due to the complete destruction or mineralization of

pollutants to carbon dioxide and inorganic constituents in water and gas phases (Chen, Tsai & Huang, 2005; Wang, Zheng, Xu & Li, 2011). The main photocatalyst used in these processes is TiO_2 due to its low price, availability, non-photo-corrosion, suitable band gap energy and chemical stability (Haarstrick, Kut & Elmar, 1996; Matos, Laine & Herrmann, 2001). Nevertheless, the use of this semiconductor has presented some limitations for these treatments, considering the amount of energy required when using uv lamps or having a doped semiconductor with metals, such as gold (Cheng *et al.*, 2016; Oros-Ruiz *et al.*, 2012).

Heterogeneous catalysis on mineral surfaces is part of advanced oxidation processes and constitutes an alternative to degrade polluting compounds of water sources (Schoonen, Xu & Strongin, 1998), considering that this process stimulates the mineral activation

inside the visible spectrum of electromagnetic radiation and improves stability against photo-corrosion. The use of minerals as photocatalyst materials has been applied to the degradation of aromatic and phenolic compounds (Sonawane & Dongare, 2006) and oxalic acid (Iliev *et al.*, 2006), among others, with relatively satisfactory results (Arshadi *et al.*, 2016).

The use of the mineral conglomerate known in this study as black sand (BS) has not been a common practice in this type of studies. In contrast, this material has been widely used in applications in the field of metallurgy. BS is composed by iron oxides, calcium, magnesium and silicon (Vargas & Forero, 2011), whose properties foster its use as a photocatalyst. A previous study showed that the magnetic separation of BS recovered from Colombian beaches (Santa Marta), named M1, M2, NM (Non-magnetic) and RM (raw material), was highly effective, showing higher discoloration percentages in MO compared to raw materials (Acosta, Ibatá & López, 2016). The most effective fraction was M2, which was exposed to a magnetic field of 0.1645 T. Therefore, pH influence in the solution is a variable to consider, since it affects dyes' absorption capacity, absorbent surface and solubility. It is important to emphasize that the discoloration process of MO works better at acid pH, and decreases its efficacy at alkaline pH. This because the absorbent surface increases its positive charge with acid pH and MO molecules reach its maximum positive charge, favoring electrostatic absorption (Subbaiah & Kim, 2016).

The effectiveness and speed of every chemical reaction is directly influenced by temperature (Lien & Zhang, 2007). As an example, high temperatures can accelerate the speed of MO molecules, possibly leading to an increase in absorption efficiency. However, when temperature exceeds 65°C efficiency decreases as a result of a weak intermolecular attraction of absorbent materials (Arshadi *et al.*, 2016). Previous studies about MO degradation have shown that kinetic degradation of MO is described by a pseudo-first model (Lee *et al.*, 2015; Li, Li, Li & Yin, 2006; Yan *et al.*, 2016). In that sense, this study is carried out in order to find optimum conditions for the photocatalytic oxidation process of MO using BS as semiconductor and pH and temperature as process variables. In addition, we study the kinetic tendency of MO degradation at different temperatures.

MATERIALS AND METHODS

Material Black Sand

The material was separated in four fractions by magnetic fields in order to make the best use of its high iron content, as suggested in a previous study (Acosta, Ibatá & López, 2016). The fraction that was used (M2) in the experimental phase was magnetically separated by a magnetic field of 0.164T; this fraction was used because of its composition. M2 fraction was evaluated to identify its chemical (XRF), morphological (SEM micrographs) and structural (XRD) characterization. Additionally, an EDX analysis was carried out with the purpose of determining its elemental composition.

Photocatalytic oxidation of methyl orange

M2 fraction was evaluated through the photocatalytic oxidation of 150 mL of MO to 20 mg L⁻¹ in aqueous suspension with a BS dosage of 1.0 g L⁻¹. This reaction was carried out in an immersed well quartz photoreactor (Ace Glass Inc.) equipped with a cooling tube. Besides, 10 mmol of H₂O₂ were added to improve the photocatalytic activity of the mineral (Gao, Yang, Hu & Zhang, 2004; He *et al.*, 2015; Sahel *et al.*, 2016). In order to study the effect of the initial pH solution, the value was adjusted by adding of HCl and/or NaOH solutions. For these case, were tested at pH 2.0, MO natural pH (5.8) and 8.0. The experiments were carried out at 20, 25, 30 and 35°C. Reactions were carried out during three hours under UV-Vis irradiation ($\lambda=310$ nm) in magnetic stirring with 30 minutes of non-illumination, in order to reach adsorption-desorption equilibrium. MO samples were withdrawn from the reactor with a semiconductor, which was in turn removed from the liquid phase by thermo scientific centrifuge. Kinetic degradation of MO samples was evaluated by measuring MO signal disappearance every 30 minutes with a UV-Vis Shimadzu 2600 spectrophotometer. An evaluation of kinetic degradation for each reaction was performed using the coefficient of degradation as a way to determine the treatment with the highest speed reaction. The concentration of the substrate was measured at the beginning (C₀) and end of the treatment (C_f).

Table 1. Description of treatment conditions under different pH levels for MO photocatalytic oxidation.

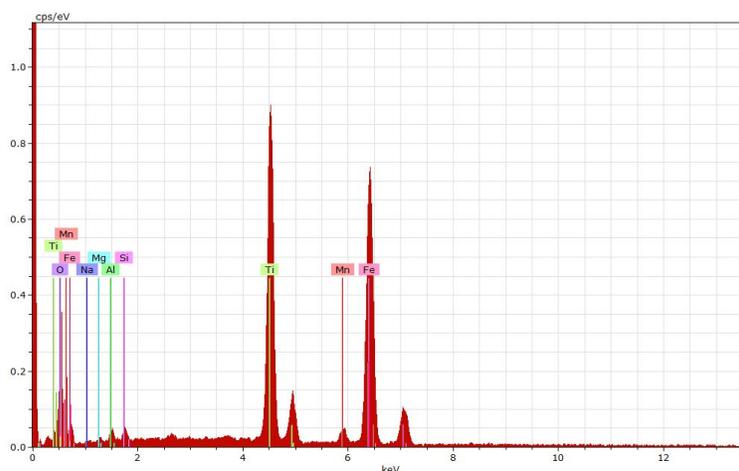
Fraction	pH	Wavelength (nm)
M2	2.0	506
M2	5.3 (MO pH)	464
M2	8.0	464

RESULTS AND DISCUSSION

Chemical characterization of M2 fraction

The results obtained through X-ray fluorescence analysis showed that the mineral presents a representative percentage of iron oxides such as Fe_2O_3 (50.313 %w/w), with a slight difference with the percentage of TiO_2 (37.027 %w/w) (G.A. Reyes Gomez, 2015). Figure 1 shows the results of X-ray

energy dispersive analysis (VEGA3 TESCAN) for the elemental composition by weight percent of M2 fraction (used as semiconductor for photocatalytic experiments), which it is mainly composed by iron (32.89%), titanium (26.74%), aluminium (1.18%) and oxygen (39.67%). The high amount of iron in the sample could be the main reason of the discoloration of MO, since iron could help doping TiO_2 naturally, improving its photocatalytic activity.

Figure 1. EDX analysis of black sand (M2 fraction) used as semiconductor during MO photocatalytic oxidation.

Source: Own elaboration.

Morphological and structural characterization of M2 fraction

In order to determinate the morphological structure of M2 fraction, we carried out an analysis with scanning electron microscopy (VEGA3 TESCAN), which showed that the mineral fraction is composed by irregular, rounded and semi-rounded grains (Figure 2).

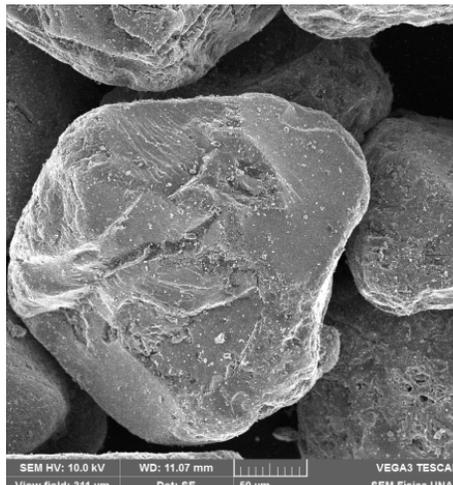
X-ray diffraction analysis (X-ray powder diffractometer PANalytical X'Pert Pro PW 3064/60) with $\text{Cu-K}\alpha$ radiation, was carried out to evaluate the crystalline phases of M2 fraction (Figure 3). This fraction was

characterised for its content of iron oxides in the form of magnetite Fe_3O_4 (~ 99.0 %), showing a few amount of zircon, pyroxenes, altered grains and silicates (such as quartz), that might help improve the photocatalytic mechanism for MO photocatalytic oxidation.

