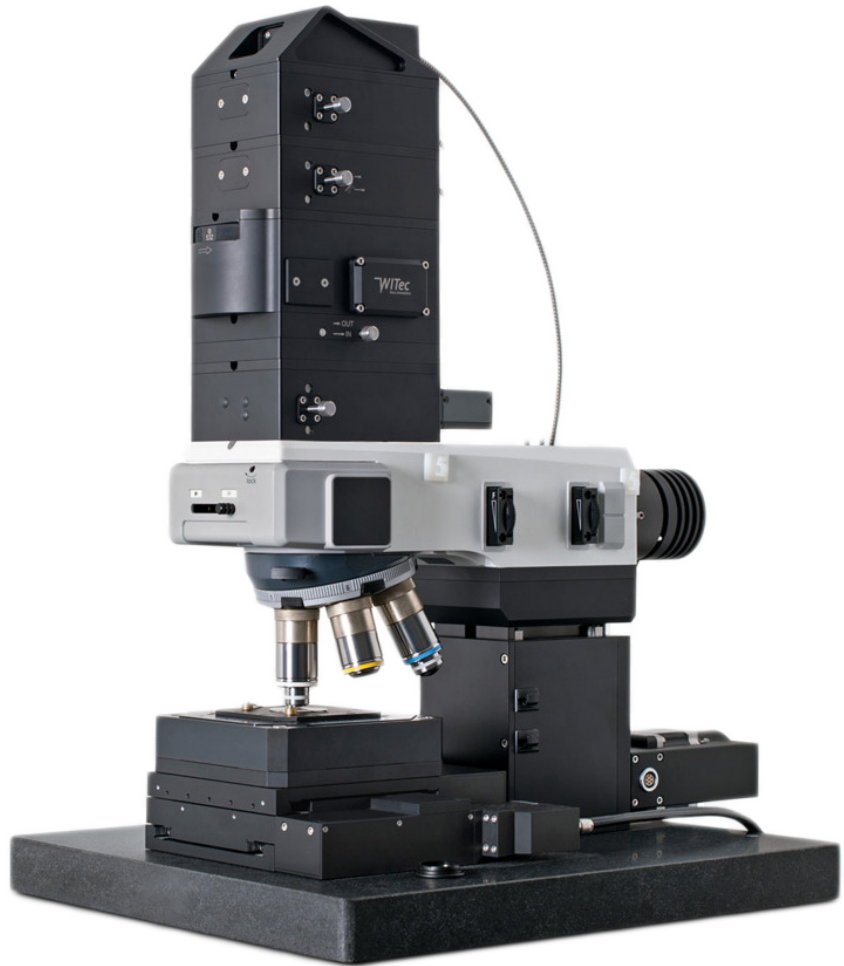


Ingeniería

Revista de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas

ISSN: 2500-929X • Vol. 4, enero-diciembre de 2019



Ingeciencia

Revista de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas

ISSN: 2500-929X • Vol. 4, enero-diciembre de 2019

Rector

Jaime Arias Ramírez

Vicerrector académico

Óscar Leonardo Herrera Sandoval

Vicerrectora administrativa y financiera

Paula Andrea López López

Vicerrector de programas

Jorge Hernán Gómez Cardonas

Ingeciencia es la revista de investigación formativa de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas.
ingeciencia@ucentral.edu.co

Director

Adolfo Naranjo Parra

Editora

Leticia Fernández Marín

Comité editorial

Adolfo José Naranjo Parra

Sandra Milena Gamboa Moreno

Aliex Trujillo García

Gastón Mejía Arias

Leticia Fernández Marín

Héctor Sanabria Rivera

© Ediciones Universidad Central

© Varios autores

Coordinación Editorial

Calle 21 n.º 5-84 (4.º piso). Bogotá, D. C., Colombia

Conmutador: 323 9868, ext.: 1556

www.ucentral.edu.co/editorial

Editorial - CRAI

Héctor Sanabria R.

Editor

Nicolás Rojas Sierra

Asistente editorial

lacentraldediseno.com

Diseño y diagramación

Felipe Solano Fitzgerald

Corrección de textos

Imagen de cubierta: Microscopio de fuerza atómica (AFM) y de técnica Raman Alpha300 RA, fabricado por WITec. Tomado de <https://www.freepng.es/png-3k0v3h/>



Los contenidos de la revista *Ingeciencia* son publicados de acuerdo con los términos de la licencia Creative Commons 2.5. Usted es libre de copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato, siempre y cuando dé los créditos de manera apropiada, no lo haga con fines comerciales y no realice obras derivadas.

Las ideas aquí expresadas, lo mismo que su escritura, son exclusiva responsabilidad de los escritores y no comprometen a la Universidad Central ni a la orientación de la revista.

Distribución gratuita

Contenido

Editorial 5

Microscopía de fuerza magnética: principio, aplicaciones y perspectivas 7
Cristhian Almonacid Rojas, Óscar Herrera Sandoval y José Augusto Galvis

Obtención de tintas conductoras a base de grafeno por medio de exfoliación electroquímica 21
Johan Rubio, Camilo Ospina, Luis Carvajal y Mikel Hurtado

Reactores bioquímicos pasivos enmendados con nanopartículas de hierro cero valente para tratamiento de drenajes ácidos de mina..... 37
Camila Andrea Vera Díaz y Yaneth Vásquez Ochoa

Bioacumulación de metales pesados en dos especies de peces vendidos en el mercado de Paloquemao (Bogotá) 55
Vanesa Perea y Yaneth Vásquez Ochoa

Problemática ambiental generada por lixiviados en Bogotá..... 66
Angélica María Quintero Gualteros y Luisa Fernanda Melo Suárez

Zonificación ambiental por riesgo de erosión en la vereda El Hato, municipio de Choachí, asociada al cultivo de girasol 79
Wendy Yineth Peñuela Rincón, María Fernanda Tocora Rodríguez y Laura Victoria Mahecha Anzola

Contents

Editorial 5

Magnetic force microscopy: principle, applications and perspectives 7
Cristhian Almonacid Rojas, Óscar Herrera Sandoval y José Augusto Galvis

Obtaining graphene-based conductive inks by electrochemical exfoliation 21
Johan Rubio, Camilo Ospina, Luis Carvajal y Mikel Hurtado

Passive biochemical reactors amended with zero valent iron nanoparticles for acid mine drainage treatment..... 37
Camila Andrea Vera Díaz y Yaneth Vásquez Ochoa

Bioaccumulation of heavy metals in two species of fish sold in Paloquemao market (Bogotá)..... 55
Vanesa Perea y Yaneth Vásquez Ochoa

Environmental problems generated by leachates in Bogota 66
Angélica María Quintero Gualteros y Luisa Fernanda Melo Suárez

Environmental zoning for erosion risk in the village El Hato of the Choachí municipality associated with sunflower cultivation 79
Wendy Yineth Peñuela Rincón, María Fernanda Tocora Rodríguez y Laura Victoria Mahecha Anzola

Sistema para detectar algunos símbolos del alfabeto de la lengua de señas colombiana a través de señales de electromiografía.....	97	System to detect certain symbols of the Colombian Sign Language alphabet through electromyography signals.....	97
Freddy Alexander Cepeda Ortiz y Juan Sebastián Rubiano Labrador		Freddy Alexander Cepeda Ortiz y Juan Sebastián Rubiano Labrador	
Mil palabras en acción	116	A thousand words in action.....	116

Apreciados lectores, les damos la bienvenida al volumen 4 de nuestra revista *Ingeciencia*, medio de divulgación de las actividades, logros y proyectos académicos de los estudiantes y profesores de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas de la Universidad Central.

Estamos sin duda en una época difícil, pero es también una época de reflexión y de vislumbrar y establecer cambios, desde algunos que pensamos que serían solo en la época de pandemia hasta también otros cambios radicales, que algunos autores han llamado “*the great reset*”¹, el gran reinicio.

Por otro lado, y casi para conformar la “tormenta perfecta”, desde hace unos años se viene observando una desaceleración en la tasa de generación de innovaciones a nivel mundial, hasta el punto de que este fenómeno se ha denominado una hambruna de innovación, “*an innovation famine*”². En este entorno se vuelve aún más importante el trabajo académico, la generación de soluciones a problemas sociales y la divulgación de esos resultados.

Invitamos al público lector a compartir su reacción a los artículos que se presentan en esta revista. Todas las preguntas, sugerencias, como también sus críticas y desacuerdos, serán bienvenidos. Es en este diálogo académico que podemos crecer todos y descubrir nuevos caminos de aplicación de los desarrollos que se van generando.

El emprendimiento y la innovación florecen en entornos abiertos y libres, donde se permite cometer errores y aprender de ellos. Como sociedad, debemos valorar y apoyar esos intentos y contribuir con nuestros comentarios y sugerencias. Debemos generar entornos de *sandbox* donde estas iniciativas puedan ser probadas y evaluadas, sin que se generen consecuencias a largo plazo. Este campo de prueba y aprendizaje es vital en la consolidación de soluciones. Así mismo, también debemos buscar acompañamiento y mentoría de expertos que nos puedan ayudar en el avance de nuestras propuestas.

En ese sentido, la Universidad Central ha consolidado su iniciativa llamada Central Lab, un espacio integral para el desarrollo de iniciativas de emprendimiento. Invitamos a los lectores a visitar este espacio (<https://www.ucentral.edu.co/central-lab/central-lab>). Allí encontrarán una ruta de apoyo para las propuestas de innovación y emprendimiento.

Este es el momento de pivotar para construir la nueva realidad. Esto significa que no debemos ser solamente espectadores de esa nueva realidad. Dentro de nuestro entorno, posibilidades, recursos, experiencias, conocimientos y oportunidades, tenemos la obligación

¹ K. Schwab & T. Malleret, *COVID-19: The great reset* (World Economic Forum, 2020).

² M. Ridley, *How innovation works* (Harper Collins, 2020).

de establecer en qué vamos a concentrarnos, en qué vamos a ser excelentes, en qué vamos a ser referentes. Esto implica trabajar seriamente, intentarlo, ser persistentes, aprender de los errores y, en fin, como se ha dicho: pivotar.

Esperamos que disfruten de la lectura de esta edición de la revista y que nos encontremos en la “nueva realidad”, construida entre todos.

ADOLFO JOSÉ NARANJO PARRA

DECANO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS

Microscopía de fuerza magnética: principio, aplicaciones y perspectivas

Magnetic force microscopy: principle, applications and perspectives

Cristhian Almonacid Rojas^{*}, Óscar Herrera Sandoval^{**} y José Augusto Galvis^{***}

Cómo citar:

Almonacid Rojas, C., Herrera Sandoval, Ó., & Galvis, J. A. (2019). Microscopía de fuerza magnética: principio, aplicaciones y perspectivas. *Ingeciencia*, 4, 7-20.

* Estudiante de Ingeniería Electrónica, Universidad Central. Correo: calmonacidr@ucentral.edu.co

** Vicerrector académico, Universidad Central. Correo: oherrerass@ucentral.edu.co

*** Coordinador científico del Clúster de Investigación en Ciencias y Tecnologías Convergientes (NBIC), Universidad Central. Correo: jgalvise@ucentral.edu.co

Resumen

Uno de los principales objetivos de la nanotecnología es usar de forma adecuada las propiedades de la materia que emergen en la escala nano (10^{-9} m) para mejorar la calidad de vida en todos los ámbitos de la humanidad. En este contexto, una de las condiciones mínimas para conseguir nuevos desarrollos nanotecnológicos es contar con herramientas, entre las cuales se encuentra la microscopía de fuerza atómica (AFM, por su sigla en inglés), la cual, dependiendo del modo de funcionamiento, permite conocer diferentes tipos de propiedades físicas. Este documento presenta una revisión de la AFM como eje central para caracterizar materiales a escala nanométrica y hace hincapié en el modo de funcionamiento conocido como Microscopía de Fuerza Magnética (MFM), la cual permite caracterizar las propiedades magnéticas del material a micro y nanoescala. Se presentan las principales aplicaciones de la MFM en el área de la salud, remediación medioambiental y ciencia de materiales, de forma convergente a la nanotecnología y la bioingeniería.

Palabras clave: bioingeniería, ciencias y tecnologías convergentes, microscopía de fuerza magnética, microscopio de fuerza atómica, nanotecnología.

Abstract

One of the main purposes of the nanotechnology is the correct use of the material properties which emerge in the nanoscale (10^{-9} m) to be used in the improvement of all aspect of humanity. One of the minimal condition to reach new Nanotechnological developments is the access and use of the right experimental tools that allow us to go into this scale in matter. The atomic force microscopy (AFM) is one of them, which according to the operating mode, can be used to known different physical properties. This manuscript shows a review of atomic force microscopy as central axis for the characterization of materials in the nanoscale, focusing in the magnetic force microscopy (MFM) mode, which allow us to characterize magnetic properties of matter in the micro and nanoscale. The main applications of MFM are presented in the area of health, environmental remediation and material science, in a convergent way to nanotechnology and bioengineer.

Keywords: atomic force microscope, bioengineering, magnetic force microscopy, nanotechnology, convergence of NBIC technologies.

1. Introducción

La historia de las técnicas de sonda de barrido empieza en 1981 con la invención del microscopio de efecto túnel (STM, por su sigla en inglés) en los laboratorios de IBM por parte de Gerd Binnig y Heinrich Rohrer. Cinco años después, en 1986, el mismo año en que estos investigadores recibieron el Premio Nobel, Gerd Binnig, Calvin Quate y Christoph Gerber, basados en la técnica de STM, presentaron una nueva revolución tecnológica, el microscopio de fuerza atómica (AFM, por su sigla en inglés). Actualmente, el AFM es la técnica de barrido más usada y posiblemente la más versátil. El microscopio de fuerza atómica es un dispositivo mecano-óptico que en su forma más básica se compone de una sonda, un fotosensor sensible al movimiento (PSPD, por su sigla en inglés), un láser y un sistema de adquisición y control. Está diseñado para caracterizar materiales, lo cual permite, dependiendo de las características del equipo, conocer información topográfica, conductiva, resistiva, electrónica y térmica a escala nanométrica. Cada una de ellas está asociada con un modo de medición particular.

La figura 1 presenta un esquema general del microscopio de fuerza atómica. La muestra se ubica en un escáner piezoeléctrico, el cual se mueve en los ejes X, Y y Z. La sonda (Cantilever), que hace las veces de un “dedo” que “toca” una superficie, cuenta con una punta afilada que se encuentra en el extremo libre de esta.

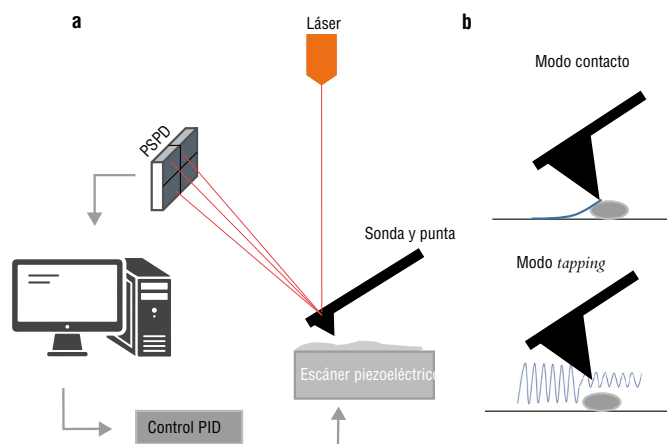


Figura 1. Componentes que integran un microscopio de fuerza atómica (AFM).
Fuente: elaboración propia.