MO photocatalytic oxidation

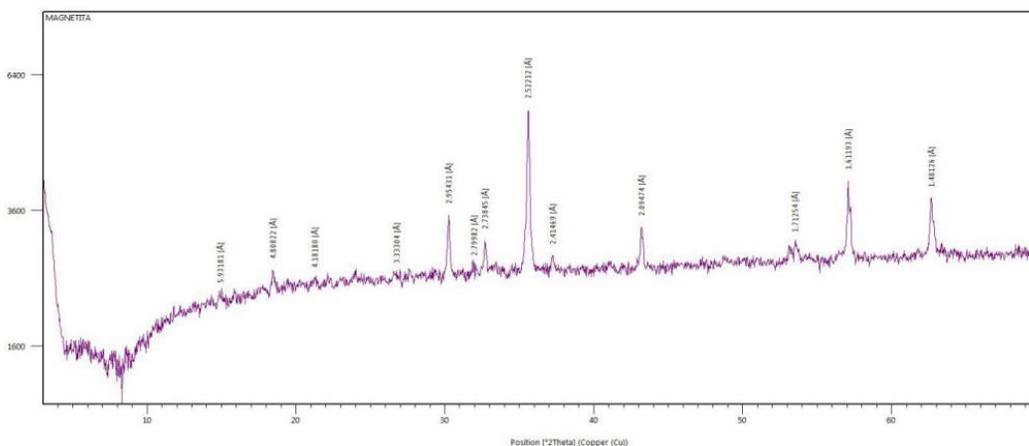
MO photocatalytic oxidation experiments were carried out with two process variables (pH and temperature), while the response variable was the removal percentage of MO.

Figure 2. Micrographs SEM of black sand (M2 fraction) used as semiconductor during MO photocatalytic oxidation.



Source: Reyes Gomez, G.A. (2015).

Figure 3. XRD analysis of black sand (M2 fraction) used as semiconductor during MO photocatalytic oxidation.



Source: Own elaboration.

Influence of pH

Table 2 shows the results of initial and final conditions of each experiment.

The absorption capacity of materials decreases when the pH of the solution increases, which means that the

absorption process is possibly carried out with high effectiveness to acid pH, thus increasing the efficiency of the material (Subbaiah & Kim, 2016). Figure 4 (a-b) shown the uv-Vis spectra for the photocatalytic oxidation of MO as a time function. At the beginning of the reaction, the degradation showed a higher

Table 2. Discoloration percentage according to the pH evaluated.

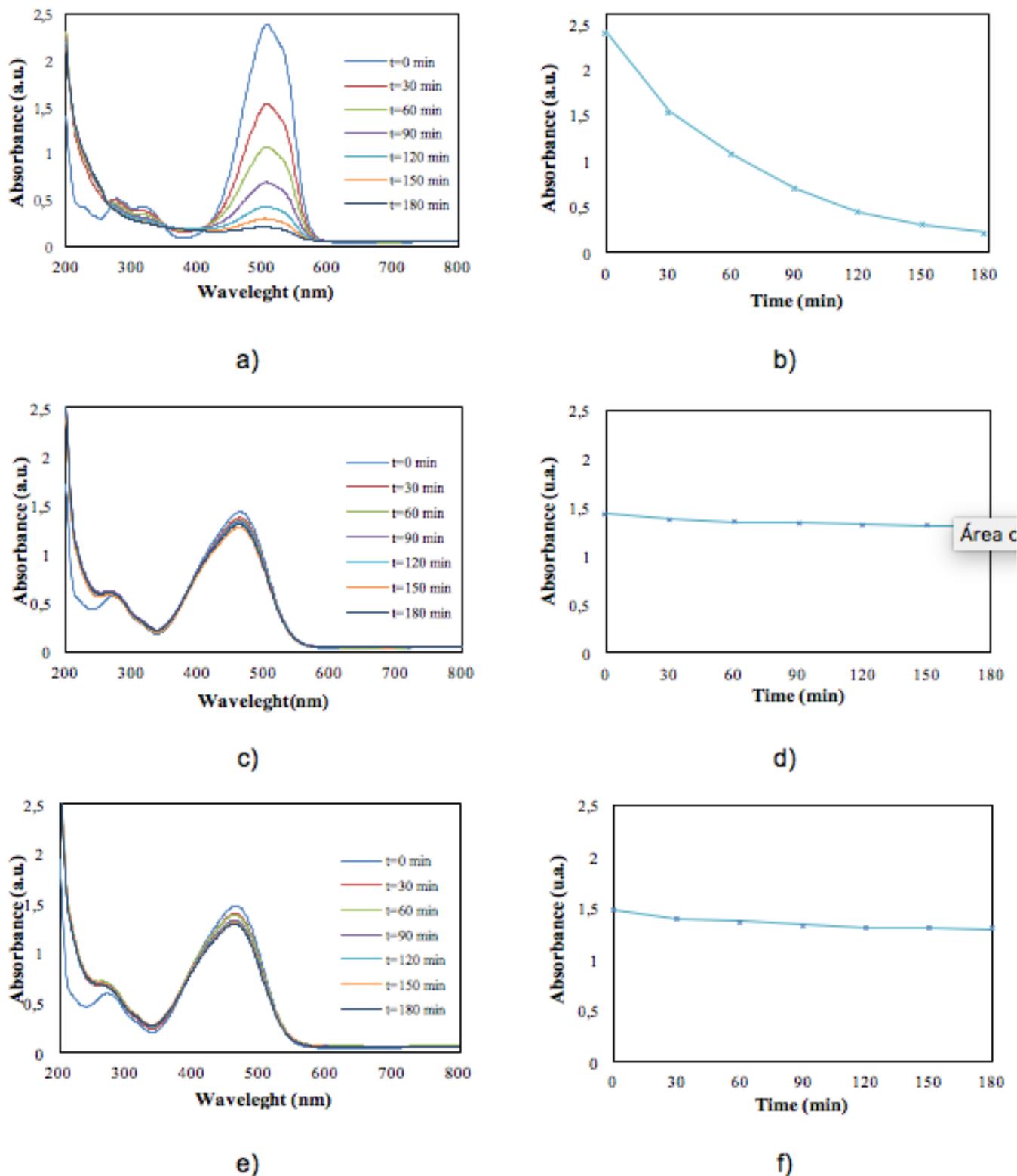
pH	Absorbance (u.a)		Discoloration percentage (%)	Wavelength (nm)
	Initial	Final		
2.0	2.392	0.208	91.22	506
5.3	1.431	1.303	8.94	464
8.0	1.476	1.292	11.47	464

Source: Own elaboration.

speed than at the end. Nonetheless, it is possible to state it is necessary to allow the reaction time up to 180 min (or even more) in order to obtain the highest possible discoloration of MO. On the contrary, when pH increases, the photocatalytic oxidation of

MO is less effective (Figure 4c-4f). This means that the MO photocatalytic oxidation was favored at acid conditions, while at alkaline conditions, the process is governed by hydrolysis (Arshadi *et al.*, 2016; Dagar & Narula, 2016).

Figure 4. UV-Vis spectra of MO as a function on time at pH 2.0 (a-b), pH 5.3 (c-d) and pH 8.0 (e-f).



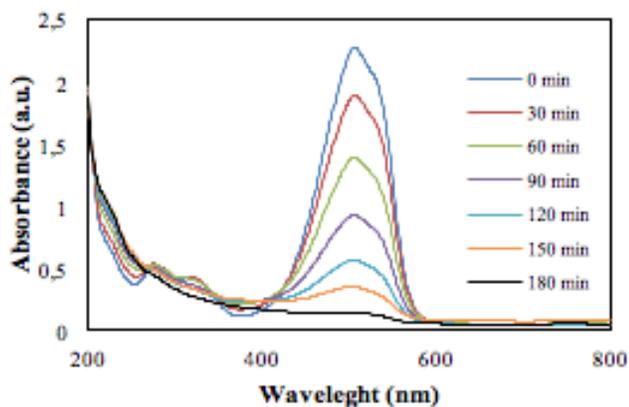
Influence of temperature

Once the optimal pH condition for MO photocatalytic oxidation was determined, the effect of temperature of solution was tested. According to literature, this process is more efficient when temperature does not exceed 65°C. On the other hand, H₂O₂ is thermally decomposed into oxygen and water at higher temperature, eventually scavenging the production of reactive radicals (Herney-Ramirez, Vicente & Madeira, 2010) however, the reaction is less efficient when temperature is below 25°C (Arshadi et al., 2016).

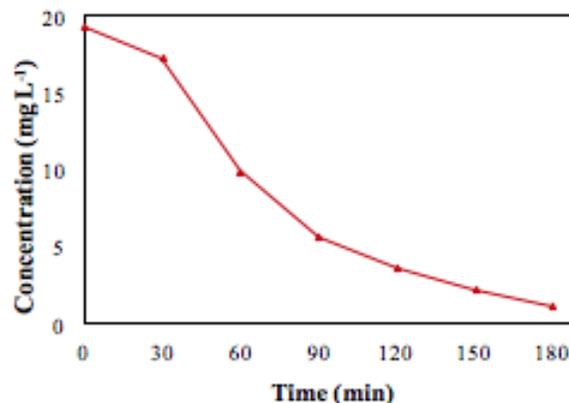
Figure 5 shows the MO photocatalytic degradation as a function of solution temperature. A slight discoloration percentage can be appreciate with the temperature increase however, this maximum can be obtained at less time reaction (Figure 5e-f)

About concentration, MO photocatalytic oxidation exhibits several profiles of discoloration, reaching maximum values at different temperatures promoting a reduction in the reaction time, decreasing the operational costs in the process, especially in energy consumption for irradiation.

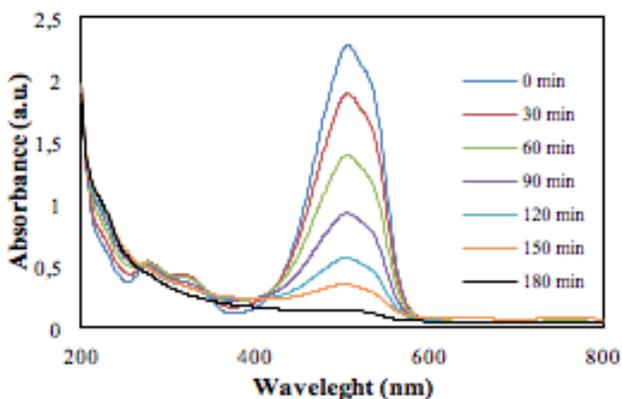
Figure 5. UV-Vis spectra and MO concentration during MO photocatalytic oxidation as a function on time at several temperatures. (a, b). 20°C (c, d) 25°C (e, f). 30°C (g, h) 35°C.