El sistema piezoeléctrico permite que la punta se pueda desplazar sobre la muestra y realizar barridos controlados sobre cierta área. Cuando la punta se acerca lo suficiente a la superficie del material, aparecen fuerzas atractivas sobre la punta en dirección de la superficie, lo cual causa una deflexión sobre la sonda. Si la punta se acerca demasiado a la superficie, cerca al contacto físico entre ambas, aparecen fuerzas repulsivas que deflexionan la sonda en dirección contraria.

Sobre el extremo libre de la sonda incide un rayo láser, que se refleja en un dispositivo de detección de posición (PSPD, por su sigla en inglés) de cuatro diodos fotosensibles. Este tipo de dispositivos detectan la deflexión de la sonda cuando se acerca a la superficie gracias al cambio de posición del láser reflejado por la sonda. Cualquier tipo de deflexión de la sonda, por pequeña que sea, puede ser detectada por la matriz PSPD. De esta forma, si cuando la punta barre pasa por una protuberancia en la superficie, la deflexión resultante de la sonda será registrada por el PSPD. Así, los cambios que el PSPD detecta cuando la punta barre de forma controlada la superficie de la muestra dan información de su topografía.

El sistema encargado de realizar el barrido controlado sobre la superficie de la muestra es el escáner (figura 1), que típicamente está hecho de un material piezoeléctrico. Los materiales piezoeléctricos sufren deformaciones (contracciones, elongaciones y movimientos de cizalla) cuando se someten a campos eléctricos. De esta forma, se puede montar la muestra sobre una plataforma piezoeléctrica que realice los movimientos necesarios para que la posición relativa entre la punta y la muestra varíe según se apliquen distintos voltajes sobre el piezoeléctrico. Un sistema PID (Proporcional-Integral-Diferencial) controla diferentes parámetros del barrido según el modo de medición, es decir, cambia la altura entre punta y muestra mientras se realiza el escáner piezoeléctrico.

La sonda está compuesta por una punta muy afilada ubicada en su extremo libre, como la presentada en la figura 2, que en este caso tiene un radio de punta de ~ 8 nm. El radio de la punta es uno de los factores que determinan la resolución del AFM. Las puntas comerciales tienen un radio de curvatura de 5 a 10 nm y se fabrican comúnmente de silicio con técnicas de deposición por vapor o por litografía de iones focalizado (Bowen & Hilal, 2009).

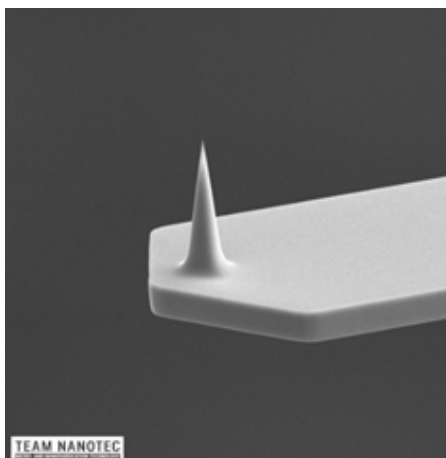


Figura 2. Sonda cónica para modo *tapping*.

Fuente: Team Nanotec (s. f.).

1.1 Modos de imagen

Existen diferentes modos de medición para reproducir la superficie de un material por medio del AFM. Por simplicidad, en este artículo solo se tienen en cuenta los modos más comunes: modo de contacto y de *tapping*, o contacto intermitente.

En el modo de contacto, la punta está en continuo contacto físico con la superficie de la muestra (figura 1b), de forma que la punta se “arrastra” sobre la superficie del material. El parámetro de control durante el barrido es la deflexión de la sonda. El control PID se encarga de mantener esta deflexión constante, de forma que un cambio de altura, que produce una deflexión mayor o menor, es compensado por el sistema de retroalimentación. Los cambios en la dirección Z requeridos para mantener la deflexión constante respecto a la posición X-Y se usan para identificar la topografía de la superficie de la muestra. Este es el modo de medición más sencillo de un AFM, el cual por lo general produce un desgaste tanto en muestra como en punta.

En el modo de contacto intermedio o *tapping*, la sonda se pone a oscilar sobre la superficie del material. El parámetro de control para el PID es la frecuencia o amplitud de oscilación de la sonda, que normalmente coincide con su frecuencia de oscilación natural. Cuando la sonda oscila lo suficientemente cerca de la superficie de la muestra, esta sufrirá una serie de fuerzas repulsivas y atractivas que modifican la amplitud de oscilación (figura 1b). El sistema PID se encarga de ajustar la altura para eliminar las fuerzas sobre la punta y recuperar el valor inicial de amplitud (Eaton & West, 2010). Los movimientos en Z del escáner para mantener la amplitud de oscilación constante corresponden a las diferentes alturas de la superficie, con lo cual se puede crear una imagen de la topografía de la muestra sin tener contacto directo con la superficie.

Superficies con diferentes propiedades mecánicas o de adhesión pueden ocasionar un corrimiento entre la fase de la frecuencia en la que se hace oscilar la sonda y la frecuencia real a la cual oscila. Este fenómeno se usa para crear imágenes de fase, las cuales muestran cambios cualitativos en las propiedades del material que se está midiendo; estos cambios están presentados en los gradientes de la fuerza (magnética, electrostática, entre otras) que se desea analizar (Loos, 2005).

Además de las mediciones de topografía, la microscopía de fuerza atómica tiene muchos modos de operación que permiten caracterizar diferentes propiedades físicas, como son: la microscopía de fuerza electrostática (EFM, por su sigla en inglés), modo de no contacto en el cual se evalúan las fuerzas electrostáticas producidas por la atracción o repulsión de cargas eléctricas. También se encuentra la AFM de modo conductivo, técnica de contacto en la que se usa una punta conductora con una diferencia de potencial con respecto a la muestra. En este caso, la conductancia eléctrica registrada en cada punto se usa para generar una imagen de sus propiedades eléctricas en superficie. Por su parte, la AFM de modo capacitivo caracteriza la superficie de la muestra usando el registro de los cambios locales en capacitancia. Finalmente, el modo de microscopía de fuerza lateral monitorea las desviaciones torsionales de la sonda a medida que explora la superficie de la muestra, con lo cual proporciona datos útiles como la fuerza de fricción y la adherencia del material (Eaton & West, 2010).

A continuación, se exponen las principales características y usos del modo de la microscopía de fuerza magnética (MFM), en la cual se combina el análisis de la topografía con el de las propiedades magnéticas de la muestra.

2. Microscopía de fuerza magnética (MFM)

En este modo, la sonda cuenta con una punta magnética para interactuar con los dominios magnéticos presentes en la muestra. La fuerza magnética generada entre la punta y la muestra se usa para reconstruir la estructura magnética de la superficie que se estudia. Durante el proceso de barrido actúan diferentes tipos de interacciones, por lo cual es indispensable realizar un análisis completo de los resultados para extraer aquellos que provienen exclusivamente de interacciones magnéticas. A continuación, se detallan los conceptos básicos que se deben conocer para entender la microscopía de fuerza magnética.

2.1 Materiales ferromagnéticos

Las propiedades de los materiales ferromagnéticos dependen de su estructura y organización cristalina. Este fenómeno físico se produce por el ordenamiento de los dominios magnéticos del material en un sentido y dirección, incluso en ausencia de un campo magnético exterior (Kittel, 2004). Esta alineación se puede presentar cuando interactúa con campos magnéticos externos u otros materiales que tengan comportamiento magnético.

El ferromagnetismo se presenta en materiales como hierro, cobalto, níquel y otras aleaciones. Una de las propiedades que da origen al magnetismo es el momento dipolar magnético intrínseco del electrón. El origen de este momento magnético proviene de una de sus propiedades fundamentales explicada por la mecánica cuántica, el “spin” del electrón. El spin, cuyo análogo clásico es el momento angular, se comporta como un pequeño imán o dipolo magnético. El fenómeno de ferromagnetismo se presenta por una interacción llamada *interacción de intercambio* entre los spines de los electrones de la última banda de los átomos del material. Cuando estos dipolos magnéticos en una porción del material están alineados, es decir, apuntando en la misma dirección, sus pequeños campos magnéticos se suman y generan un campo magnético global.

En la figura 3, los materiales ferromagnéticos están divididos en dominios magnéticos separados por paredes de Bloch, que son la zona de transición de los dominios magnéticos. Por encima de cierta temperatura, llamada la *temperatura de Curie*, el material ferromagnético pierde su magnetismo, es decir, se pierde el orden de los momentos magnéticos del material debido a las fluctuaciones térmicas (Encyclopedia Britannica, 2018).

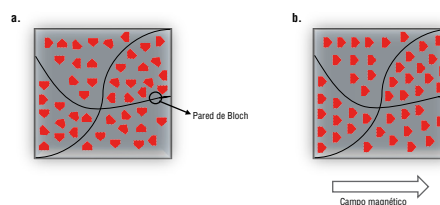


Figura 3. Paredes de Bloch separando los dominios magnéticos en un material ferromagnético sin campo externo (a) y con campo magnético externo que orienta los dipolos (b).

Fuente: elaboración propia.

2.2 Ciclo de histéresis

Cuando se expone un material ferromagnético a un campo magnético externo de gran intensidad (figura 3b), los dominios magnéticos se alinean en la dirección del campo externo y quedan en un estado de imantación. Una vez se suspende la interacción del campo externo con el material, se presenta una imantación remanente, la cual evita que el material regrese sus dominios magnéticos al estado inicial. Esto genera que la materia se convierta en un imán permanente. Si se desea desimantarlo, es necesario aplicar un campo magnético en la dirección contraria a la inicial o aumentar la temperatura por encima de la temperatura de Curie (Pérez, 2016).

En la figura 4 se presenta el ciclo de histéresis proceso de magnetización de los materiales ferromagnéticos. En el estado (a) de la figura 4, los dominios magnéticos del material están orientados en diferentes direcciones, no hay presente magnetización global. Al exponer el material a un campo magnético externo (b), se inicia la orientación de los dominios magnéticos del material en un solo sentido, de manera que se genera un monodominio. La inducción magnética satura el valor de magnetización del material, B_s (c), con lo cual alcanza el valor de campo inducido máximo con todos los dipolos alineados. Al retirar el campo externo (d), la magnetización del material se reduce a un valor B_r , conocido como *punto de magnetización remanente*, el cual es el campo magnético producido por el material en estado imantado. Si se aplica un campo magnético externo en dirección opuesta a la inicial (e), los dipolos ahora tratarán de alinearse en la dirección opuesta, y al suspender el campo se presenta de nuevo una imantación remanente (f). El valor de cruce entre el eje X (intensidad de campo magnético) y la curva de magnetización se conoce como *valor coercitivo*, donde la magnetización del material es nuevamente cero. El valor de coercitividad indica la dificultad que presenta el material para ser desimantado. Si se incrementa el valor de un campo magnético opuesto, el material orientará nuevamente los dominios magnéticos en el sentido del campo que lo induce, repitiendo el ciclo antes expuesto (Pérez, 2016). Dentro de materiales duros se tienen las aleaciones de Al (aluminio), Ni (níquel) y Co (cobalto) más Fe (hierro) como material base, los cuales permiten fabricar imanes permanentes con altos campos en su superficie.

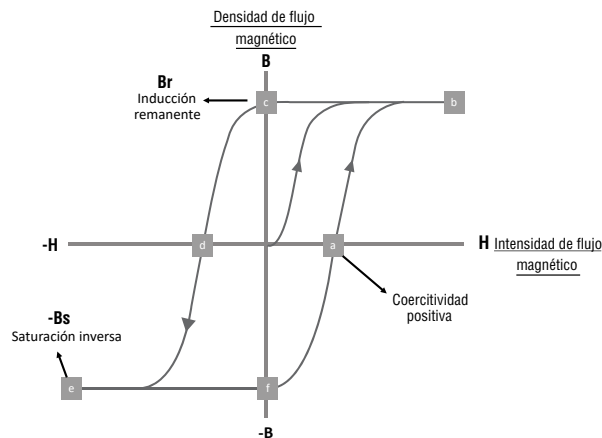


Figura 4. Ciclo de histéresis.

Fuente: elaboración propia.

2.3 Principio del AFM en modo MFM

La microscopía de fuerza magnética (MFM) caracteriza la topografía de la superficie del material y su respuesta magnética. Para obtener las características magnéticas, la sonda se somete a un proceso de magnetización —como se explicó en la sección anterior—, como si el “dedo” que toca la superficie ahora fuese magnético y “sintiera” los campos magnéticos del material que se estudia. Durante el proceso de medición, se debe tener precaución con la separación entre la sonda y la muestra: la distancia no debe ser muy corta, ya que se estaría midiendo adicionalmente la interacción de las fuerzas atómicas, ni muy grande, puesto que la interacción magnética entre la punta y la muestra sería muy baja; por lo tanto, en ese modo la distancia puede estar en el rango de 10 a 100 angstrom (\AA) (Ermolaeva *et al.*, 2017).

El proceso inicial de caracterización, como muestra la figura 5, consiste en visualizar la topografía del material. Los cambios en la posición del láser captados por la matriz PSPD permiten reconstruir las condiciones topográficas, como se explicó anteriormente.

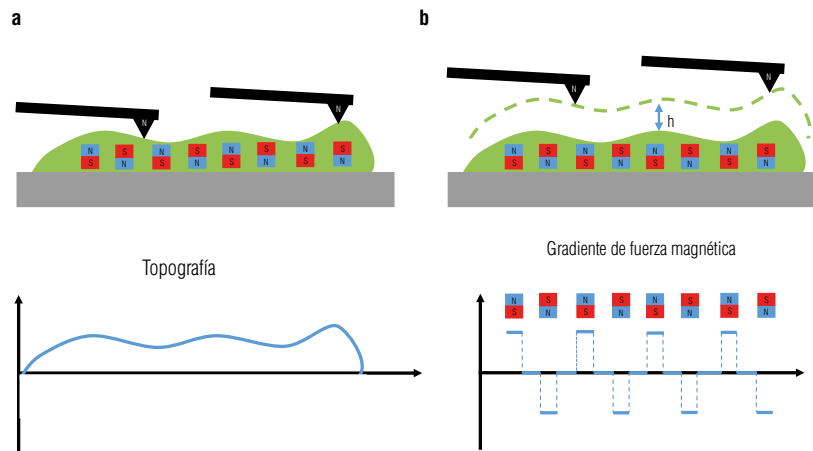


Figura 5. Caracterización magnética con el AFM. En (a) se toma la medición de la topografía del material en modo contacto. En (b) la punta se eleva una distancia h y sigue la trayectoria registrada en (a) en modo *tapping*. Los cambios de la amplitud de oscilación de la sonda se originan en la interacción magnética con la superficie.

Fuente: elaboración propia.

Como muestra la figura 5b, para hacer la caracterización magnética de la superficie, la sonda se eleva una distancia h respecto a la superficie del material. Con una frecuencia de oscilación determinada, la sonda recorre el perfil de topografía trazado por la medición previa, manteniendo la altura h constante durante el proceso de barrido. La frecuencia de oscilación de la sonda se ve afectada por las fuerzas magnéticas entre la punta y la muestra. Las variaciones en la frecuencia de la sonda se capturan con el PSPD.

Dado que el cambio en la frecuencia de oscilación es directamente proporcional a la fuerza magnética entre la punta y la muestra, se puede reconstruir un mapa de las fuerzas magnéticas en la superficie, lo cual indica de forma directa su magnetización. A lo largo de su trayectoria oscilante, la punta está sometida a un gradiente de fuerza, que de acuerdo con Duerig (2000) corresponde a:

$$F'_z = -\frac{2k}{f_0} \Delta f' \quad (\text{Ec. 1})$$

donde F'_z es el gradiente efectivo de fuerza sobre la punta, k la constante elástica de la sonda, f_0 la frecuencia natural de resonancia y $\Delta f'$ su cambio de frecuencia. A continuación, se presentan ejemplos de estudios y aplicaciones de MFM.

2.3.1 Aplicación de MFM para el estudio de nanopartículas

Uno de los usos más frecuentes del MFM es el estudio de las propiedades de nanopartículas magnéticas, las cuales tienen importantes aplicaciones en diferentes campos, como remediación ambiental, liberación y control de medicamentos, tratamiento de enfermedades con hipertermia, catálisis, entre otras (Kudr *et al.*, 2017).

La figura 6 muestra un estudio topográfico y magnético de dos nanopartículas de hierro tomadas en el Laboratorio de Microscopía Avanzada de la Universidad Central, adscrito al Clúster de Investigación en Ciencias y Tecnologías Convergentes (NBIC). En este laboratorio se cuenta con un microscopio de fuerza atómica marca Asylum Research Cypher ES, el cual tiene todos los modos de medición expuestos en este documento.

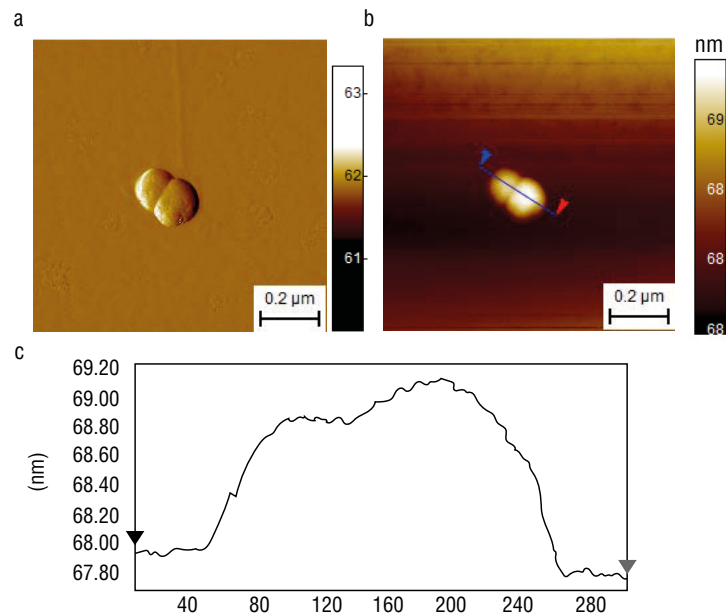


Figura 6. Imanes de AFM de dos nanopartículas de hierro, tomadas en el AFM de la Universidad Central. (a) Topografía en modo *tapping* de las nanopartículas. (b) Imagen de la respuesta magnética de las nanopartículas en modo MFM. (c) Cambio de amplitud en la oscilación de la sonda debido a la interacción magnética con la nanopartícula.

Fuente: elaboración propia.

La imagen topográfica (figura 6a) fue tomada en modo *tapping*, donde se identifican tamaños en diámetro para las nanopartículas del orden de los 100 nm. El estudio de respuesta magnética (figura 6b) se realizó en el modo MFM, donde es evidente la alta respuesta magnética de las nanopartículas, la cual, como se explicó anteriormente, se

mede a través del cambio que sufre la amplitud de oscilación (ΔA) de la sonda del AFM. La figura 6c muestra el valor de ΔA a lo largo de la línea azul de la figura 6b, el cual es proporcional al gradiente efectivo de fuerza magnética F'_z sobre la punta. Como es de esperar, el máximo gradiente de fuerza magnética se presenta en la parte superior de las nanopartículas de hierro.

Otro ejemplo interesante se presenta en la figura 7, en la cual se muestran algunas propiedades de nanopartículas magnetoeléctricas (MEN, por su sigla en inglés) que, en este caso, son usadas para transportar y liberar medicamentos en células tumorales (Rodzinski *et al.*, 2016). Las MEN tienen la propiedad de adquirir magnetización cuando se mueven a través de un campo eléctrico. Gracias a esto, las nanopartículas pueden ser desplazadas dentro o fuera de un órgano manipulando gradientes de campo eléctrico y campos magnéticos externos. El principal uso de las MEN es transportar y liberar medicamentos en células tumorales.

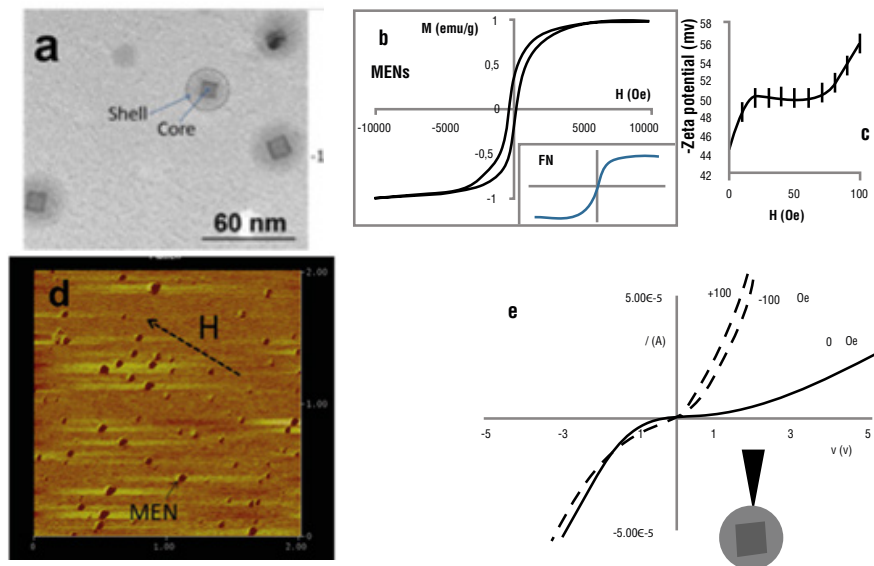


Figura 7. Caracterización de MEN con un microscopio electrónico de transmisión (TEM) (a) y MFM (b, c, d, e).

Fuente: Rodzinski *et al.* (2016).

La figura 7a, tomada de la publicación realizada por Rodzinski *et al.* (2016) de la Universidad Internacional de La Florida, presenta una imagen de las MEN con microscopía electrónica de barrido. Estas nanopartículas están constituidas por un núcleo CoFe_2O_4 y un caparazón de BaTiO_3 . Por medio del MFM, se pueden caracterizar sus principales propiedades magnéticas (figura 7b-e). La superficie de las MEN fueron funcionalizadas con un inhibidor mitótico para el estudio y tratamiento de células cancerígenas. Las MEN funcionalizadas fueron dirigidas hacia la zona tumoral aplicando un campo magnético de 10 mT. Las células cancerígenas cuentan con un potencial de membrana (-3 mV) menor al de una célula sana (-50 mV), lo cual facilita la internación con las MEN. Para liberar el medicamento funcionalizado en su superficie se aplicó un campo magnético alterno de 5 mT a 100 Hz, que produce la vibración controlada de las nanopartículas y posterior liberación del fármaco. Los ratones expuestos a este tratamiento eliminaron las células cancerígenas pasados tres meses de tratamiento sin presentar metástasis (Rodzinski *et al.*, 2016).

2.3.2 Aplicación de MFM en heteroestructuras

La física de las heteroestructuras permite revelar modificaciones de las propiedades de un sistema por medio de la interacción de diferentes tipos de elementos. La figura 8 presenta un ejemplo de heteroestructuras, específicamente, el trabajo que realizaron Ermolaeva *et al.* (2017) en el Instituto de Física de Microestructuras de la Academia de Ciencias de Rusia (RAS) y la Universidad Estatal de San Petersburgo con películas delgadas —cobalto (Co) (0,5 nm) / platino (Pt) (1 nm)— mediante pulverización catódica DC, la cual usa una fuente de corriente directa sobre el sustrato de silicio (Si) con subcapa —tantalio (Ta) (10 nm) / Pt (10 nm)— (Ermolaeva *et al.*, 2017). En este estudio se depositó Co en capas de espesor variable para estudiar cómo se modifican los dominios magnéticos en función del espesor.

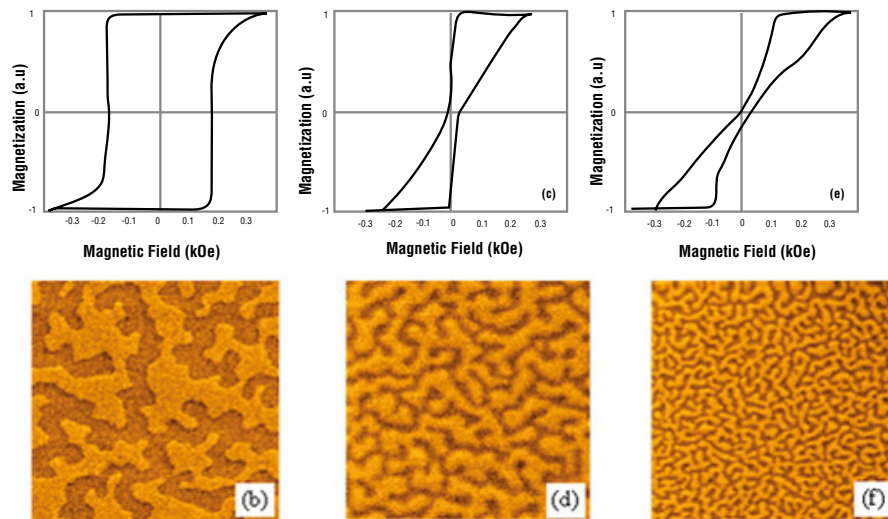


Figura 8. Ciclo de histéresis e imágenes de MFM de películas de Co-Pt de $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ con espesores de 0,5 nm (a, b), 1 nm (c, d) y 1,3 nm (e, f).

Fuente: Ermolaeva *et al.* (2017).

Los ciclos de histéresis permiten ver cómo la nanoestructuración afecta fuertemente la coercitividad magnética de la película. El ciclo de histéresis de la película de 0,5 nm (figura 8a) muestra una curva típica rectangular con la magnetización remanente igual a la magnetización de saturación, con un campo coercitivo de aproximadamente 20 mT. La imagen de MFM muestra claramente los dominios magnéticos de la película.

Con cada capa adicional de Co (figura 8b y 8d), se modifica la topografía de la muestra original, su curva de histéresis y, particularmente, sus dominios magnéticos, como evidencian las imágenes de MFM. La curva de histéresis reduce su área interior, lo cual implica que requiere menor campo coercitivo para retornar al estado inicial. Se observa que la deposición de una película delgada de Co cambia sustancialmente los dominios magnéticos, lo que puede tener importantes aplicaciones en almacenamiento de datos.

2.3.3 Aplicación de MFM en interacción bio-nano

Otra de las aplicaciones importantes del MFM es el estudio de materiales magnéticos nanoestructurados con entornos biológicos. En una investigación desarrollada por investigadores del Clúster NBIC de la Universidad Central (Vásquez *et al.*, 2020) fue posible distinguir nanopartículas biosintetizadas por comunidades bacterianas gracias a la microscopía de fuerza magnética (figura 9).

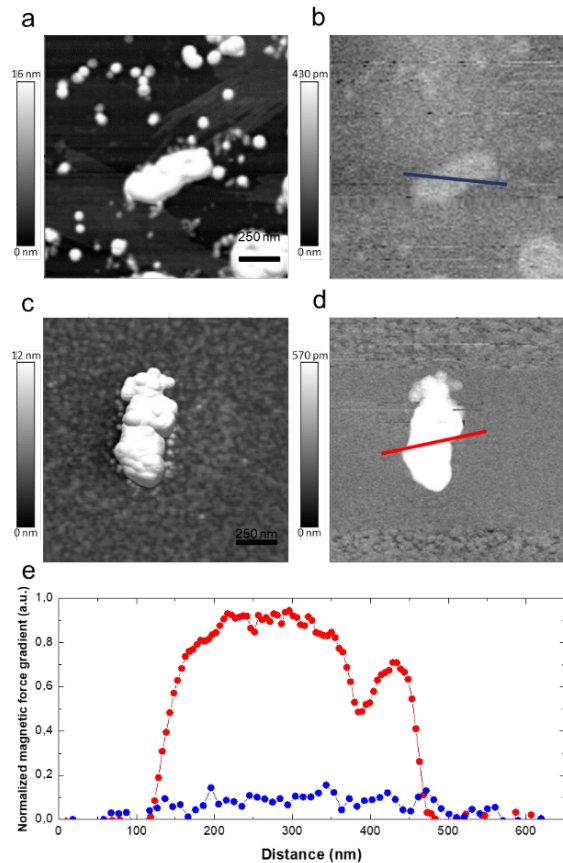


Figura 9. Imágenes de MFM de nanopartículas en interacción con bacterias.

Fuente: Vásquez *et al.* (2020).

En el trabajo, los investigadores de la Universidad Central estudiaron comunidades bacterianas que realizan procesos de biorremediación en aguas contaminadas por minas de carbón, en combinación con nanopartículas de hierro cero valente, las cuales son agregadas con la finalidad de contribuir en los procesos de remediación gracias a sus propiedades óxido-reductoras. Al final del proceso de remediación, los investigadores encontraron dos tipos de nanopartículas cerca de las bacterias, unas sin respuesta magnética (figura 9a-b), biosintetizadas por las bacterias, y otras con alta respuesta magnética (figura 9c-d), correspondientes a las nanopartículas de hierro cero valente agregadas al sistema. De esta forma, el MFM permitió descubrir que uno de los procesos de biorremediación que realizan las bacterias consiste en la biosíntesis de nanopartículas usando algunos de los metales presentes en el agua contaminada.

3. Conclusiones

El acceso y uso adecuado de las herramientas experimentales propias de la nanotecnología son fundamentales para el avance de la ciencia de materiales y su integración a sistemas biológicos. La microscopía de fuerza atómica es una técnica versátil, con un gran desarrollo en los últimos años, que constituye una herramienta fundamental de la nanotecnología. Sus diferentes modos dan acceso a diferentes propiedades físicas difíciles de estudiar con otras técnicas experimentales. La microscopía de fuerza magnética proporciona información única de la materia, que permite integrarla a sistemas biológicos con un bajo impacto sobre estos. El estudio y entendimiento de las propiedades magnéticas en la nanoescala abren grandes posibilidades de aplicaciones que buscan mejorar diferentes aspectos del bienestar de la humanidad.

Agradecimientos

Agradecemos al Clúster de Investigación en Ciencias y Tecnologías Convergentes (NBIC), al programa de Maestría en Bioingeniería y Nanotecnología, a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas y a la Vicerrectoría Académica de la Universidad Central por ofrecernos los espacios y herramientas adecuadas que dieron origen a este trabajo.

Referencias

- Bowen, R., W., & Hilal, N. (2009). *Atomic force microscopy in process engineering: an introduction to AFM for improved processes and products*. Butterworth-Heinemann Press.
- Duerig, U. (2000). *Lett. Appl. Phys.*, 76, 1203. <https://doi.org/10.1063/1.125983>
- Eaton, P., & West, P. (2010). *Atomic force microscopy*. Oxford University Press.
- Encyclopedia Britannica. (2018). Ferrimagnetism. <https://www.britannica.com/science/ferrimagnetism>
- Ermolaeva, O., Gusev, N., Skorohodov, E., Petrov, Y., Sapozhnikov, M., & Mironov, V. (2017). Magnetic force microscopy of nanostructured co/pt multilayer films with perpendicular magnetization. *Materials*, 10(9), 1034. <https://doi.org/10.3390/ma10091034>
- Kittel, C. (2004). *Introduction to Solid State Physics* (8th ed.). Wiley.
- Kudr, J., Haddad, Y., Richtera, L., Heger, Z., Cernak, M., Adam, V., & Zitka, O. (2017). Magnetic nanoparticles: from design and synthesis to real world applications. *Nanomaterials*, 7(9), 243. <https://doi.org/10.3390/nano7090243>
- Loos, J. (2005). The art of SPM: scanning probe microscopy in materials science. *Adv. Mater.*, 17, 1821-1833.
- Pérez-Alcázar, G. A. (2016). Imanes permanentes: características, aplicaciones y futuro. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(155), 221-233. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.361>

- Rodzinski, A., Guduru, R., Liang, P., Hadjikhani, A., Stewart, T., Stimpf, E., & Khizroev, S. (2016). Targeted and controlled anticancer drug delivery and release with magnetoelectric nanoparticles. *Scientific Reports*, 6(1), 20867.
- Team Nanotec. (s. f.). *Micro- and nanofabrication technology*. <https://www.team-nanotec.de/>
- Vásquez, Y., Galvis, J., Pazos, J., & Herrera, O. (2020). Remediation of acid mine drainage using Zero-valent iron nanoparticles in biochemical passive reactors: Batch experiments. Artículo sometido.