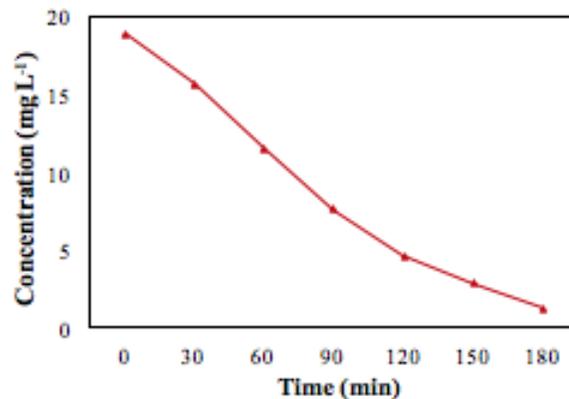
a)



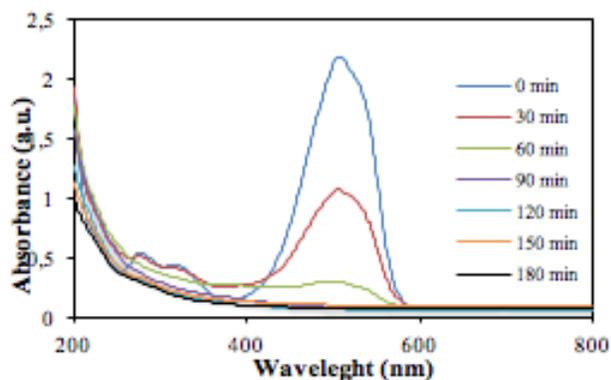
b)



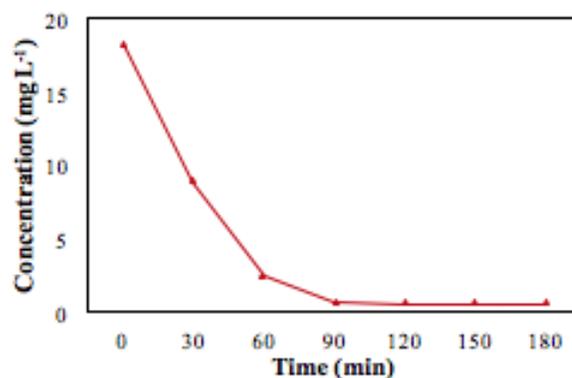
c)



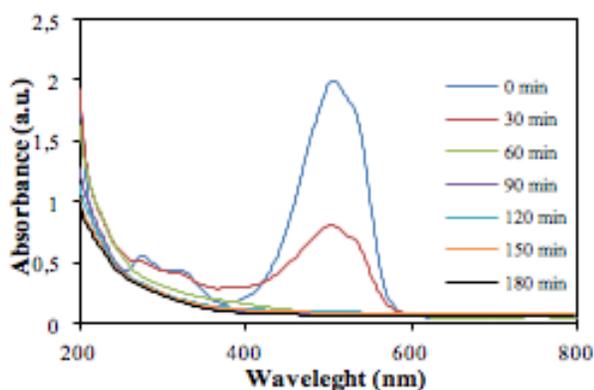
d)



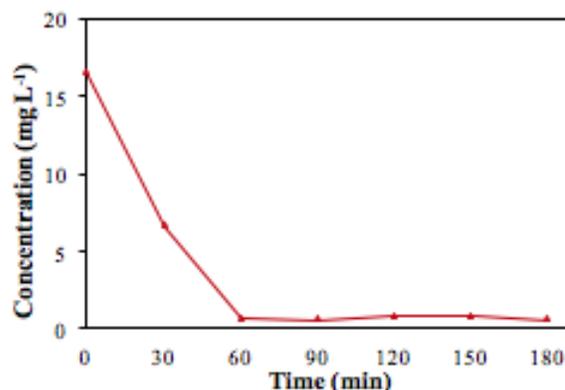
e)



f)



g)



h)

Source: Own elaboration.

Kinetic studies for MO photocatalytic oxidation at different temperatures

MO photocatalytic oxidation data were adjusted at pseudo-first order kinetic model. This goes in line with results of previous research studies on the subject (Lee *et al.*, 2015; Matouq *et al.*, 2014). The lineal correlation of the results was performed in order to calculate the kinetic coefficients K_{app} of the reactions at different temperatures, according to Eq. 1 (Dagar & Narula, 2016).

$$-\frac{dC}{dt} = K_{app} * C \quad (1)$$

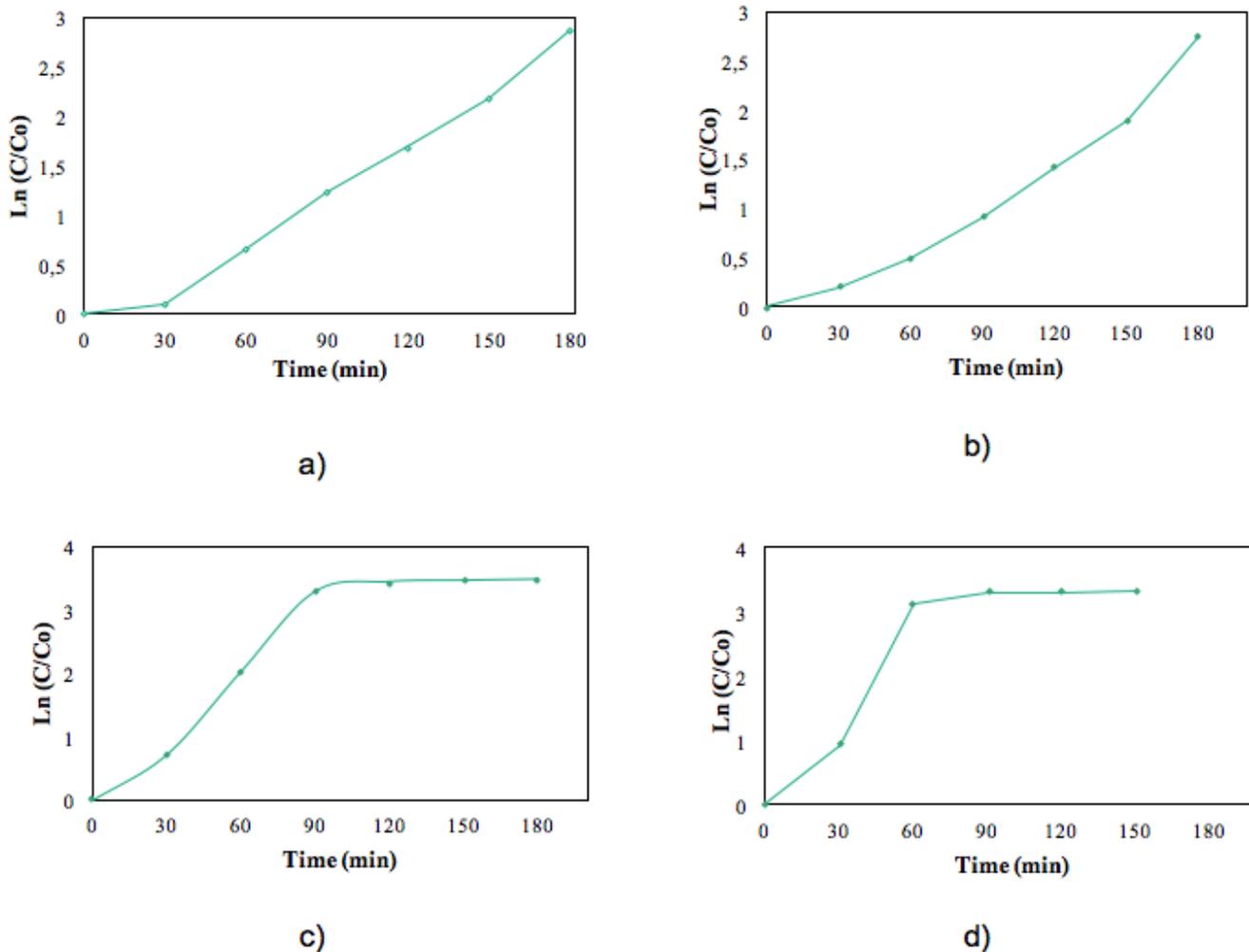
The linearized form (Eq. 2) produces

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -K_{app} * t \quad (2)$$

where K_{app} is the slope of the graph, y axis is the natural logarithm of the quotient between the final and initial concentration, and x axis is the reaction time.

Figure 6 shows the linearized form of the kinetic data analysed. When temperature increased, the stable condition was reached in less time. The highest removal percentage was reached at 30°C. A slight decrease in the effectiveness of the reaction for MO degradation was observed at 35°C. As mentioned, the values used to construct the graphs were correlated to establish the value of the kinetic coefficient.

Figure 6. Degradation kinetics of the reaction at 20°C (a), 25°C (b), 30°C (c) and 35°C (d).



Source: Own elaboration.