Obtención de tintas conductoras a base de grafeno por medio de exfoliación electroquímica

Obtaining graphene-based conductive inks by electrochemical exfoliation

Johan Rubio^{*}, Camilo Ospina^{**}, Luis Carvajal^{***} y Mikel Hurtado^{****}

Cómo citar:

Rubio, J., Ospina, C., Carvajal, L., & Hurtado, M. (2019). Obtención de tintas conductoras a base de grafeno por medio de exfoliación electroquímica. *Ingeciencia*, 4, 21-36.

- * Ingeniero electrónico, línea de profundización en Estado Sólido y Nanotecnología. Departamento de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central. Correo: jrubi2@ucentral.edu.co
- ** Ingeniero electrónico, línea de profundización en Estado Sólido y Nanotecnología. Departamento de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central. Correo: cospinao@ucentral.edu.co
- *** Ingeniero electrónico, MSc. en Bioingeniería y PhD. en Ingeniería Biomédica. Integrante del grupo de investigación Bioingeniería, Nanotecnología y Comunicaciones (SPIN). Profesor asistente del Departamento de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central. Correo: lcarvajal1@ucentral.edu.co
- **** Químico, MSc. en Chemical Thermodynamics, MSc. en Materials Science and Nanotechnology, PhD. en Solid State Chemistry. PostDoc. en Nanomaterials. Investigador senior reconocido por MinCiencias. Integrante de los grupos de investigación Bioingeniería, Nanotecnología y Comunicaciones (SPIN) y Maxwell. Profesor asociado del Departamento de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central. Correo: hurtadom1@ucentral.edu.co

Resumen

El artículo se basa en el trabajo de tesis titulado “Desarrollo de tintas conductoras a base de grafeno y MoS₂ para impresoras Inkjet”. Específicamente, se estudian los nanomateriales a base de carbono que se emplean en la obtención del grafeno por medio de la exfoliación electroquímica en condiciones de atmósfera abierta, para utilizarlo como agente activo en el diseño de tintas con propiedades eléctricamente conductoras y de alta flexibilidad mecánica. Con este propósito, en el marco del trabajo de tesis se desarrollaron protocolos de fabricación en condiciones normales, en donde se obtuvieron 330 g de grafeno y posteriormente 990 ml de tintas conductoras, las cuales presentaron características de conducción eléctrica en el orden de 8 Ω/cm^2 . Además, se evidenció que las tintas son estables en función del tiempo y sus características fisicoquímicas no son afectadas cuando se exponen a temperaturas en el rango de 10 a 70° C. Los resultados representan un avance significativo en la línea de profundización en nanotecnología del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Central, ya que actualmente en el mercado las tintas con estas propiedades tienen precios considerablemente altos y son de baja calidad en términos de sus propiedades físicas eléctricas y mecánicas.

Palabras clave: electrónica flexible, grafeno, nanotecnología, tinta conductora de electricidad, tintas inteligentes.

Abstract

The article is based on the thesis work entitled “Development of graphene-based conductive inks and MoS₂ for inkjet printers”. Specifically, the carbon-based nanomaterials used to obtain graphene by means of electrochemical exfoliation under open atmosphere conditions are studied, for use as an active agent in the design of inks with electrically conductive properties and high mechanical flexibility. For this purpose, in the framework of the thesis work, manufacturing protocols were developed under normal conditions, in which 330 g of graphene and 990 ml of conductive inks were obtained, which had electrical conduction characteristics in the order of 8 Ω/cm^2 . In addition, it was shown that inks are stable as a function of time and their physico-chemical characteristics are not affected when exposed to temperatures in the range of 10 to 70° C. The results represent a significant advance in the line of deepening in nanotechnology of the Department of Electronic Engineering of the Universidad Central, because currently in the market the inks with these properties have considerably high prices and are of low quality in terms of their electrical and mechanical physical properties.

Keywords: electrically conductive ink, flexible electronics, graphene, nanotechnology, smart inks.

1. Introducción

El grafeno fue observado en 2004 por los físicos Andre K. Geim y Konstantin S. Novoselov, al pegar un fragmento de cinta adhesiva sobre la superficie de un bloque de carbón grafito y retirarlo de forma manual. Sin embargo, solo hasta el año 2010 el grafeno comenzó a generar interés en el resto de los científicos cuando sus descubridores recibieron el Premio Nobel de Física (González, 2017). Desde que fue identificado, el grafeno ha sido considerado el material del futuro porque posee características de flexibilidad, alta conductividad eléctrica y térmica. No obstante, uno de los retos más importantes para utilizar este material son los métodos de obtención, entre los cuales se destacan los procesos de deposición química de vapor, método de descarga de arco, reducción química, exfoliación micromecánica y reducción térmica (Fariás *et al.*, 2017). Estos procesos tienen en común que obtienen el grafeno en ambientes controlados, es decir en algunos casos es necesario exponer el material a condiciones de alto o ultraalto vacío, lo cual implica un alto costo de operación y procesos poco amigables con el medio ambiente.

El proyecto de tesis titulado “Desarrollo de tintas conductoras a base de grafeno y MoS₂ para impresoras Inkjet” se enfocó en obtener grafeno por medio de la exfoliación electroquímica realizado en atmósfera abierta para obtener tintas con características de conducción eléctrica, las cuales ofrecen alternativas en el área de la ingeniería, principalmente en el desarrollo de tecnologías livianas, transparentes y de alta flexibilidad mecánica. Además, las tintas que se presentan en este artículo pueden ser empleadas en otros campos, como en la fabricación de biosensores, donde el grafeno ha sido utilizado en la detección de biomoléculas para diagnosticar enfermedades y tratarlas (Yang *et al.*, 2013).

2. Marco teórico

2.1 Grafeno

Con un grosor de apenas un átomo de carbono, constituye el material bidimensional por excelencia. Es, de hecho, un cristal bidimensional, que presenta un ordenamiento atómico muy bien definido y que puede presentar cierta rugosidad superficial dependiendo del método de síntesis que se emplee para obtenerlo. Debido a su extremada delgadez, el grafeno es altamente transparente en la región del espectro visible y muy flexible, además tiene excepcionales propiedades térmicas, electrónicas, ópticas y mecánicas. Entre sus características más interesantes resaltan su elasticidad y resistencia mecánica, ya que puede deformarse elásticamente hasta el 10 % de su longitud, de modo que si el grafeno genera procesos de conformación mecánica sobre superficies de alta dureza sin que sus enlaces de carbono sufran rupturas, razón de su alta resistencia mecánica. Una lámina de grafeno de un metro cuadrado tiene una masa de 0,77 miligramos, lo que, en comparación con el acero (con la misma superficie), supondría una masa doscientas veces menor. Sin embargo, a pesar de su flexibilidad, el grafeno es un material cien veces más fuerte y resistente que el acero estructural con su mismo espesor. Es altamente rígido, de manera que soporta grandes fuerzas sin apenas deformarse. Tiene una resistencia mecánica de 42 N/m (tensión de rotura), mientras que una lámina del acero más resistente y del mismo espesor que el grafeno tendría aproximadamente una resistencia de 0,40 N/m (Martínez, 2015).

Adicionalmente, el grafeno tiene una estructura electrónica que le permite conducir electrones a temperatura ambiente más rápido que ningún otro material (Barros, 2010).

Las tintas conductoras se utilizan en la industria de la electrónica impresa para producir circuitos, diodos emisores de luz orgánicos, Radio Frequency Identification (RFID) y demás. Entre sus principales ventajas se encuentran la flexibilidad, el diseño liviano y los bajos costos de fabricación, ya que se trata de un componente conductor que se puede basar en un elemento metálico o en polímeros conductores de carbono. Sin embargo, cuando se usan tintas conductoras se enfrenta el desafío de conseguir mayor uniformidad en la aplicación, así como lograr una compatibilidad con varios sustratos sin afectar sus propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas (Méndez-Rossal & Wallner, 2019).

2.2 Obtención

Uno de los principales problemas que tienen los investigadores es llevar la producción de grafeno a escala industrial para fabricar las tintas. Hasta este momento, los métodos de obtención se limitan a entornos de laboratorio de investigación, aunque se espera que en un corto plazo la producción se promueva a escala industrial gracias a los estudios e investigaciones, de tal manera que sea una realidad encontrarlo en múltiples aplicaciones cotidianas. A continuación, se presentan los métodos para obtener el grafeno que se emplean actualmente.

2.2.1 Exfoliación micromecánica

El grafeno en estado libre fue obtenido por vez primera en 2004 mediante este método. La exfoliación micromecánica (Revoredo, 2018) es una técnica sencilla, en la cual es necesario contar con una superficie limpia de grafito. Este grafito está constituido por varias láminas superpuestas de grafeno débilmente unidas y que se pueden separar en láminas delgadas exfoliadas mediante este método (figura 1).

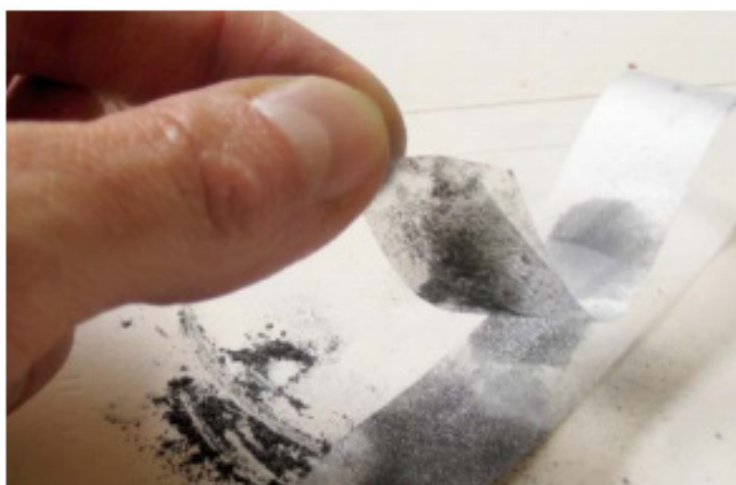


Figura 1. Grafeno obtenido por el método de exfoliación micromecánica.

Fuente: Rodríguez *et al.* (2015).

Este método consiste en someter el grafito a un raspado fino y luego extraer hojuelas extremadamente delgadas delaminando repetidamente el grafito con una cinta adhesiva. Para identificar las láminas de grafeno se utiliza espectroscopía óptica UV-vis, FT-IR y Raman, además de microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía de transmisión electrónica (TEM) y microscopía de fuerza atómica (AFM). Aunque este método de exfoliación micromecánico se puede catalogar como rudimentario, se está escalando a nivel industrial mediante técnicas de transferencia de láminas delgadas tipo *roll to roll* (Revoredo, 2018).

2.2.2 Síntesis por método químico

Los métodos químicos para producir grafeno consisten en la exfoliación de cristales de grafito en solución usando oxidantes fuertes en medio ácido, para lo cual se siguen tres pasos: oxidación de grafito, exfoliación de óxido de grafito a óxido de grafeno y la reducción de óxido de grafeno (figura 2). Los métodos químicos tienen especial atención hoy en día debido a que son procesos alternativos y económicos para obtener grafeno, además de la interesante química de intercalación que desarrollan, la cual proporciona mayores oportunidades de obtener materiales híbridos (Martínez, 2015).

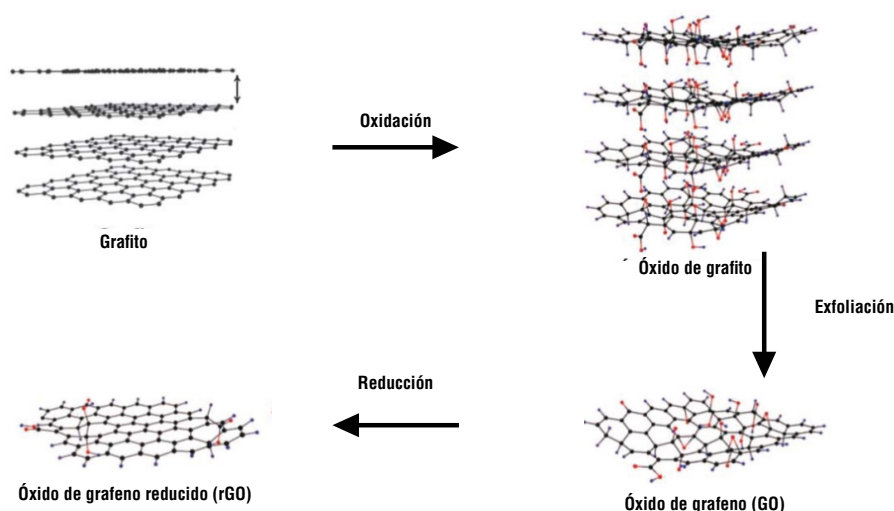


Figura 2. Sistema de obtención de grafeno por método químico.
Fuente: Farias *et al.* (2017).

2.3 Aplicaciones del grafeno

A continuación, se describen algunas de las múltiples aplicaciones de este tipo de tintas conductoras basadas en materiales nanoestructurados como el grafeno.

2.3.1 Biosensores

El grafeno se ha empleado para construir biosensores que permiten detectar antígenos y anticuerpos (figura 3), así como identificar biomoléculas como glucosa, dopamina, proteínas y ADN, las cuales son indispensables en los procesos moleculares de los seres vivos. Esta aplicación es posible gracias a que el grafeno es muy sensible y tiene una rápida respuesta en tiempo real cuando interactúa con las biomoléculas. Adicionalmente, es uno de los materiales más ampliamente investigados para aplicarlo como electrodo transparente en dispositivos electrónicos de nueva generación (Yang *et al.*, 2013).

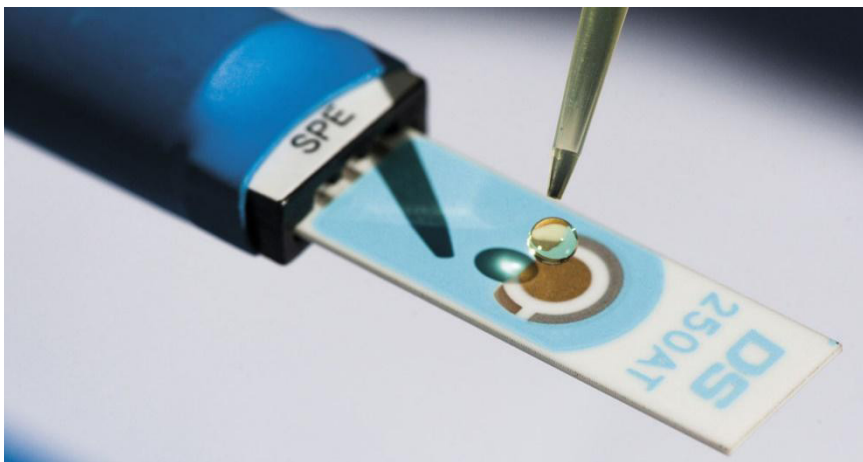


Figura 3. Electrodo usado en la concepción de dispositivos para detectar antígenos y anticuerpos. Fuente: Oliveira (2017).

2.3.2 Bioimágenes

El óxido de grafeno ha arrojado resultados positivos cuando se introducen moléculas fluorescentes a su estructura, lo cual ha permitido obtener información mediante imágenes térmicas *in vivo* de un modelo de ratón con cáncer de mama. Esta técnica de imagen se basa en la emisión de positrones (Foo & Gopinath, 2017).

El uso de estos biomarcadores es de vital importancia porque, al igual que los biosensores, sirven para diagnosticar enfermedades (Foo & Gopinath, 2017). El grafeno, el óxido de grafeno y el óxido de grafeno reducido están siendo usados por investigadores en la terapia fototérmica, ya que por ser un método no invasivo y controlado mediante la irradiación láser, genera una cantidad de calor considerable. En comparación con el grafeno y el óxido de grafeno, el óxido de grafeno reducido no solo presenta una alta eficiencia de conversión fototérmica —tiene una estabilidad térmica superior—, sino que además presenta la ventaja de que su superficie es modificable, lo cual permite realizar procesos exitosos de eliminación tumoral (figura 4) (Song *et al.*, 2020).

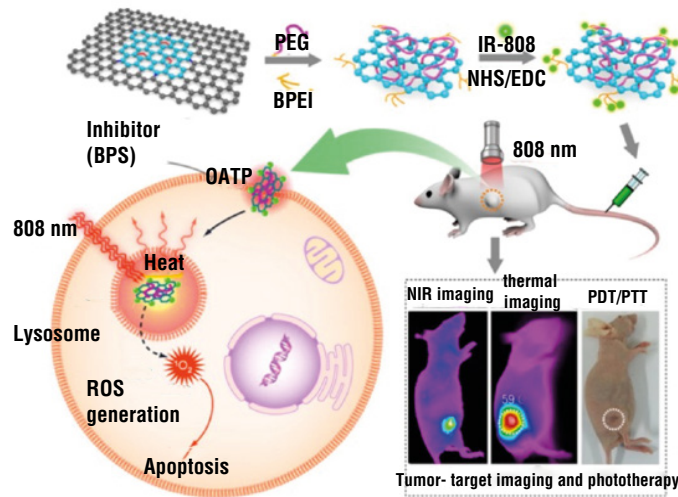


Figura 4. Ilustración esquemática de la preparación y la implementación de fototerapia sinérgica del cáncer.
Fuente: Song *et al.* (2020).

2.3.3 Suministro de drogas

La superficie del grafeno representa una ventaja para el suministro de drogas que lo convierte en un gran portador de fármacos en ambos lados de la hoja (figura 5). Se ha utilizado en el transporte de medicamentos anticancerosos dirigidos a estas células cancerígenas con el fin de no afectar ni destruir las células que están sanas (Foo & Gopinath, 2017).

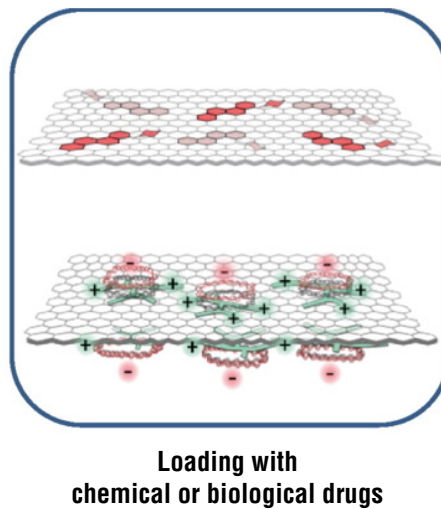


Figura 5. Método de transporte para fármacos y proteínas.
Fuente: Shim *et al.* (2016).

Se ha demostrado que, además de fármacos, el grafeno tiene una capacidad muy alta para cargar y transportar proteínas por medio de la fisorción en comparación con otros portadores. Cabe anotar que el éxito del transporte de la proteína siempre está primero en el estudio detallado de la proteína y en modificar su superficie para que puedan ser adaptados en la hoja de grafeno (Shim *et al.*, 2016).

2.3.4 Células madre

Otra de las aplicaciones del grafeno en la biomedicina es la estimulación y crecimiento de tejidos, en donde es necesario tener en cuenta la organización celular, su morfología, las propiedades eléctricas, el ambiente circundante, entre otros aspectos. Para trabajar con las células madre, se debe conocer qué factores intervienen en el proceso de generación de las señales bioquímicas. En este caso, el grafeno puede promover la unión de estas células madre, ya sean neurales, embrionarias, mesenquimales, etc. (Foo & Gopinath, 2017).

Los hallazgos investigativos en medicina regenerativa, curaciones de heridas e ingeniería de tejidos usando como base hidrogeles (figura 6) evidencian que estos materiales tienen propiedades viscoelásticas y de transporte, las cuales imitan los tejidos naturales. Las propiedades mecánicas del grafeno (alta elasticidad, resistencia y flexibilidad) y su capacidad de adaptar diversas funcionalidades en superficies planas han llevado a que sea utilizado como capa *buffer* para esta aplicación de ingeniería de tejidos (Sumit, 2014).

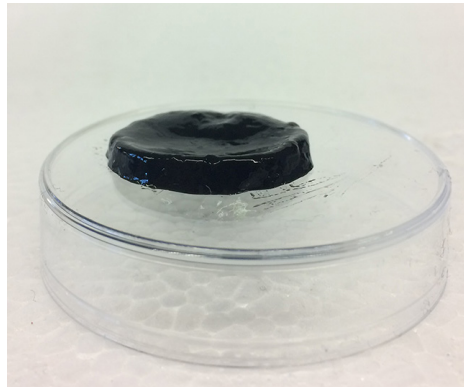


Figura 6. Hidrogel de almidón y grafeno dirigido a electrodos de implantes cerebrales.

Fuente: CicNetwork (2015).

3. Protocolo utilizado

El proceso de fabricación de las tintas en el proyecto de tesis se desarrolló en los laboratorios de nanotecnología de la Universidad Central con las condiciones que se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Condiciones ambientales en la fabricación de las tintas y dimensiones de grafito

Número de lote	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Dimensiones de las láminas de grafito (cm)
1 J	12	65	2 x 2
2 C	17	66	2 x 3
3 M	14	68	2 x 4
4 J-C	20	64	2 x 5
5 J-C-M	23	68	2 x 6
6 C-M	23	70	2 x 7
7 J-M	18	67	2 x 8
8 M-C-J	17	66	2 x 8
9 C-J	14	65	2 x 8
10 M-C-J	13	66	2 x 8

Fuente: elaboración propia.

1. A partir de una lámina de grafito, que varió de longitud (desde 2x2 cm hasta 2x8 cm) según el número de lote, se realizó la exfoliación electroquímica de láminas de grafeno en un medio ácido utilizando un electrodo de platino (figura 7).

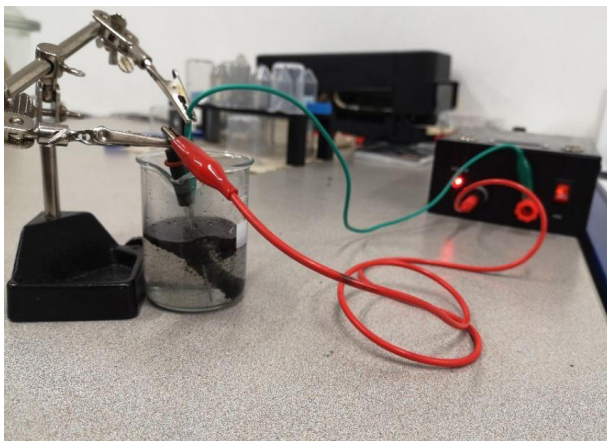


Figura 7. Sistema de exfoliación electroquímica de grafeno.

Fuente: elaboración propia.

2. La solución resultante se sometió al proceso de sonicación por un tiempo aproximado de 60 minutos en modo continuo (figura 8).

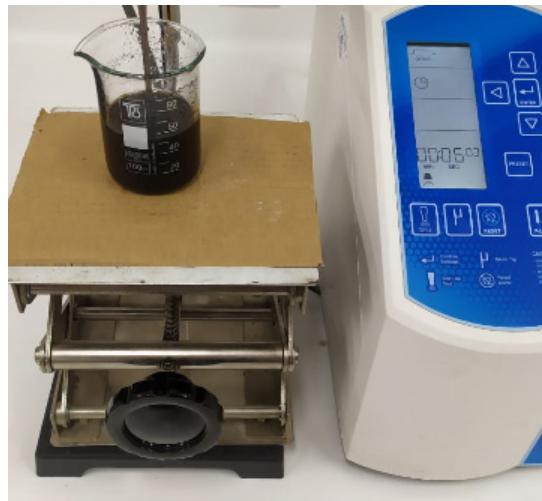


Figura 8. Sonicación de tinta.

Fuente: elaboración propia.

3. Con el fin de retirar el ácido de la tinta, se filtró mediante un filtro de papel cualitativo, haciendo una serie de lavados progresivos con agua destilada y dejando en el filtro el material exfoliado electroquímicamente (figura 9).



Figura 9. Filtrado de tinta.

Fuente: elaboración propia.

4. Luego de un tiempo de secado de 24 horas, se retiró el material resultante, el cual se mezcló con un solvente neutro en pH y de secado rápido (figura 10).

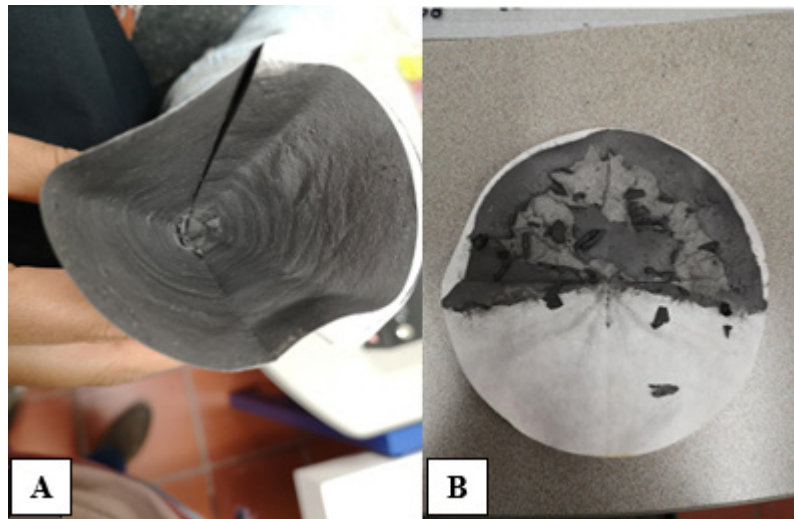


Figura 10. Material de carbono exfoliado después de eliminar el medio ácido y filtrado. (a) Grafeno en forma de hoja. (b) Grafeno en forma de grumos.
Fuente: elaboración propia.

5. La tinta con solvente neutro (agua filtrada) fue centrifugada y, posteriormente, se separó la tinta sobrenadante de los residuos que se depositaron en el fondo y en las paredes del recipiente (figura 11) con el fin de obtener una mezcla homogénea y estable.



Figura 11. Tinta centrifugada y homogénea.
Fuente: elaboración propia.

4. Resultados

En este apartado se presentan los resultados de mayor relevancia del proyecto de tesis. A continuación, la tabla 2 sintetiza los resultados de las pruebas de continuidad eléctrica que se realizaron con la tinta obtenida.

Tabla 2. Comparación de resistencia de tintas en función de la distancia

Número de lote	Resistencia (Ω)	Distancia (cm)	Resistencia (Ω)	Distancia (cm)	Resistencia (Ω)	Distancia (cm)	Resistencia (Ω)	Distancia (cm)
1 J	5000	3	11000	8	100000	10	250000	15
2 C	5000	3	9000	8	95000	10	127000	15
3 M	5000	3	6000	8	80000	10	95000	15
4 J-C	4500	3	5000	8	15500	10	50000	15
5 J-C-M	4000	3	2000	8	8000	10	10000	15
6 C-M	2000	3	200	8	4000	10	900	15
7 J-M	1000	3	150	8	500	10	700	15
8 M-C-J	700	3	30	8	300	10	500	15
9 C-J	500	3	15	8	100	10	300	15
10 M-C-J	450	3	5	8	40	10	90	15

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en las figuras 12 a 15, los valores de resistencia eléctrica son afectados directamente por las dimensiones de la lámina de grafito que es exfoliada al inicio del protocolo de fabricación. Los lotes de tintas nombrados como 7JM, 8MCJ, 9CJ y 10MCJ, al tener dimensiones de lámina de 2x8 cm, son los que menor resistencia ofrecen en función de las distancias, ya que la tinta posee mayor concentración de grafeno y sus propiedades se adhieren de forma más homogénea cuando son transferidas sobre el papel, que es un material rugoso.

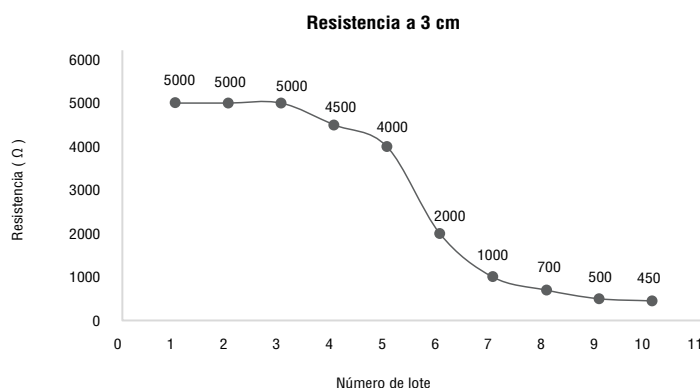


Figura 12. Comparación de las tintas de los lotes 1 a 10 a 3 cm de distancia.

Fuente: elaboración propia.

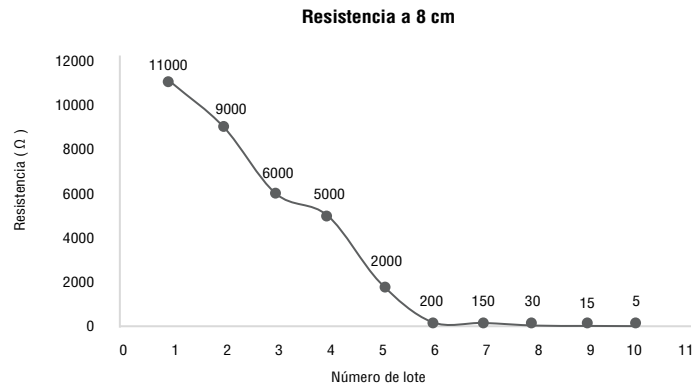


Figura 13. Comparación de las tintas de los lotes 1 a 10 a 8 cm de distancia.
Fuente: elaboración propia.

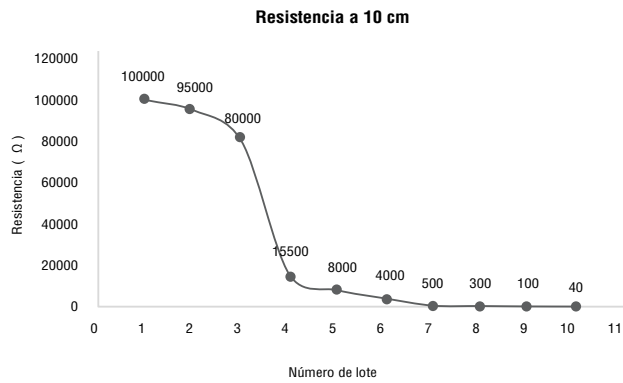


Figura 14. Comparación de las tintas de los lotes 1 a 10 a 10 cm de distancia.
Fuente: elaboración propia.