Table 3 presents the values of the coefficients calculated at different temperatures, which increases with temperature solution. Once kinetics coefficients and temperature were identified, we calculated the variation of the kinetic coefficient with the temperature using Svante Arrhenius equation (Dahm & L. Brezonik, 1995), whose linearized form is represented by Eq. 3.

$$\ln(K) = \ln A - \frac{E_a}{R * T} \tag{3}$$

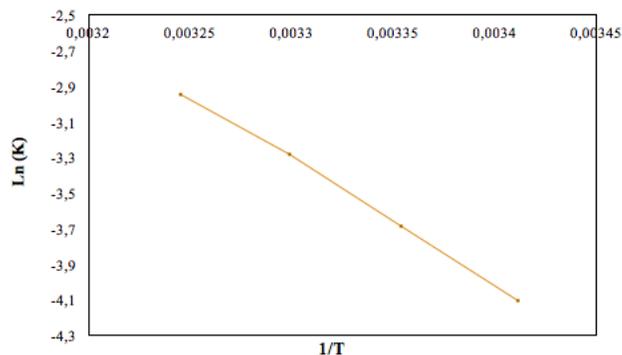
where E_a is the activation energy ($J \text{ mol}^{-1}$), A the pre-exponential factor of Arrhenius, R the gas constant ($8,314472 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), and T is temperature (K). Figure 7 shown the linearization of (3) for the determination of kinetic constants.

Table 3. Correlation of the values to determine kinetic coefficients of reactions.

Temperature (°C)	Kinetic coefficient (min ⁻¹)	Correlation
20	0.016	0.983
25	0.025	0.958
30	0.037	0.985
35	0.052	0.946

Source: Own elaboration.

Figure 7. Linearized form of the Arrhenius equation to determine the activation energy of the reaction.



Source: Own elaboration.

The value obtained for the activation energy of MO degradation was $-58104.41 \text{ J mol}^{-1}$. The pre exponential coefficient was $374782115.1 \text{ min}^{-1}$, with a statistical correlation coefficient of $R^2 0.998$. Finally, Eq. 4 allows calculating the kinetic coefficient as a function on temperature for MO photocatalytic oxidation

$$K_T = 374782115.1 \times e^{\frac{-58104.41 \text{ J mol}^{-1}}{8.314472 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \times T}} \quad (4)$$

CONCLUSIONS

Results of the activation energy determined MO photocatalytic oxidation. It is concluded that BS could be used as an alternative semiconductor with better economic benefits for the degradation process of organic compounds, compared with the activation energy using TiO_2 as semiconductor (44.1 kJ mol^{-1}) (Arshadi *et al.*, 2016). These results allow concluding that optimal conditions for higher removal efficiency of MO (96.93%) under UV irradiation are: 1.0 g L^{-1} dosage of BS, pH 2 and 30°C , with a reaction time of 90 min. It is important to mention that at 35°C the reaction time was 60 min, with a slightly higher removal percentage (96.339%).

REFERENCES

- Acosta, P., Ibatá, A., & López, A. (2016). Evaluation of the Discoloration of Methyl Orange Using Black Sand as Semiconductor through Photocatalytic Oxidation and Reduction. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 10(10), 1349-1353.
- Arshadi, M., Abdolmaleki, M. K., Mousavinia, F., Khalafi-Nezhad, A., Firouzabadi, H., & Gil, A. (2016). Degradation of methyl orange by heterogeneous Fenton-like oxidation on a nano-organometallic compound in the presence of multi-walled carbon nanotubes. *Chemical Engineering Research and Design*, 112(Supplement C), 113-121. doi:10.1016/j.cherd.2016.05.028.
- Chen, L. C., Tsai, F. R., & Huang, C. M. (2005). Photocatalytic decolorization of methyl orange in aqueous medium of TiO_2 and Ag- TiO_2 immobilized on $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 170(1), 7-14. doi:10.1016/j.jphotochem.2004.07.012.
- Cheng, X. Q., Ma, C. Y., Yi, X. Y., Yuan, F., Xie, Y., Hu, J. M., ... & Zhang, Q. Y. (2016). Structural, morphological, optical and photocatalytic properties of Gd-doped TiO_2 films. *Thin Solid Films*, 615(Supplement C), 13-18. doi:10.1016/j.tsf.2016.06.049.
- Dagar, A., & Narula, A. K. (2016). Photo-degradation of methyl orange under visible light by PEDOT/ NiO /Fly ash cenosphere. *Materials Chemistry and Physics*, 183(Supplement C), 561-570. doi:10.1016/j.matchemphys.2016.09.015.
- Dahm, C., & L. Brezonik, P. (1995). Chemical Kinetics and Process Dynamics in Aquatic Systems. *Journal of the North American Benthological Society*, 14, 354.
- Feng, C., Liu, L., Li, F., & Li, X. (2009). Microbial fuel cell with an azo-dye-feeding cathode. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85, 175-183.

- Figueroa, S., Vázquez, L., & Alvarez-Gallegos, A. (2009). Decolorizing textile wastewater with Fenton's reagent electrogenerated with a solar photovoltaic cell. *Water Research*, *43*(2), 283-294. doi:10.1016/j.watres.2008.10.014.
- Gao, Y., Yang, M., Hu, J., & Zhang, Y. (2004). Fenton's process for simultaneous removal of TOC and Fe²⁺ from acidic waste liquor. *Desalination*, *160*, 123-130.
- Hai, F. I., Yamamoto, K., Nakajima, F., & Fukushi, K. (2011). Bioaugmented membrane bioreactor (MBR) with a GAC-packed zone for high rate textile wastewater treatment. *Water Research*, *45*(6), 2199-2206. doi:10.1016/j.watres.2011.01.013.
- He, H., Zhong, Y., Liang, X., Tan, W., Zhu, J., & Wang, C. Y. (n.d.). Natural Magnetite : an efficient catalyst for the degradation of organic contaminant. *Nature Publishing Group*, 1-10.
- Herney-Ramirez, J., Vicente, M. A., & Madeira, L. M. (2010). Heterogeneous photo-Fenton oxidation with pillared clay-based catalysts for wastewater treatment: A review. *Applied Catalysis B: Environmental*, *98*(1), 10-26. doi:10.1016/j.apcatb.2010.05.004.
- Iliev, V., Tomova, D., Todorovska, R., Oliver, D., Petrov, L., Todorovsky, D., & Uzunova-Bujnova, M. (2006). Photocatalytic properties of TiO₂ modified with gold nanoparticles in the degradation of oxalic acid in aqueous solution. *Applied Catalysis A: General*, *313*(2), 115-121. doi:10.1016/j.apcata.2006.06.039.
- Lee, H. J., Kim, J. H., Park, S. S., Hong, S. S., & Lee, G. D. (2015). Degradation kinetics for photocatalytic reaction of methyl orange over Al-doped ZnO nanoparticles. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *25*(Supplement C), 199-206. doi:10.1016/j.jiec.2014.10.035.
- Li, Y., Li, X., Li, J., & Yin, J. (2006). Photocatalytic degradation of methyl orange by TiO₂-coated activated carbon and kinetic study. *Water Research*, *40*(6), 1119-1126. doi:10.1016/j.watres.2005.12.042.
- Lien, H. L., & Zhang, W. X. (2007). Nanoscale Pd/Fe bimetallic particles: Catalytic effects of palladium on hydrodechlorination. *Applied Catalysis B: Environmental*, *77*(1), 110-116. doi:10.1016/j.apcatb.2007.07.014.
- Martínez-Huitle, C. A., & Brillas, E. (2009). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review. *Applied Catalysis B: Environmental*, *87*(3), 105-145. doi:10.1016/j.apcatb.2008.09.017.
- Matos, J., Laine, J., & Herrmann, J. M. (2001). Effect of the Type of Activated Carbons on the Photocatalytic Degradation of Aqueous Organic Pollutants by UV-Irradiated Titania. *Journal of Catalysis*, *200*(1), 10-20. doi:10.1006/jcat.2001.3191.
- Matouq, M., Al-Anber, Z., Susumu, N., Tagawa, T., & Karapanagioti, H. (2014). The kinetic of dyes degradation resulted from food industry in wastewater using high frequency of ultrasound. *Separation and Purification Technology*, *135*(Supplement C), 42-47. doi: 10.1016/j.seppur.2014.08.002
- Muda, K., Aris, A., Salim, M. R., Ibrahim, Z., Yahya, A., van-Loosdrecht, M. C. M., ... & Nawahwi, M. Z. (2010). Development of granular sludge for textile wastewater treatment. *Water Research*, *44*(15), 4341-4350. doi:10.1016/j.watres.2010.05.023.
- Oros-Ruiz, S., Gómez, R., López, R., Hernández-Gordillo, A., Pedraza-Avella, J. A., Moctezuma, E., & Pérez, E. (2012). Photocatalytic reduction of methyl orange on Au/TiO₂ semiconductors. *Catalysis Communications*, *21*(Supplement C), 72-76. doi:10.1016/j.catcom.2012.01.028.
- Reyes Gomez, G.A. (2015). Producción fotocatalítica de hidrógeno basada en el mineral arena negra, Universidad Libre sede Principal, <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/9974?show=full>.
- Sahel, K., Elsellami, L., Mirali, I., Dappozze, F., Bouhent, M., & Guillard, C. (2016). Hydrogen peroxide and photocatalysis. *Applied Catalysis B: Environmental*, *188*(Supplement C), 106-112. doi:10.1016/j.apcatb.2015.12.044.
- Schoonen, M. A. A., Xu, Y., & Strongin, D. R. (1998). An introduction to geocatalysis. *Journal of*

Geochemical Exploration, 62(1), 201-215.
doi:10.1016/S0375-6742(97)00069-1.

Sonawane, R. S., & Dongare, M. K. (2006). Sol-gel synthesis of Au/TiO₂ thin films for photocatalytic degradation of phenol in sunlight. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 243(1), 68-76. doi:10.1016/j.molcata.2005.07.043.