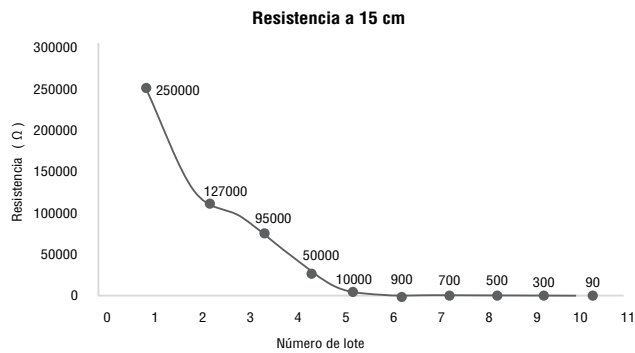


Figura 15. Comparación de las tintas de los lotes 1 a 10 a 15 cm de distancia.
Fuente: elaboración propia.

Para verificar la presencia de láminas de grafeno en la muestra se enfoca un rayo láser a través. Si se visualiza la dispersión de la luz a través de la fase líquida (figura 16a), se puede inferir que hay láminas 2D del proceso de exfoliación electroquímica que permiten la dispersión de la luz. En la figura 16b se observa la reflexión interna generada en el sistema de tinta a base de grafeno.

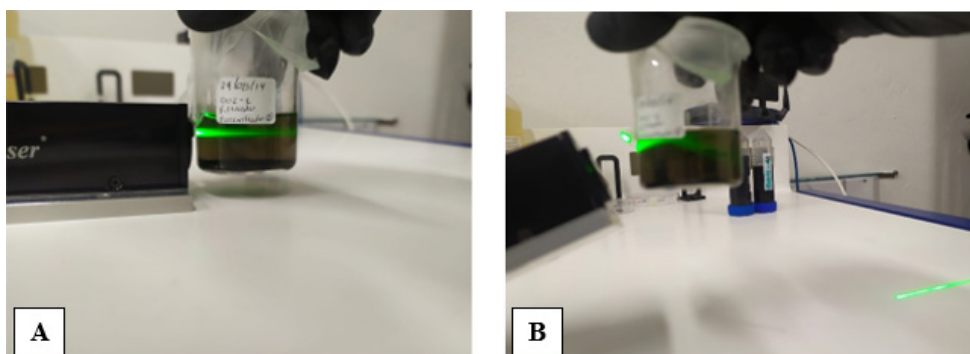


Figura 16. Pruebas de tinta de grafeno con láser (CrystaLaser CL532-005-L, longitud de onda 532 nm, potencia 5 mW). (a) Tinta de grafeno permitiendo la dispersión de luz a través de la tinta y (b) tinta de grafeno con reflexión interna.

Fuente: elaboración propia.

En la figura 17 se muestra la comparación de tres tipos de tintas fabricadas. De derecha a izquierda: (a) agua Mili-Q, (b) tinta lote 5JCM y (c) tinta lote 10MCJ. Se puede observar que el haz láser describe una trayectoria apreciable en el lote 005-C en comparación con las otras dos, efecto que permite inferir que posee una mayor cantidad de láminas de grafeno vs. el primer lote. El agua Mili-Q dispersa la luz láser en menor proporción debido a algunas impurezas remanentes.

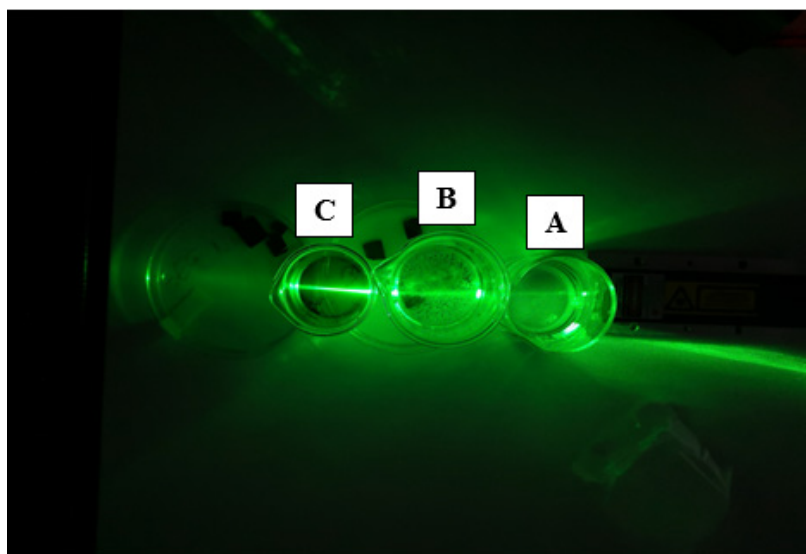


Figura 17. Comparación de fenómenos ópticos de dispersión de luz láser (CrystaLaser CL532-005-L, longitud de onda 532 nm, potencia 5 mW): (a) agua Mili-Q, (b) lote 001-J y (c) lote 005-C.

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

Se concluye que es posible extraer grafeno por la vía de exfoliación electroquímica en condiciones de atmósfera abierta, pero su producción es de baja proporción y en tiempos que varían de 30 a 36 horas. Vale la pena resaltar que los costos por gramo obtenido son mucho menores que los del mercado, que oscilan los cincuenta dólares.

La comparación de los fenómenos ópticos de dispersión de luz láser (figura 16) evidencia que existen nanopartículas en el medio dispersante, lo cual demuestra la efectividad de los cambios que se realizaron en cada preparación, mediante los cuales se trató de encontrar siempre una alta concentración y calidad de las láminas en el proceso de exfoliación.

Al realizar la impresión sobre sustratos flexibles como el papel, la tinta diseñada arrojó valores de resistencia eléctrica baja ($8 \Omega/\text{cm}^2$). Posteriormente, cuando se realizaron pruebas utilizando un led y una batería, se pudo observar que el comportamiento de esta tinta se asemeja al de los conductores eléctricos.

Agradecimientos

El proyecto de investigación y el presente artículo se llevó a cabo empleando todos los conocimientos adquiridos durante la profundización de Nanomateriales y Aplicaciones Modernas y Nanoelectrónica Transparente y Flexible, impartida en el programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Central, con la dirección del profesor Mikel Hurtado.

Referencias

- Barros, M. Á. (2011). *El grafeno: entre serendipia, cinta adhesiva y emigrantes*. Universidad de las Américas.
- CicNetwork. (2015). Desarrollan un hidrogel de almidón y grafeno dirigido a electrodos de implantes cerebrales.
- Fariás, L., Flores, J., Marines, L., & Sáenz, A. (2017). Grafeno, el material del futuro, síntesis y propiedades. *CienciAcierta*, 50. <http://www.cienciacierta.uadec.mx/articulos/cc50/grafeno.pdf>
- Foo, M. E., & Gopinath, S. (2017). Feasibility of graphene in biomedical applications. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 94, 354–361. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2017.07.122>
- González Iglesias, M. A. (2017). *Grafeno, innovación, derecho y economía*. J. B Bosh.
- Martínez, R. (2015). *Funcionalización del óxido de grafeno con nanopartículas de paladio y sus aplicaciones en la detección de hidrógeno* [tesis de doctorado, Instituto Potosino de Investigación]. Repositorio Institucional Instituto Potosino de Investigación. <https://bit.ly/3uvyGwS>
- Méndez-Rossal, H., & Wallner, G. M. (2019). Printability and properties of conductive inks on primer-coated surfaces. *International Journal of Polymer Science*, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2019/3874181>

- Oliveira Andrade, R. d. (2017). Biosensores en la medicina. *Pesquisa*, 258. <https://revistapesquisa.fapesp.br/es/biosensores-en-medicina/>
- Revoredo, T. G., & Pachamango Bautista, T. G. (2018). Propiedades del grafeno y sus aplicaciones en el campo energético. *Campus*, 23(26), 187-198
- Rodríguez, C., Quemada, M., Ruiz, G., Vega, S., & Alcaraz, L. (2015). Prototipo de laminadora de películas de óxido de grafeno. *Pistas Educativas*, 113. <https://bit.ly/2R8c57v>
- Shim, G., Kim, M., Park, J., & Oh, Y. (2016). Graphene-based nanosheets for delivery of chemotherapeutics and biological drugs. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 105 Pt B, 205-227. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.04.004>
- Song, S., Shen, H., Wang, Y., Chu, X., Xie, J., Zhou, N., & Shen, J. (2020). Biomedical application of graphene: from drug delivery, tumor therapy, to theranostics, colloids and surfaces B. *Biointerfaces*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.110596>
- Sumit Goenka, V. S. (2014). Graphene-based nanomaterials for drug delivery and tissue engineering. *Journal of Controlled Release*, 173, 75-88.
- Yang, Y., Asiri, A. M., Tang, Z., Du, D., & Lin, Y. (2013). Graphene based materials for biomedical applications. *Materials Today*, 16(10), 365-373. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.09.004>

Reactores bioquímicos pasivos enmendados con nanopartículas de hierro cero valente para tratamiento de drenajes ácidos de mina

Passive biochemical reactors amended with zero valent iron nanoparticles for acid mine drainage treatment

Camila Andrea Vera Díaz* y Yaneth Vásquez Ochoa**

Cómo citar:

Vera Díaz, C. A., & Vásquez Ochoa, Y. (2019). Reactores bioquímicos pasivos enmendados con nanopartículas de hierro cero valente para tratamiento de drenajes ácidos de mina. *Ingeciencia*, 4, 37-54.

* Ingeniera ambiental. Estudiante de la maestría en Bioingeniería y Nanotecnología. Joven investigadora y asistente graduada de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central. Correo: cverad1@ucentral.edu.co

** Licenciada en Química y Biología de la Universidad Libre de Colombia. Ms.C. en Ciencias Biológicas y Ph.D. en Ciencias Biológicas de la Pontificia Universidad Javeriana. Profesora asociada de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central. Correo: ovasquezo@ucentral.edu.co

Resumen

Los drenajes ácidos de mina (DAM) son vertimientos con bajo pH, alta concentración de metales y sulfato. El DAM puede contaminar el suelo y los cuerpos de agua por largos periodos incluso si cesaron las actividades mineras, por lo cual su tratamiento es un tema prioritario. En este estudio, se evaluó la eficiencia del tamaño (~100 y ~25 nm) y la concentración (5,0, 2,5 y 1,0% p/p) de nanopartículas de hierro cero valente (nZVI) como enmienda en la mezcla reactiva de reactores bioquímicos pasivos (RBP) con el fin de incrementar el pH y remover metales y sulfatos. Se construyeron catorce RBP por duplicado, seis de ellos contenían 125 g de mezcla reactiva, DAM y nZVI, mientras que los seis restantes contenían DAM y nZVI. Dos se usaron como controles: uno con solo mezcla reactiva y otro con solo DAM. Los reactores se mantuvieron en condiciones anaerobias y fueron evaluados semanalmente durante cinco semanas. Los resultados demuestran que en los reactores con mezcla reactiva aumentó el pH y la alcalinidad, mientras disminuía el potencial de óxido reducción (ORP), de manera que se lograron tasas de remoción de metales > 95% (Fe^{2+} , Zn^{2+} y Mn^{+2}) y de sulfato hasta 83%. En los reactores sin mezcla, el pH se mantuvo ácido y el ORP alto, lo cual dificultó la remoción de metales y sulfato, de modo que únicamente se logró la remoción de Zn^{2+} . Las nZVI mejoran significativamente la eficiencia del tratamiento con mezcla reactiva, sin embargo, es primordial realizar estudios más profundos sobre la toxicidad de las nanopartículas sobre la comunidad microbiana que participa en el proceso de biorremediación.

Palabras clave: actividad microbiana, eficiencia, inhibición microbiana, remoción de metales, sulfato reducción.

Abstract

The Acid mine drainage (AMD) are discharges characterized by low pH and high concentrations of sulfate and metals. The DAM can pollute soil and water ecosystems for long periods of time even if mining activities have stopped, therefore their treatment is a priority issue. In this study the size (~100 y ~25 nm) and concentration (5.0, 2.5 y 1.0% p/p with respect to reactive mixture) of zero valent-iron nanoparticles (nZVI) were evaluated as amendment in the reactive mixture of biochemical passive reactors (BPR) to increase pH and alkalinity, promote sulfate reduction, and metal removal. Fourteen BPR was built in duplicate; six of them contained 125 g of reactive mixture, DAM and nZVI, the remaining six contained DAM and nZVI. Two were used as controls; one with only reactive mixture and another with only DAM. The reactors were remained in anaerobic conditions and were evaluated weekly for 5 weeks. The results show that in the reactors with reactive mixture the pH and alkalinity increased while decreasing the redox potential (ORP), achieving removal rates of metals >95% (Fe^{2+} , Zn^{2+} y Mn^{+2}) and sulfate up to 83%. In the reactor without reactive mixture, the pH was acid and ORP high while the removal of sulfate and metals was low, only is possible removal of Zn^{2+} . The nZVI significantly improve the efficiency of the treatment with reactive mixture. However, it is essential to carryout studies on the toxicity of nanoparticles on the microbial community that participates in the bioremediation process.

Keywords: efficiency, metal removal, microbial activity, microbial inhibition, sulfate reduction.

1. Introducción

El drenaje ácido de mina (DAM) es el principal contaminante de los distritos mineros, caracterizado por un bajo pH (<4,5) y alto contenido de iones metálicos disueltos (Zn^{+2} , Fe^{+2} , Al^{+3} , Mn^{+2} , Pb^{+2} , Cd^{+2} , Cu^{+2}) y sulfatos (Adams *et al.*, 2014). El DAM contamina severamente los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, los degrada y disminuye su calidad. Además, causa la pérdida de vegetación y de fauna, lo cual ocasiona la pérdida del ecosistema y afecta la oferta hídrica de la región, que a su vez impacta a las comunidades aledañas a los cuerpos de agua que dependen de estas para abastecerse (Grande, 2016).

En Colombia, se ha detectado la generación de DAM en todas las áreas mineras, especialmente en la región carbonífera Zipa-Samacá, donde hay 525 minas activas, 27 inactivas y 47 abandonadas (Prieto & Duitama, 2004). De acuerdo con el estudio realizado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2010), el 55% de las minas realiza el tratamiento de DAM por adición de sustancias alcalinas, el 27% no realiza ningún tratamiento y el 18% no reporta información. Según estudios del Ministerio de Minas y Energía (2015), la explotación del carbón en la región ha afectado las cuencas hidrográficas en el Alto Meta y el río Sogamoso. Esta última, conformada por los ríos Chicamocha, Sogamoso y Suárez, es una gran fuente de agua para la región.

El DAM puede contaminar por largos periodos incluso si cesaron las actividades mineras, por lo cual su tratamiento se considera un tema prioritario. En la búsqueda de una posible solución se ha propuesto el uso de reactores bioquímicos pasivos (RBP), que son considerados una tecnología viable debido a su fácil operación y al uso de desechos agroindustriales para su montaje y funcionamiento. Los RBP son columnas o pozos empacados con una mezcla reactiva, conformada por sustratos orgánicos e inorgánicos que aportan nutrientes a los microorganismos responsables de la biorremediación (Vásquez, 2016). La eficiencia en remoción de metales y sulfatos de los RBP depende de la cuidadosa selección de los componentes de la mezcla reactiva, ya que estos determinan la disponibilidad de los nutrientes para la comunidad microbiana (Neculita *et al.*, 2011; Zagury *et al.*, 2006). Por lo general, los RBP operan con un tiempo de retención hidráulico (THR) de entre 2 y 4 días, un periodo muy extenso para el tratamiento de DAM donde las minas se encuentran en etapa extractiva.