Subbaiah, M. V., & Kim, D. S. (2016). Adsorption of methyl orange from aqueous solution by aminated pumpkin seed powder: Kinetics, isotherms, and thermodynamic studies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 128(Supplement C), 109-117. doi:10.1016/j.ecoenv.2016.02.016.

Vargas, J. A., & Forero, A. H. (2011). Obtención de hierro a partir de arenas negras del Atlántico colombiano. Desembocadura río Magdalena. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 26, 19-26.

Wang, E., Zheng, Q., Xu, S., & Li, D. (2011). Treatment of Methyl Orange by Photocatalysis Floating Bed. *Procedia Environmental Sciences*, 10(Part B), 1136-1140. doi:10.1016/j.proenv.2011.09.181.

Yan, J., Zhu, Y., Qiu, F., Zhao, H., Yang, D., Wang, J., & Wen, W. (2016). Kinetic, isotherm and thermodynamic studies for removal of methyl orange using a novel β -cyclodextrin functionalized graphene oxide-isophorone diisocyanate composites. *Chemical Engineering Research and Design*, 106(Supplement C), 168-177. doi:10.1016/j.cherd.2015.12.023

Inclusión de la Responsabilidad Social Empresarial en los currículos de Ingeniería Industrial, Administración y Mercadeo en Colombia

Inclusion of Corporate Social Responsibility in the curricula of Industrial Engineering, Administration and Marketing in Colombia

Eliasib Naher Rivera Aya

Ingeniero Industrial de la Universidad Distrital y Magíster en Administración de la Universidad Nacional de Colombia.
Profesor del Departamento de Ingeniería de la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-5875-1080>
eliasib.rivera@utadeo.edu.co

Fecha de recepción: 16 de mayo del 2018
Fecha de aceptación: 16 de julio del 2018

Sugerencia de citación: Rivera Aya, E. N. (2018). Inclusión de la Responsabilidad Social Empresarial en los currículos de Ingeniería Industrial, Administración y Mercadeo en Colombia. *Mutis*, 8(1), 55-64, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1370>

Editor: Javier Hernández Fernández

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados de un estudio orientado a identificar el porcentaje en el que la formación en Responsabilidad Social Empresarial (RSE) se incluye en los planes de estudio de los programas de pregrado en Ingeniería Industrial, Administración y Mercadeo ofrecidos en Colombia al corte de febrero de 2016, y su evolución a partir de información disponible en diciembre de 2012. Al corte de febrero de 2016, se encontró que solamente el 10% de los planes de estudio de Ingeniería Industrial, el 33% de los planes de estudio de Administración y el 19% de los planes de estudio de Mercadeo incluían alguna asignatura obligatoria de Responsabilidad Social Empresarial. Al ampliar el rango e incluir asignaturas que tienen relación directa con la RSE, como Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible, el porcentaje se incrementó al 60% para Ingeniería Industrial, 55% para Administración y 32% para Mercadeo.

Palabras clave: Responsabilidad Social Empresarial (RSE), formación en RSE, inclusión de la RSE en planes de estudio.



ABSTRACT

This paper presents the results of a study aimed to identify the percentage in which training in Corporate Social Responsibility (CSR) is included in the curriculum of undergraduate programs in Industrial Engineering, Business Administration, and Marketing offered in Colombia, and its evolution to February 2016, compared to December 2012. Until February 2016, the cut-off date, it was found that only 10% of Industrial Engineering curriculum, 33% of Business Management curriculum, and 19% of Marketing curriculum included a compulsory subject in Corporate Social Responsibility. By extending the range and including subjects directly related to CSR, such as Environmental Management and Sustainable Development, the percentage increased to 60% for Industrial Engineering, 55% for Business Management, and 32% for Marketing.

Keywords: Corporate Social Responsibility (CSR), CSR training, inclusion of CSR in curriculum.

INTRODUCCIÓN

Los frecuentes escándalos corporativos difundidos por los medios de comunicación, protagonizados a menudo por personas que estudiaron en las facultades de Negocios, Economía, Ingeniería o Derecho, sugieren que algo está fallando en la formación de los gerentes y directivos. No se trata de asignar toda la responsabilidad a las universidades y a sus respectivas facultades, pero dichos escándalos permiten reflexionar sobre cómo inculcar comportamientos éticos y socialmente responsables en los líderes empresariales. Como afirma Kliksberg (2010), la crisis de 2008 surgió de la falta de liderazgo y responsabilidad corporativa. Quienes llevaron a Wall Street al abismo, por su irresponsabilidad, codicia, egoísmo y soberbia, nunca retrocedieron para disculparse por el desastre que causaron, llevando a la ciudadanía a cuestionar: ¿cómo se formaron esos ejecutivos? ¿por qué recibieron un bagaje ético tan precario?, a pesar de recibir una formación técnica de primera línea, ¿qué sucedió con su formación ética?

Persons (2012), Martínez y García (2012), así como Larrán y Andrades (2013), consideran que los escándalos corporativos han impulsado una mayor formación en ética y Responsabilidad Social Empresarial (RSE) en las facultades de Negocios. Esto coincide con la mayor formación en RSE y sostenibilidad que encontraron Moon y Orlitzky (2011) en las escuelas de negocios. No obstante, distintos autores plantean críticas acerca de la formación en RSE y su aplicación. Morgan (1998) considera que, aunque normalmente se piensa que las organizaciones son empresas racionales que persiguen unos objetivos para satisfacer unos intereses comunes, hay evidencias que sugieren que esta visión es más un ideal que una

realidad. Las organizaciones se utilizan a menudo como instrumentos de dominación de los intereses egoístas de las élites sobre los demás (p. 263).

Moon y Orlitzky (2011) creen que las facultades de Administración como instituciones no están fomentando la responsabilidad social en la educación de negocios, porque los supuestos de los que parten las teorías, doctrinas y conceptos dominantes del estilo angloamericano de administración orientada a los accionistas son socialmente irresponsables y éticamente dudosos con respecto a la RSE; además, consideran que muchas escuelas de administración se han dedicado a lavar el cerebro de sus estudiantes e infundir la estrecha ideología de los valores de los accionistas, en detrimento de los intereses del resto de la sociedad (p. 329). Por su parte, Laval (2004) afirma que los programas académicos de Administración y de Gestión se ven modificados para ajustarse a las nuevas leyes del mercado, con énfasis en la formación para el trabajo y no para la vida, porque se quiere convertir la escuela en una empresa. En ese mismo sentido, Aktouf (2004) y Chanlat (2002) advierten que el discurso hegemónico ha colocado al dinero y la rentabilidad como criterio principal de la toma de decisiones empresariales, y que las escuelas de gestión han legitimado el enriquecimiento ilimitado de los más ricos.

Debido a estas críticas, la formación en Responsabilidad Social Empresarial está tomando cada vez más fuerza y existe un interés creciente en implementarla en las facultades de Administración, Ingeniería y escuelas de negocios, puesto que:

(...) son precisamente las universidades, especialmente las facultades de Administración e Ingeniería, las que están en posición de proveer los gerentes e ingenieros de hoy y de mañana. Además de formar gerentes e ingenieros con conocimientos acerca del impacto positivo de una estrategia de RSE para el desempeño a largo plazo de la compañía, las universidades también influyen en la percepción que estudiantes y nuevos gerentes tienen de las compañías y sus responsabilidades hacia la sociedad (Sobczak, Debucquet y Havard, 2006, p. 464).

Teniendo en cuenta lo anterior, este estudio buscó identificar el porcentaje en el que la asignatura Responsabilidad Social Empresarial se incluye en los planes de estudio de programas profesionales de pregrado¹ en Administración, Mercadeo e Ingeniería Industrial en Colombia, al corte de febrero de 2016. Los resultados obtenidos son útiles como línea base para tener un panorama actual y como referente de una mayor inclusión a futuro de la formación en Responsabilidad Social Empresarial en los planes de estudio mencionados.

Al indagar en la literatura consultada sobre alguna clasificación para abordar el tema de la formación en Responsabilidad Social Empresarial, se encontró que Moon y Orlitzky (2011) reconocen tres posibilidades de investigación en la RSE y la sostenibilidad:

1. Estudios comparativos a partir de la inclusión de distintas orientaciones de la RSE, por ejemplo, las cuatro orientaciones propuestas por Garriga y Melé (2004): económica, política, integración social y ética.
2. Investigaciones que examinen los diferentes métodos para establecer la educación en RSE dentro de la corriente dominante, y la efectividad relativa de cada método.

¹ En Colombia, la educación primaria consta de cinco años y la educación secundaria, de seis años. Se entiende por pregrado la oferta educativa que ofrecen las instituciones de educación superior, como las universidades, que puede ser de dos años (formación técnica), tres años (formación tecnológica) o entre cuatro y cinco años (formación profesional). En este estudio se revisó la oferta correspondiente a la formación profesional.

3. Investigaciones para medir la efectividad de las diferentes técnicas de enseñanza de la RSE. Algunas preguntas que pueden orientar estas investigaciones son: ¿es el estudio de caso la técnica más efectiva para transmitir un sentido de responsabilidad gerencial a los grupos de interés? o ¿son efectivas actividades en clase como simulaciones de diálogos entre los grupos de interés o *stakeholders*?

De manera más específica, Setó-Pamies, Domingo-Vernis y Rabassa-Figueras (2011, p. 606) proponen una clasificación del tema de la formación en Responsabilidad Social Empresarial e indican que la enseñanza de la ética y la RSE se ha examinado desde diferentes perspectivas:

1. Revisión descriptiva de los cursos, su desarrollo histórico y su formato.
2. Recomendaciones pedagógicas para la enseñanza de la ética y la RSE.
3. Juicios analíticos acerca de la efectividad o no de los cursos de ética para modificar valores y actitudes de los estudiantes.