En estudios previos se ha evaluado la eficiencia de mezclas reactivas que contienen partículas granulares de hierro cero valente (ZVI), las cuales han arrojado buenos resultados, pero evidencian poca longevidad debido al agotamiento de la superficie reactiva (Lindsay, 2008; Wilkin & McNeil, 2003). Sin embargo, este inconveniente podría superarse con el uso de nanopartículas de hierro cero valente (nZVI), debido a que su forma de cascarón con núcleo y su superficie específica con alto número de sitios activos favorecen el tratamiento de los contaminantes (Mukherjee *et al.*, 2016). Las propiedades físicas de las nZVI, tales como su comportamiento dual metal-óxido, las convierten en buenos candidatos en aplicaciones de biorremediación: su núcleo de hierro metálico es donador de electrones, así que le otorgan propiedades reductoras, mientras que el hidróxido de hierro de la superficie ofrece funciones coordinativas y electrostáticas que atraen los iones metálicos con carga positiva (Li *et al.*, 2016). Por tanto, las nZVI ofrecen dos nanocomponentes que permiten la eliminación simultánea de oxianiones (p. ej., As (V) y Cr (VI)) y de cationes (p. ej., Zn^{+2} , Al^{+3} , Pb^{+2} , Cd^{+2} , Cu^{+2}). Además, los productos finales de las reacciones de nanopartículas son óxidos e hidróxidos de hierro, los cuales son ambientalmente amigables (Guo *et al.*, 2016).

Las nZVI han sido previamente utilizadas en varios estudios para tratar agua contaminada con metales pesados, sin embargo, hay poca información sobre su uso para tratar el DAM. Calderón y Fullana (2015) reportaron que el empleo de nZVI para tratar agua contaminada de manera artificial con una mezcla de cinco metales (Zn^{+2} , Ni^{+2} , Cd^{+2} , Cr^{+6} y Cu^{+2}) produjo cambios en el pH y el potencial de óxido reducción (ORP), así como la reducción en la concentración de los metales. Por su parte, Klimkova *et al.* (2010) aplicaron por primera vez nZVI en el tratamiento de una muestra de agua subterránea contaminada con uranio en un área minera. Cuando agregaron las nZVI, el pH aumentó a valores cercanos a la neutralidad y el ORP disminuyó, lo cual se reflejó en la química del agua, pues la concentración de los metales disminuyó significativamente.

El principal inconveniente en el uso de nZVI es su potencial toxicidad para las comunidades microbianas (Kumar, 2013; Vangnai *et al.*, 2015). Se ha determinado que las nZVI pueden inhibir la actividad de las bacterias sulfato-reductoras (BSR), las cuales se encargan de reducir los sulfatos a sulfuros: en este proceso los metales se inmovilizan y se precipitan como sulfuros metálicos, que posteriormente pueden ser recuperados y aprovechados. No obstante, los estudios se han realizado en RBP que operan en fase líquida y que utilizan un solo donador de electrones (Kumar *et al.*, 2013; Saccá *et al.*, 2013; Saccá *et al.*, 2014). Específicamente, en este artículo se propone una mezcla reactiva compleja formada por residuos agroindustriales de la región que puede llegar a prevenir el daño que las nanopartículas provocan en los microorganismos.

En este sentido, los RBP enmendados con nZVI son una tecnología viable para mitigar los impactos de la minería, aunque no se cuenta con información acerca de su efecto sobre la eficiencia en el tratamiento ni sobre la comunidad microbiana participante. Si bien los RBP por sí solos permiten remediar el DAM y reducir sus impactos, esta investigación permite evaluar el efecto de las nZVI en la biorremediación del DAM del distrito minero Zipa-Samacá. Para cumplir este objetivo, se determina cómo el tamaño y la concentración de las nanopartículas afectan la eficiencia de los RBP para aumentar el pH y la alcalinidad, así como la remoción de sulfatos y metales del DAM. De esta manera, se ofrece una opción al gremio minero para incorporar procesos que contribuyan con el uso de tecnologías limpias durante la extracción del carbón que minimicen los impactos ambientales.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

En este estudio se utilizaron nZVI de dos clases: Nanofér y Nanousa con tamaños ~ 100 nm y ~ 25 nm, respectivamente. Las primeras nanopartículas fueron proporcionadas por la empresa Nanoiron, la cual indicó que su aplicación más común es la remediación de aguas subterráneas contaminadas por hidrocarburos clorados y metales pesados. Las segundas fueron compradas en US Research Nanomaterials, Inc.¹, donde indican que son cero-valente, tienen una pureza de 99,5%, son esféricas, tienen una densidad aproximada de $7,90$ g/cm³ y son estables en la superficie.

¹ Encuentre mayor información sobre las empresas en los siguientes enlaces: <http://nanoiron.cz/en/> y <https://www.us-nano.com/inc/sdetail/165>

El DAM se recolectó en la mina Incarsa, de la empresa Milpa S. A., ubicada en la vereda Loma Redonda del municipio de Samacá (Boyacá), y fue caracterizado en un estudio previo por Garzón *et al.* (2019). El DAM tenía la siguiente composición en mg L^{-1} : 1107,6 Fe^{2+} ; 185,0 Mn^{2+} ; 48,2 Zn^{2+} ; 209,6 Mg^{2+} ; 174,5 Ca^{2+} y 1833,9 SO_4^{2-} a pH 2,8 y ORP (mV) 455,5. In situ se determinó el pH y el potencial de óxido-reducción (ORP) con una sonda multiparamétrica (HI 9828, Hanna Instruments; Woonsocket, RI). Posteriormente, se recolectaron seis muestras (100 mL) en botellas de polipropileno: dos fueron preservadas con HNO_3 (pH 2,0) para cuantificación de metales, y cuatro sin preservantes. Todas las muestras fueron refrigeradas a 4° C hasta los análisis.

El inóculo microbiano fue extraído manualmente del embalse del Muña, ubicado en el municipio de Sibaté. Este inóculo proporcionó los microorganismos adaptados a ambientes contaminados con metales. El compost de champiñón se compró a la empresa Agrobachue Ltda., el estiércol bovino se obtuvo de una granja local y, finalmente, el aserrín de sajo, la gravilla y el carbonato de calcio se compraron en un almacén local.

2.2 Montaje de los RBP

La mezcla reactiva (MR) que se utilizó durante la puesta en marcha de los RBP estaba compuesta por 15% de estiércol bovino, 10% de compost de champiñón, 25% de aserrín, 15% de sedimento, 20% de gravilla y 15% de carbonato de calcio (Vásquez *et al.*, 2016a). La mezcla se preparó en peso húmedo y cada componente fue mezclado con los otros hasta obtener una pasta homogénea. Con el fin de corregir los porcentajes de cada componente, se determinó el porcentaje de humedad por diferencia de pesos antes y después de un calentamiento a 105° C durante 24 horas —método NCH 1515— (Instituto Nacional de Normalización [INN], 1979).

De esta forma, se construyeron catorce RBP en botellas de vidrio de 1L por duplicado. Cada uno contó con un sistema de extracción en la tapa conformado por dos puertos de muestreo (corchos, jeringas y tubos venturi): uno para suministrar N_2 mientras por el otro se realizaba la extracción de la muestra de efluente. En siete de los reactores se colocó 125 g de mezcla reactiva, y los restantes siete se mantuvieron vacíos; posteriormente, se adicionó 600 mL de DAM en todos los RBP. Una vez realizado lo anterior, en cada RBP se adicionaron las nZVI en diferente concentración y preparadas en medio acuoso según las recomendaciones de la empresa que las manufactura. Por último, los reactores fueron sellados y saturados con N_2 , se agitaron durante una hora para homogeneizar la mezcla reactiva, las nZVI con el DAM y se conservaron durante una semana a temperatura ambiente y en oscuridad en el Laboratorio de Biotecnología de la Universidad Central hasta obtener condiciones favorables para la sulfato-reducción.

Con el fin de evaluar el efecto de la nZVI sobre la eficiencia de los reactores, se consideró el tamaño de las nanopartículas (P:25 y G:100 nm) y la concentración (5,0, 2,5 y 1,0% p/p con respecto a la mezcla reactiva) como variables. Además, se montaron dos RBP como controles: uno con mezcla reactiva y el otro solo con DAM, pero ambos sin nZVI.

2.3 Evaluación del tamaño y la concentración de las nZVI sobre la eficiencia de los RBP

La eficiencia de un RBP se determina por el incremento del pH y la alcalinidad, así como por la remoción de metales y sulfato. Por tanto, una vez alcanzadas las condiciones para la sulfato-reducción ($\text{pH} > 5,0$ y $\text{ORP} < -100$ mV), se extrajeron 40 mL de cada reactor una vez a la semana durante cinco semanas para hacer los análisis fisicoquímicos. En cada muestra se determinó: (1) el pH y el ORP, con la sonda multiparamétrica; (2) la presencia de metales (Zn^{+2} , Fe^{+2} , Mg^{-2} , Mn^{+2} , Ca^{+2}), mediante espectrofotometría de absorción atómica por el método 7000B (Usepa, 2007); (3) los sulfatos, por el método 4500-SO₄, y los sulfuros, por el método 4500D —en el cual el azul de metileno es determinado por espectrofotometría UV-VIS (Genesys 10, Thermo Scientific; Waltham, MA)—, y (4) la alcalinidad, por el método 2320B (TitroLine alpha plus 20, Schott, Mainz, Alemania) (American Public Health Association [APHA], 2005). Por último, con el fin de determinar la distribución química de las especies presentes en el reactor, se realizó una modelación geoquímica por medio del software Minteq 3.0.

2.4 Efecto de las nZVI sobre la actividad microbiana

Después de cinco semanas, los RBP se desarmaron y se extrajo la mezcla reactiva, a la cual se le retiró manualmente la gravilla y se dejó secar al aire durante 24 horas. La actividad microbiana se determinó por medio de la enzima deshidrogenasa (DHS), siguiendo el método propuesto por Serra-Wittling *et al.* (1995).

2.5 Análisis estadístico

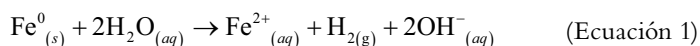
Inicialmente se determinó si los valores obtenidos para las variables cumplían los supuestos de homogeneidad de varianzas y de normalidad. Los valores que no cumplieron con los supuestos fueron transformados por medio de funciones matemáticas, como seno y coseno. Luego de esto se realizó un análisis Anova sobre las variables fisicoquímicas para encontrar diferencias significativas entre los factores y sus posibles combinaciones, seguido de una prueba post hoc (Tukey). El análisis estadístico se realizó con el software SPSS Statistics 19.

3. Resultados y discusión

3.1 Efecto de las nZVI en la eficiencia de los RBP

3.1.1 El pH, la alcalinidad y el ORP

Durante los ensayos, los reactores con mezcla reactiva alcanzaron valores de pH entre $8,3 \pm 0,2$ y $9,2 \pm 0,3$. Este incremento se debe a la disolución del carbonato de calcio de la mezcla reactiva, a la oxidación de las nanopartículas por el contacto con el agua (ecuación 1) y a la actividad de las BSR, las cuales generan bicarbonato mientras reducen el sulfuro. El análisis (Anova; $p < 0,05$) determina que ni el tamaño ni la concentración de las nZVI influyeron sobre el pH (figura 1).



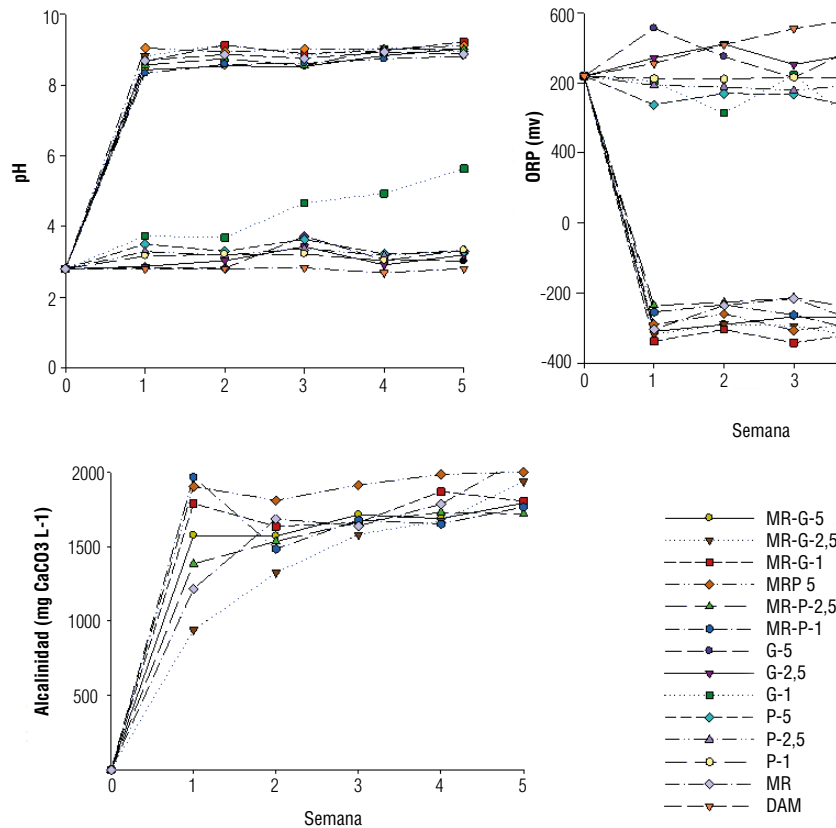


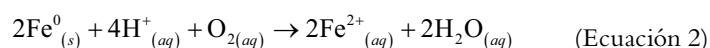
Figura 1. Cambios en el pH, la alcalinidad y el ORP durante la determinación del efecto de las nZVI sobre la eficiencia de los RBP.

Fuente: elaboración propia.

Asimismo, en los reactores que contenían solo DAM y nZVI se obtuvieron valores de pH entre $2,7 \pm 0,1$ y $5,6 \pm 0,2$. Las nZVI lograron un aumento de pH en los reactores: específicamente, el reactor con nZVI de ~ 100 nm al 1% (G1) fue el que presentó mayores valores de pH ($\sim 5,0$). Esto se debe a que la reacción del hierro (Fe) con el medio ácido provoca la oxidación anaeróbica de las nZVI y que es acompañada por la producción de OH^- , que aumentan el pH (ecuación 1) (Kumar *et al.*, 2013).

El pH es un parámetro determinante en el tratamiento del DAM en los RBP porque condiciona la comunidad microbiana, especialmente las BSR, que dependen de este factor para crecer. Estos microorganismos crecen mejor en condiciones alcalinas en rangos estrechos de pH entre 7,0-8,0, aunque toleran ambientes muy ácidos (pH $\sim 4,0$) y de igual forma se desarrollan en ambientes muy alcalinos (pH $\sim 9,5$) (Barton & Tomei, 1995); fuera de este intervalo de pH, las BSR pueden ser inhibidas en su totalidad. Vicente (2006) reporta que la mayor reducción de sulfato se produjo cuando el pH era cercano a la neutralidad (7,5), al disminuir el pH (6,0) la reducción del sulfato disminuía y al acidificar el medio (5,0) las concentraciones de sulfatos seguían estables sin ninguna variación, de lo cual se concluye que este comportamiento se puede atribuir a una inhibición del crecimiento bacteriano causado por la acidez del medio.