En este caso se contempló la primera perspectiva, dado que se trata de un estudio descriptivo.

METODOLOGÍA

Para identificar la inclusión de la asignatura Responsabilidad Social Empresarial, o Ética y Responsabilidad Social Empresarial, se realizó un análisis de contenido en internet de tipo exploratorio y descriptivo de la oferta de programas de pregrado en Administración, Mercadeo e Ingeniería Industrial en Colombia, al corte de febrero de 2016. A fin de identificar programas que tuvieran registro calificado vigente y que estuvieran activos, se utilizó la información disponible en el Sistema Nacional de Información de la Educación Superior (SNIES, 2015), el cual fue creado por el Ministerio de Educación para reunir la información relacionada con la educación superior en Colombia.

Para el caso de la oferta de programas de Mercadeo, se encontró un total de 34 programas activos, según el SNIES, los cuales se examinaron; estos incluyen programas de Mercadeo, Mercadología, Marketing y

Logística, Mercadeo y Publicidad, Administración de Mercadeo, Mercadeo Internacional y Publicidad, y Marketing y Negocios Internacionales. En el caso de los programas de Administración de Empresas ofrecidos, se encontró y se examinó un total de 234 programas activos; estos incluyen programas de Administración, Administración de Empresas y Administración de Negocios. En el caso de los programas de Ingeniería Industrial, se encontró y se examinó un total de 130 programas activos.

Al revisar los planes de estudio, estos se clasificaron en tres niveles. En el primer nivel se incluyeron los planes de estudio que tenían una asignatura obligatoria relacionada con RSE, así como aquellos con una asignatura de Ética, Gestión Ambiental o Desarrollo Sostenible; los planes de estudio clasificados en este nivel debían tener como mínimo una asignatura obligatoria de RSE (Responsabilidad Social Empresarial o Ética y Responsabilidad Social Empresarial). En el segundo nivel se incluyeron los planes de estudio que no tenían ninguna asignatura obligatoria de RSE, pero que tenían como mínimo una asignatura relacionada con Gestión Ambiental o Desarrollo Sostenible, así como algunos que, además de estas, incluían Ética o Ética Profesional. En el tercer nivel se incluyeron los planes de estudio que no tenían ninguna asignatura relacionada con RSE, Gestión Ambiental o Desarrollo Sostenible, pero que tenían como mínimo una asignatura de Ética o Ética Profesional.

En esta medida, los planes de estudio que no se clasificaron en ninguno de los tres niveles permitieron identificar qué porcentaje de los programas de pregrado en Administración, Mercadeo e Ingeniería Industrial no incluían ninguna asignatura obligatoria de RSE, Gestión Ambiental, Desarrollo Sostenible, Ética o Ética Profesional.

Aunque dos de las alternativas para identificar el grado de inclusión de la formación en RSE en los planes de estudio son las encuestas y el análisis de contenido, Rundle-Thiele y Wymer (2010, p. 12) dan una razón que justifica el uso del análisis de contenido en lugar de las encuestas al afirmar que, cuando se usan encuestas, los estudios tienden a arrojar como resultado una mayor inclusión de la asignatura RSE o afines que cuando se utiliza el análisis de contenido, porque los decanos o directivos encuestados pueden sobreestimar la inclusión de asignaturas de RSE en sus

facultades o centros. Por el contrario, Rundle-Thiele y Wymer consideran que los trabajos que utilizan el análisis de contenido de los planes de estudio como metodología de investigación pueden ofrecer una visión más aproximada y real de la inclusión de asignaturas relacionadas con la RSE, dado que este método se basa en la obtención de información objetiva y públicamente disponible.

Los resultados de este estudio se compararon con un trabajo previo de Rivera (2013), quien realizó una observación de la inclusión de la RSE en programas de Mercadeo, Administración e Ingeniería Industrial en Colombia al corte de diciembre de 2012, a partir de una muestra con nivel de confianza del 95% y margen de error del 5%. Dada la diferencia en la metodología (observación de una muestra versus observación del universo de programas activos), dicha comparación puede tener limitaciones en su precisión debido al 5% de margen de error de uno de los estudios comparados; sin embargo, permite identificar algunas tendencias de comportamiento relacionado con la inclusión de la formación en Responsabilidad Social Empresarial en los planes de estudio de los programas revisados.

ESTUDIOS PREVIOS

Con respecto a la aplicación de prácticas de RSE, Lindgreen, Córdoba, Maon y Mendoza (2010, p. 237) encontraron diferencias entre Europa, Estados Unidos y Colombia. En Colombia, las prácticas se basan en mitigar problemas locales a través de estrategias sociales como ofrecer a la población de comunidades muy pobres productos a bajo precio y hacer alianzas con organizaciones para suplir necesidades relacionadas con educación, salud y acceso a microcréditos. También encontraron que una estrategia común para atender las necesidades de los empleados se enfocaba en dos áreas: educación básica para sus familiares y apoyo para la creación de microempresas. Este tipo de prácticas surgen debido a problemas como inequidad, exclusión, paternalismo, corrupción y pobreza, por lo que se proponen acciones de RSE orientadas a mitigar problemas locales a través de estrategias sociales.

En cuanto a la inclusión de la RSE en los planes de estudio, Rivera (2013) presenta algunas cifras. Primero, calculó el tamaño de la muestra utilizando la

fórmula de la muestra de población finita y, así, estimó el número de planes de estudio a revisar a partir de la población total de tres programas de pregrado: Administración, Mercadeo e Ingeniería Industrial. Entonces, encontró que el 19% de los planes de estudio de Administración, el 13% de los planes de estudio de Mercadeo y el 9% de los planes de estudio de Ingeniería Industrial incluían, al corte de diciembre de 2012, al menos una asignatura de RSE. Al ampliar el rango e incluir el porcentaje de asignaturas que tienen relación directa con la RSE, como Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible, el porcentaje acumulado se incrementó al 45% para Administración, 26% para Mercadeo y 60% para Ingeniería Industrial. Luego, incluyó aquellos planes de estudio que, si bien no tenían una asignatura obligatoria de RSE, Gestión Ambiental o Desarrollo Sostenible, tenían Ética o Ética Profesional, y obtuvo el 33% de los planes de estudio de Administración, el 32% de los planes de estudio de Mercadeo y el 24% de los planes de estudio de Ingeniería Industrial.

De igual manera, existen estudios orientados a identificar la inclusión de la RSE en los planes de estudio de Administración en otros países. En Europa, Matten y Moon (2004) aplicaron una encuesta para analizar la inclusión de la educación en RSE y los niveles en los que se enseña. Con relación a la inclusión de la RSE en los planes de estudio de los programas de pregrado de las escuelas de negocios, encontraron que el 9% de estas incluía algún curso completo de RSE, el 27% módulos obligatorios y el 47% módulos opcionales; el 38% consideró que incluía el tema de la RSE en otros módulos y cursos. También encontraron que hay una gran diversidad en la comprensión, contextualización y presentación de la enseñanza en RSE, y que solo algunas de las escuelas de negocios toman la iniciativa en esta área, a pesar de que consideran que parte de su función es formar con ética a los futuros gerentes de empresas y líderes. Asimismo, la mayoría de los encuestados reconocieron la necesidad de un mayor compromiso institucional para incluir la enseñanza de la RSE, especialmente mediante la inclusión de este tema en la acreditación de programas y en los sistemas de *ranking*.

Por su parte, Fernández y Bajo (2010) realizaron un análisis descriptivo de la situación general de la enseñanza de la Responsabilidad Social y Ética Empresarial en las licenciaturas en Administración

y Dirección de Empresas ofertadas en 2008/2009, y encontraron que el 27% ofrecían asignaturas de RSE, siendo el 64% de estas obligatorias. En un estudio anterior, encontraron que en 2006/2007 el porcentaje era del 21%, lo cual evidencia un ligero incremento en la inclusión de la RSE, que se ha presentado por la necesidad de adaptarse a las exigencias del proceso de Bolonia.

Por otro lado, Setó-Pamies *et al.* (2011) realizaron un estudio con el propósito de identificar la medida en que se enseñaba RSE en las escuelas de negocios de las universidades españolas. Para ello, utilizaron un análisis de contenido basado en internet de tipo exploratorio y descriptivo. Encontraron que solo el 18% de las universidades incluían una asignatura específica de RSE en sus currículos.

Asimismo, Moon y Orlitzky (2011) compararon el grado en el que las escuelas de negocios en Norteamérica y en Europa manejan los programas de educación en RSE. A partir de una encuesta realizada en 72 universidades europeas y en 22 universidades norteamericanas, observaron un incremento en la formación en RSE en las escuelas de negocios. Encontraron que la proporción de escuelas de negocios con cursos o módulos obligatorios en el tema de RSE era del 68.3% para Europa y del 66.7% para Estados Unidos y Canadá, y que la proporción de escuelas de negocios con módulos opcionales en RSE era del 73.2% para Europa y del 83.3% para Estados Unidos y Canadá. Además, encontraron una relación directa entre el prestigio de las escuelas de negocios y su compromiso con la formación en RSE.

Del mismo modo, Larrán y Andrades (2013) encontraron que el 24% de los programas de pregrado ofrecidos por las universidades españolas en el ámbito de la gestión de organizaciones incorporan en sus planes de estudio asignaturas específicas relacionadas con la RSE, el 32% incorporan asignaturas específicas relacionadas con la ética y el 23% incorporan en su itinerario curricular asignaturas relacionadas con la sostenibilidad medioambiental.

Por otra parte, Persons (2012, p. 66) sistematizó su experiencia de incluir los temas de Responsabilidad Social Empresarial y sostenibilidad en un curso de negocios a nivel de pregrado, y recomienda cuatro actividades: revisión y cuestionario sobre el documental *The Corporation*, y discusión en clase;

lectura y cuestionario sobre el documento *The Evolution of Accountability – Sustainability Reporting for Accountants*, y discusión en clase; lectura y cuestionario sobre dos artículos de la revista *Fortune* (que muestra las compañías más prestigiosas del mundo) y a partir de estos discutir en clase la relación entre la integridad de las compañías, el buen trato a sus empleados y los resultados financieros; y análisis por parte de los estudiantes sobre oportunidades para fomentar la sostenibilidad en su institución universitaria. Adicionalmente, recomienda trabajar en un proyecto para estudiar una empresa y sugerir acciones para aplicar la Responsabilidad Social Empresarial, así como revisar siete casos de estudio donde se analice la ética.

Por último, Nicholls, Hair, Ragland y Schimmel (2013, p. 137) realizaron un estudio orientado a recopilar recomendaciones de cuatro decanos y cuatro jefes de mercadeo sobre cómo incorporar los temas de ética, Responsabilidad Social Empresarial y sostenibilidad en los planes de estudio de los programas de Mercadeo, a nivel de pregrado y posgrado, y la inclusión de estos temas en sus currículos. Encontraron que el tema de ética se incluía en un 51% de los cursos de Marketing, tanto a nivel de pregrado como de posgrado, el tema de RSE en un 33% en los cursos de pregrado y en un 50% en los cursos de posgrado, y el tema de sostenibilidad en un 41%, tanto en los cursos de pregrado como de posgrado.

RESULTADOS

Al corte de febrero de 2016, el 19% de los planes de estudio de los programas de pregrado en Mercadeo en Colombia incluían alguna asignatura obligatoria en Responsabilidad Social Empresarial o Ética y Responsabilidad Social Empresarial. Al ampliar el rango e incluir asignaturas que tienen relación directa con la RSE, como Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible, el porcentaje se incrementó a 32%. Al contemplar Ética y Ética Profesional, junto con las asignaturas mencionadas, el porcentaje aumentó a 74%.

Con relación a los planes de estudio de los programas de pregrado en Administración en Colombia, al corte de febrero de 2016 se obtuvieron los siguientes resultados: el 33% incluían alguna asignatura obligatoria en Responsabilidad Social Empresarial

o Ética y Responsabilidad Social Empresarial. Al ampliar el rango e incluir asignaturas que tienen relación directa con la RSE, como Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible, el porcentaje se incrementó a 55%. Al contemplar Ética y Ética Profesional, junto con las asignaturas mencionadas, el porcentaje aumentó a 81%; así que el 19% de dichos planes de estudio no incluían ninguna asignatura obligatoria que abordara los temas señalados.

En cuanto a los planes de estudio de los programas de pregrado en Ingeniería Industrial en Colombia, al corte de febrero de 2016 se obtuvieron los siguientes resultados: solo el 10% incluían alguna asignatura obligatoria en Responsabilidad Social Empresarial o Ética y Responsabilidad Social Empresarial. Al ampliar el rango e incluir asignaturas que tienen relación directa con la RSE, como Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible, el porcentaje se incrementó a 60%. Al contemplar Ética y Ética Profesional, junto con las asignaturas mencionadas, el porcentaje aumentó a 84%; así que el 16% de dichos planes de estudio no incluían ninguna asignatura obligatoria que abordara los temas señalados.

Evolución de la inclusión de la asignatura RSE en los planes de estudio

En esta sección se presenta la evolución que ha tenido la inclusión de la asignatura RSE en los planes de estudio, mediante la comparación de información correspondiente a diciembre de 2012 y febrero de 2016.

En la Tabla 1 se presentan los porcentajes de inclusión de tres grupos de asignaturas: Responsabilidad Social Empresarial o Ética y Responsabilidad Social Empresarial, Gestión Ambiental y/o Desarrollo Sostenible, y Ética y/o Ética Profesional, en los planes de estudio de Ingeniería Industrial, Administración y Mercadeo correspondientes a diciembre de 2012 (Rivera, 2013) y aquellos correspondientes a febrero de 2016 (información recopilada).

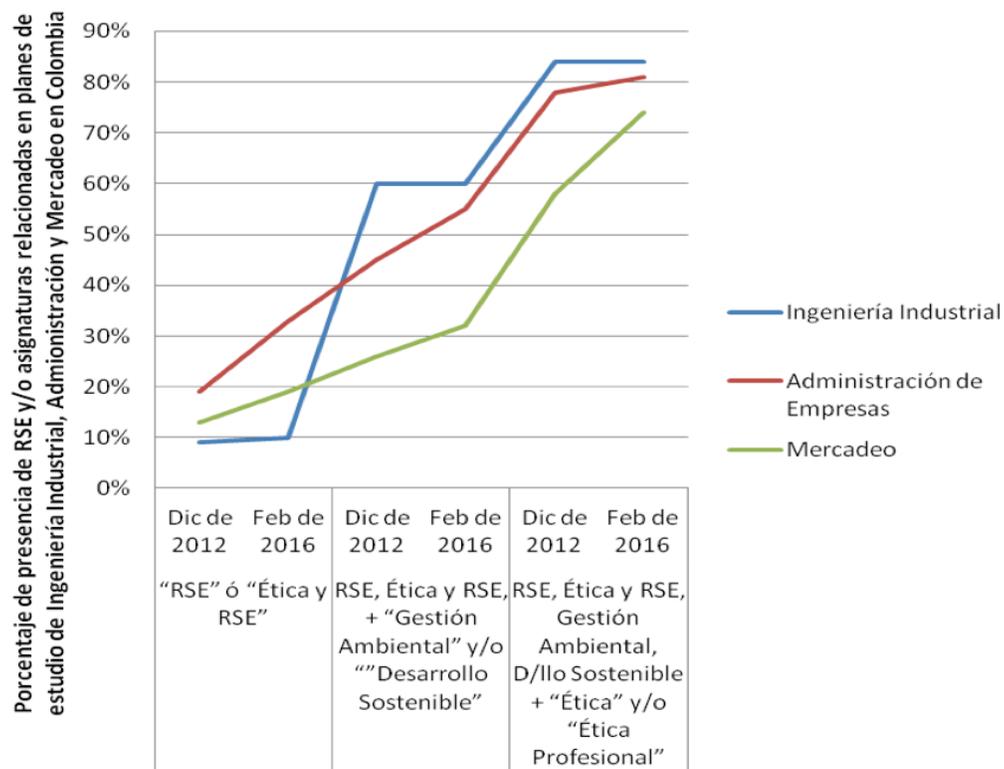
En la Figura 1 se puede observar de manera gráfica la evolución que ha tenido la inclusión de los tres grupos de asignaturas mencionados anteriormente en los planes de estudio de los programas de Ingeniería Industrial, Administración y Mercadeo.

Tabla 1. Inclusión de la RSE y/o asignaturas afines en los planes de estudio de Ingeniería Industrial, Administración y Mercadeo

Programas de pregrado	Inclusión de RSE o Ética y RSE		Inclusión de Gestión Ambiental y/o Desarrollo Sostenible		Inclusión de Ética y/o Ética Profesional	
	dic. 2012	feb. 2016	dic. 2012	feb. 2016	dic. 2012	feb. 2016
Ingeniería Industrial (%)	9%	10%	51%	50%	24%	24%
Acumulado (%)	9%	10%	60%	60%	84%	84%
Administración (%)	19%	33%	26%	22%	33%	26%
Acumulado (%)	19%	33%	45%	55%	78%	81%
Mercadeo (%)	13%	19%	13%	13%	32%	42%
Acumulado (%)	13%	19%	26%	32%	58%	74%

Fuente: elaboración propia con base en información disponible en internet.

Figura 1. Evolución de la inclusión de la asignatura RSE en los planes de estudio de Ingeniería Industrial, Administración y Mercadeo entre diciembre de 2012 y febrero de 2016



Fuente: elaboración propia con base en información disponible en internet.

DISCUSIÓN

A pesar de la necesidad de formar profesionales éticos en Administración, Mercadeo e Ingeniería Industrial con responsabilidad social, los resultados

obtenidos evidencian que el porcentaje de planes de estudio en estos programas de pregrado que incluían alguna asignatura obligatoria de Responsabilidad Social Empresarial al corte de diciembre de 2012 era muy incipiente (13% para Mercadeo, 19% para

Administración y 9% para Ingeniería Industrial); no obstante, se observa que, al corte de febrero de 2016, el porcentaje aumentó (19% para Mercadeo, 33% para Administración y 10% para Ingeniería Industrial).

Al ampliar el rango e incluir asignaturas que tienen relación directa con la RSE, como Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible, el porcentaje fue del 26% para los planes de estudio de Mercadeo, 45% para Administración y 60% para Ingeniería Industrial al corte de diciembre de 2012. Al corte de febrero de 2016, los planes de estudio que incluían RSE y asignaturas como Gestión Ambiental y/o Desarrollo Sostenible correspondían al 32% para Mercadeo, 55% para Administración y 60% para Ingeniería Industrial. El cambio del 10% al 60% en los planes de estudio de Ingeniería Industrial se debe a una inclusión de la asignatura Gestión Ambiental cercana al 50% y a la falta de asignaturas de RSE (10%).

Al corte de diciembre de 2012, los porcentajes acumulados que incluían, además de las asignaturas de RSE, Gestión Ambiental y/o Desarrollo Sostenible, las asignaturas Ética y Ética Profesional fueron del 58% para los planes de estudio de Mercadeo, 78% para Administración y 84% para Ingeniería Industrial. Al corte de febrero de 2016, los planes de estudio que incluían RSE, Gestión Ambiental y/o Desarrollo Sostenible, y Ética y/o Ética Profesional eran del 74% para Mercadeo, 81% para Administración y 84% para Ingeniería Industrial. Por tanto, se evidencia una mayor inclusión en los planes de estudio de Administración y Mercadeo.

Cabe resaltar que, al corte de febrero de 2016, los planes de estudio que no incluían ninguna asignatura de RSE ni asignaturas afines eran del 26% para Mercadeo, 19% para Administración y 16% para Ingeniería Industrial.

LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Dado que la metodología utilizada consistió en un análisis de contenido de información disponible en internet para identificar y registrar las asignaturas de RSE, Gestión Ambiental, Desarrollo Sostenible, Ética y Ética Profesional que se incluían en los planes de estudio de Administración, Mercadeo e Ingeniería Industrial, no se tuvo acceso a información detallada de cada *syllabus*. Esto representa una limitante

para conocer y comparar los objetivos en cuanto a formación, contenidos, metodologías y estrategias de evaluación de cada uno de ellos.

Otra limitante se debe a que en este estudio se identificó la inclusión de la asignatura RSE y otras asignaturas afines mediante la revisión del universo de planes de estudio de programas profesionales en Administración, Mercadeo e Ingeniería Industrial disponibles en el SNIES, para luego comparar los resultados obtenidos con aquellos que presenta Rivera (2013), quien calculó un tamaño de muestra para cada programa utilizando un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%. La diferencia entre el uso de una muestra representativa y el uso del universo de los planes de estudio deja abierta la posibilidad de una variación de los resultados debido al margen de error utilizado por Rivera (2013).

CONCLUSIONES

Aunque la inclusión de la RSE en los planes de estudio de Administración, Mercadeo e Ingeniería Industrial viene aumentando, no deja de ser preocupante que el 26% de los planes de estudio de Mercadeo, el 19% de los planes de estudio de Administración y el 16% de los planes de estudio de Ingeniería Industrial no incluyan la asignatura RSE o asignaturas afines (Gestión Ambiental, Desarrollo Sostenible, Ética o Ética Empresarial). Por un lado, desempeñarse en cargos directivos hace parte del perfil laboral que señalan los planes de estudio de los programas mencionados y, por otro, la sociedad colombiana con frecuencia es testigo de los escándalos protagonizados por gerentes o directores que, mediante la corrupción y la ilegalidad, han demostrado su gran habilidad para acumular riqueza a costa de reducir el beneficio y bienestar de los demás, lo que cuestiona su grado de profesionalismo y ciudadanía.

No obstante, aunque distintos autores (Setó-Pamies *et al.*, 2011; Matten y Moon, 2004) enfatizan en la necesidad de incluir la RSE en los planes de estudio, tanto de Administración como de Ingeniería Industrial, esto no garantiza que los estudiantes vayan a aplicar esos principios en el campo laboral. La universidad no es la única responsable de la formación de buenos ciudadanos, también lo es la familia y la sociedad. Por otra parte, algunos autores (Ruiz Muñoz, 2011; Doane, 2005; Devinney, 2009) consideran que la RSE es más

una estrategia de manipulación, o un argumento de *marketing*, y que el interés de las empresas va en contravía del verdadero significado de la RSE. En esta medida, es pertinente contemplar la propuesta de Kletz (2009), quien sugiere realizar investigaciones orientadas a elaborar una pedagogía que conlleve a la implementación de comportamientos responsables (p. 1584).

Teniendo en cuenta que en Colombia hay una inclusión cada vez mayor de asignaturas relacionadas directamente con la RSE, resulta conveniente desarrollar investigaciones que orienten dicha inclusión en los currículos y que presenten recomendaciones curriculares y pedagógicas para la formación en RSE. También puede ser oportuno realizar estudios en los que se identifique de qué manera los empresarios valoran las competencias de los egresados relacionadas con la aplicación de la RSE, ya que con frecuencia se menciona el desbalance entre lo que espera la sociedad y lo que ofrece la universidad, sin que este sea el único criterio para definir los temas y las metodologías en la formación universitaria, pero pensando en que, además de formar buenos ciudadanos, los planes de estudio respondan a las necesidades de las empresas.

REFERENCIAS

- Aktouf, O. (2004). *La estrategia del avestruz. Post-globalización, management y racionalidad económica*. Santiago de Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- Chanlat, J. (2002). *Ciencias Sociales y Administración*. Medellín, Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Devinney, T. (2009). Is the Socially Responsible Corporation a Myth? The Good, the Bad, and the Ugly of Corporate Social Responsibility. *Academy of Management Perspectives*, 23(2). doi: 10.5465/amp.2009.39985540
- Doane, D. (2005). *The Myth of CSR: The Problem with Assuming That Companies Can Do Well While Also Doing Good is That Markets Don't Really Work That Way*. Stanford Social Innovation Review.
- Fernández, J. L. y Bajo, A. (2010). The presence of business ethics and CSR in Higher Education curricula for executives: The case of Spain. *Journal of Business Ethics Education*, 7, 25-38.
- Garriga, E. y Melé, D. (2004). Corporate Social Responsibility Theories: Mapping the territory. *Journal of Business Ethics*, 53(1/2), 51-71.
- Kletz, P. (2009). Research in social responsibility: a challenge for management education. *Management Decision*, 47(10), 1582-1594.
- Kliksberg, B. (23 de marzo de 2010). *Se necesitan gerentes éticos*. *Mercados & Tendencias*. Recuperado de <http://revistamyt.com/se-necesitan-gerentes-eticos/>
- Larrán, M. y Andrades, F. (2013). Presencia de la responsabilidad social en las titulaciones de grado de las universidades españolas. En *Foro de Consejos Sociales de las universidades públicas de Andalucía*. Granada, España. Recuperado de http://rsuniversitaria.org/web/images/stories/Oferta_formativa_en_RS_en_Espana_1.pdf
- Laval, C. (2004). *La escuela no es una empresa*. Barcelona, España: Ediciones Paidós Ibérica, S.A.
- Lindgreen, A., Córdoba, J. R., Maon, F. y Mendoza, J. M. (2010). Corporate Social Responsibility in Colombia: Making Sense of Social Strategies. *Journal of Business Ethics*, 91(S2), 229-242.
- Martínez, E. y García, L. (2012). Panorama de la enseñanza en Responsabilidad Social Empresarial en las instituciones de educación superior en México e Iberoamérica. *Gestión y Estrategia*, (41), 55-69.
- Matten, D. y Moon, J. (2004). Corporate Social Responsibility Education in Europe. *Journal of Business Ethics*, 54(4), 323-337.
- Moon, J. y Orlitzky, M. (2011). Corporate Social Responsibility and Sustainability Education: A Trans-Atlantic Comparison. *Journal of Management & Organization*, 17(5), 583-603.
- Morgan, G. (1998). *Imágenes de la Organización*. México, D. F., México: AlfaOmega.
- Nicholls, J., Hair, J., Ragland, C. y Schimmel, K. (2013). Ethics, Corporate Social Responsibility, and

Sustainability Education in AACSB Undergraduate and Graduate Marketing Curricula: A Benchmark Study. *Journal of Marketing Education*, 35(2), 129-140.

Persons, O. (2012). Incorporating Corporate Social Responsibility and Sustainability into a Business Course: A Shared Experience. *Journal of Education for Business*, 87(2), 63-72.

Rivera, E. (octubre de 2013). Presencia de la asignatura "Responsabilidad Social Empresarial" en los planes de estudio de Mercadeo, Administración e Ingeniería Industrial en Colombia. En la XLVIII Asamblea Anual de CLADEA, Río de Janeiro, Brasil. Recuperado de http://cladea.org/proceedings_2013/wp-content/uploads/2014/02/2013-XC-0361.pdf

Ruiz Muñoz, M. (2011). Un apunte crítico sobre la Responsabilidad Social Corporativa (RSC/RSE). *REDUR*, (9), 27-65.

Rundle-Thiele, S. R. y Wymer, W. (2010). Stand-Alone Ethics, Social Responsibility, and Sustainability Course Requirements. *Journal of Marketing Education*, 32(1), 5-12.

Setó-Pamies, D., Domingo-Vernis, M. y Rabassa-Figueras, N. (2011). Corporate social responsibility in management education: current status in Spain universities. *Journal of Management & Organization*, 17(5), 604-620.

Sistema Nacional de Información de la Educación Superior (2015). Recuperado de <http://www.mineduacion.gov.co/sistemasdeinformacion/1735/w3-article-212396.html>

Sobczak, A., Debucquet, G. y Havard, C. (2006). The impact of higher education on students' and Young managers' perception of companies and CSR: an exploratory analysis. *Corporate Governance*, 6(4), 463-474.

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 a través de nuestro sistema de gestión editorial <http://goo.gl/m6Q6FD> o vía correo electrónico a revista.mutis@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 simétricas 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:

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, en idioma original y en inglés.

Autores. Debe escribirse nombre completo de los autores, separados por comas y tamaño de fuente 12. "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, número de registro en ORCID y Google Scholar. 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 <https://orcid.org/xxx>
https://scholar.google.es/citations?hl=es&user=pTzo5RoA AAAJ&view_op=list_works

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 comparándolos 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 relacionadas con la hipótesis o planteamiento del problema descrito en la introducción.

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 la 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, *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 de 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 el editor (revista.mutis@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 2018