Además del pH, la comunidad microbiana y las BSR dependen de otros factores para desarrollarse, como el ORP. Las BSR son anaerobias estrictas y son sensibles a ambientes oxigenados: mueren fácilmente cuando son expuestas a este tipo de medios, por lo cual requieren de ausencia de oxígeno y un ORP bajo (-150 mV) para crecer (Barton & Tomei, 1995). El ORP condiciona las funciones enzimáticas de los microorganismos debido a que algunos de ellos realizan su actividad solamente en medios reductores y otros en medios oxidantes, y los valores negativos de ORP en el medio favorecen reacciones de reducción y los valores positivos favorecen las reacciones de oxidación (Martínez, 2008). En el caso de los reactores con mezcla reactiva se encontró, por un lado, que el ORP alcanzó valores negativos entre $-347,9 \pm 0,5$ y $-213,1 \pm 18,8$ mV, y, por el otro, que la disminución del ORP se dio rápidamente en la primera semana de tratamiento, disminución que se asocia con el tamaño de la partícula y su velocidad de oxidación (ecuación 1). La rápida oxidación del Fe es paralela al rápido consumo del oxígeno disuelto en el agua (ecuación 2), lo cual produce un cambio a condiciones reductoras en estos reactores (Calderón & Fullana, 2015) y, por lo tanto, permite la supervivencia de las BSR.



Por el contrario, en los reactores sin mezcla reactiva y en el control con DAM se registraron valores positivos de ORP entre $228,9 \pm 19,5$ y $545,4 \pm 0,1$ mV (figura 1). En los reactores con nZVI sin mezcla reactiva, los valores de ORP fueron menores que en el control de DAM, disminución que se produce por la rápida oxidación de la nanopartícula y la precipitación de hidróxidos (ecuación 2). En estos reactores no se contaba con la presencia de BSR, por lo cual la actividad microbiana no es el mecanismo de eliminación de contaminantes, sino que, en su lugar, la eliminación se realiza mediante una combinación de fenómenos como la adsorción de superficie, precipitación y coprecipitación con óxidos de hierro producto de la oxidación de la nZVI (Kumar *et al.*, 2013).

La alcalinidad incrementó en la primera semana de tratamiento en los RBP que contenían mezcla reactiva desde cero hasta $1999,3 \pm 19,5$ mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ (figura 1). Los RBP que contenían nZVI de menor tamaño (25 nm) en concentración al 5% (P5) fueron los que mayor alcalinidad registraron. El incremento en la alcalinidad se debe a la disolución del material alcalino presente en los reactores, a la corrosión anaeróbica de la nZVI —lo cual genera el incremento de grupos OH^- — y a la reducción de sulfato, ya que ambos procesos implican el consumo de H^+ (Ayala *et al.*, 2016). En estudios previos se plantea que el aumento de la alcalinidad se atribuye a la oxidación de sustratos orgánicos por la actividad de las BSR (Lindsay *et al.*, 2011). En los reactores sin mezcla reactiva no se determinó alcalinidad porque estos reactores presentaban valores de pH inferiores a 4,5, lo cual indica ausencia de iones carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos (Quicasán *et al.*, 2017).

3.1.2 Sulfatos y sulfuros

Los sulfatos presentaron una concentración inicial en el DAM de $1833,9 \pm 0,1$ mg L^{-1} y su concentración se redujo en todos los reactores, especialmente en los que contenían mezcla reactiva (figura 2). En estos reactores, la tasa más alta de eliminación de sulfato se presentó en el de control, con un porcentaje de remoción del 83%, mientras que en

los reactores restantes el porcentaje de remoción fue de >61%. El análisis estadístico (Anova; $p < 0,05$) evidencia que existe un efecto significativo tanto del tamaño como de la concentración de las nZVI, de lo cual se deduce que las nZVI pueden interferir en la sulfato-reducción. La reducción del sulfato en presencia de mezcla reactiva inicia cuando la partícula se oxida y produce H_2 , OH^- y Fe^{2+} (ecuación 1), posteriormente el sulfato es reducido a sulfuro mediante reacciones mediadas por BSR y forma precipitados de sulfuro de hierro (ecuación 3) (Miao *et al.*, 2012).

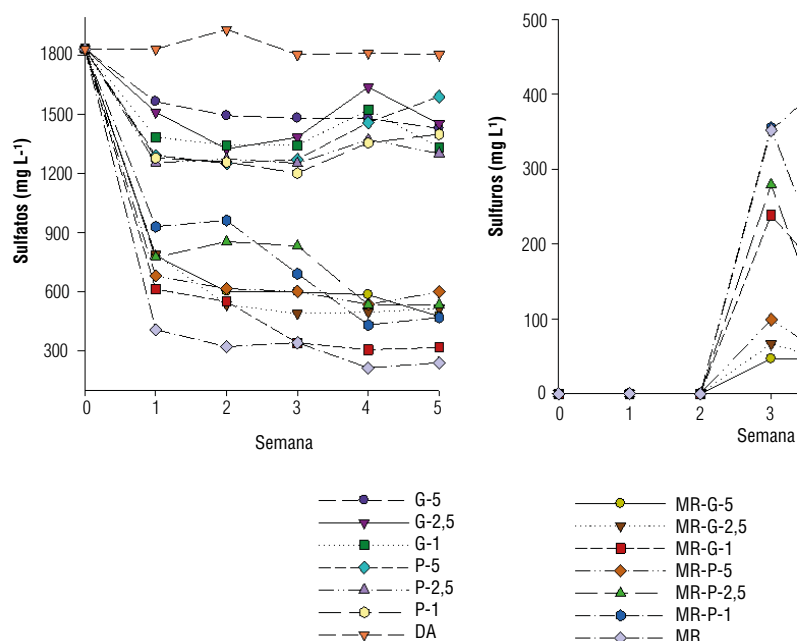
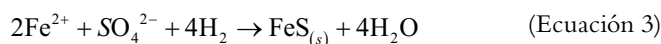
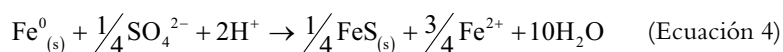


Figura 2. Cambios en la concentración de los sulfatos y los sulfuros durante la determinación del efecto de las nZVI sobre la eficiencia de los RBP. Fuente: elaboración propia.

En los reactores sin mezcla reactiva se encontró que las tasas de remoción de sulfato se encontraron entre 16% y 30%, y que las nZVI de menor tamaño presentaron las tasas más altas de remoción. Esto se debe a que su tamaño reducido ocasiona la rápida oxidación de la partícula (Kumar *et al.*, 2013) y por consiguiente la reducción del sulfato en proporciones levemente mayores. En estos reactores, el ZVI reacciona directamente con el sulfato y lo reduce a través de una reacción (redox) abiótica con las nanopartículas (ecuación 4). Sin embargo, las tasas de sulfato-reducción en presencia de nZVI son bastante bajas en contraste con los sistemas con BSR, que poseen tasas bastante altas, lo que indica que la reducción de sulfatos mediada por las BSR es fundamental durante los procesos de bio-remediación (Miao *et al.*, 2012).



Los resultados encontrados para sulfato y sulfuro están relacionados debido al metabolismo de las BSR y a la oxidación de las nZVI, que reduce el sulfato hasta sulfuro. Los sulfuros fueron detectados en los reactores con mezcla reactiva a partir de la tercera semana y se encontró que, tal como en los sulfatos, existe un efecto significativo (Anova; $p < 0,05$) del tamaño y la concentración de las nZVI sobre la producción de sulfuro.

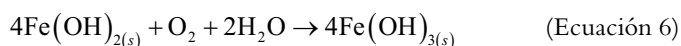
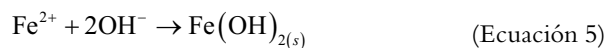
Asimismo, el control con mezcla reactiva de los RBP presentó la mayor concentración de sulfuro $435,3 \pm 7,4 \text{ mg L}^{-1}$, seguido por los reactores con nZVI de menor tamaño. En estos RBP las condiciones de pH y ORP fueron las adecuadas para el desarrollo de las BSR, no obstante, las mayores concentraciones de sulfuros se dieron en ausencia de nZVI, lo cual evidencia que existe una inhibición de las nZVI hacia las BSR.

En los reactores sin mezcla reactiva la remoción de sulfato no fue significativa. Es posible que se hayan precipitado sulfuros metálicos, pero en cantidades mínimas. Diferentes estudios han demostrado que las nZVI pueden lograr reducciones significativas de sulfato, pero en muchos casos el sulfato se encuentra como co-contaminante y sus tasas de reducción se asocian a las tasas de eliminación de metales mediante la formación de sulfuros metálicos (Miao *et al.*, 2012).

3.1.3 Metales

Todos los metales (Fe^{2+} , Zn^{2+} y Mn^{+2}) presentaron altas tasas de remoción en los reactores que tenían mezcla reactiva (figura 3). La remoción de los metales del DAM inició desde la primera semana y se debe a diferentes mecanismos de remoción: la precipitación ocasionada por el aumento de pH debido a la formación de hidróxidos y carbonatos, la adsorción de los metales en la materia orgánica presente en la mezcla reactiva (Vásquez, 2016), la adsorción en la superficie reactiva de las nZVI, las reacciones de redox y la formación de sulfuros metálicos o una combinación de todos ellos.

El Fe posee la mayor concentración en el DAM en comparación con los demás metales ($1107,57 \pm 0,1 \text{ mg L}^{-1}$). La oxidación y la precipitación fueron los mecanismos de eliminación de este metal al inicio del tratamiento hasta removerlo en un porcentaje $>96\%$. Las condiciones reductoras producidas por los valores bajos de oxígeno disuelto favorecen la continua reducción del Fe (ecuaciones 5 y 6) y las condiciones alcalinas favorecen su precipitación (Calderón & Fullana, 2015). Es importante tener en cuenta que a partir de la tercera semana de tratamiento se detectó la presencia de sulfuros en estos reactores, de manera que también se presentó la remoción del Fe por medio del sulfuro. Esta observación se corrobora con los resultados del modelado en software Minteq 3.0, en el cual se evidencia que en las dos primeras semanas se produce hidróxido de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_2$), a partir de la tercera semana y hasta el final del tratamiento se produce sulfuro de hierro (FeS) y mackinawita, que es un sulfuro de hierro con una concentración leve de níquel.



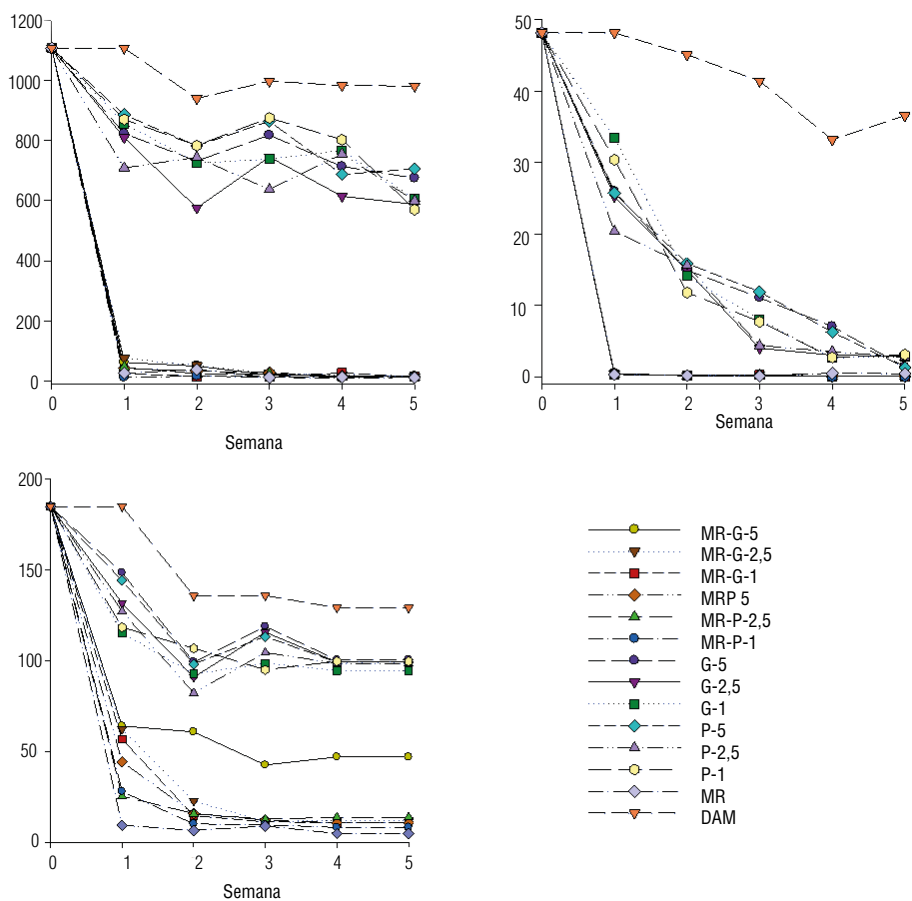


Figura 3. Cambios en la concentración de hierro, zinc y manganeso durante la determinación del efecto de las nZVI sobre la eficiencia de los RBP.
Fuente: elaboración propia.

En los reactores sin mezcla reactiva, las tasas de remoción del Fe se encontraron entre 29% y 40%, de manera que las condiciones de estos reactores no favorecieron una remoción significativa del Fe, pues los valores bajos de pH provocan la disolución del Fe en el medio e interfieren en la precipitación. El pH ácido y el ORP elevado pueden conducir al rápido envejecimiento de la nZVI, lo cual ocasiona que pierda sus propiedades reductoras y su oxidación acelerada (Calderón & Fullana, 2015); como consecuencia, se obtiene un tratamiento con poca eficiencia. En estos reactores no se determinó la presencia de sulfuro, por lo cual probablemente los mecanismos principales de remoción fueron la adsorción de superficie y la precipitación de óxidos e hidróxidos.

Además, las tasas de eliminación de zinc (Zn) fueron elevadas en los reactores con mezcla reactiva, así como en los reactores sin mezcla. Las concentraciones de Zn disminuyeron para ambos casos en la primera semana de tratamiento, lo cual se asocia con el tamaño de la nZVI: los reactores con las partículas de menor tamaño presentaron las tasas más altas de remoción.

El Zn fue removido de los reactores con mezcla reactiva en >99%. Las tasas elevadas de remoción del Zn se logran cuando se cumplen las condiciones adecuadas de pH (8,8) y ORP (-320 mV) (Cruz *et al.*, 2009). Para cationes metálicos como el Zn, cuyo potencial estándar es negativo ($E^\circ = -0,76$ V) y cercano al del Fe ($E^\circ = -0,44$ V), la atracción electrostática y la adsorción química, la precipitación (con hidróxido) y la coprecipitación dentro de los productos de corrosión de Fe son probablemente los mecanismos principales de remoción (Kumar *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2016). La precipitación con sulfuros también es otro mecanismo de remoción, según el modelo en el software Minteq 0.3, el cual indica que a partir de la tercera semana de tratamiento se observa la formación de minerales como la wurtzita y la esfalerita, dos tipos de sulfuro de Zn. En las dos semanas previas no se observaron precipitados de compuestos con zinc, pero sí se registró la disminución en su concentración, de lo cual se infiere que la adsorción de superficie y la precipitación con sulfuros son los mecanismos principales de eliminación.

En los reactores sin mezcla reactiva, el Zn fue removido en >74%. En estos reactores el mecanismo de eliminación fue la adsorción de superficie, ya que no se contaba con la presencia de BSR que produjeran sulfuro. En la figura 3 se observa que a medida que el tratamiento avanza, la concentración del Zn disminuye, y que la mayor tasa de remoción se encuentra en las últimas semanas de tratamiento, caso contrario a lo que sucede con los reactores con mezcla, que remueven rápidamente el Zn desde la primera semana. Posiblemente, si en estos reactores se hubiera contado con las condiciones de pH y ORP adecuadas, la eliminación del Zn sería más rápida y en tasas de remoción más elevadas.

Por último, en los reactores con mezcla reactiva, el manganeso (Mn) presentó tasas variadas de remoción. En el reactor enmendado con nZVI de ~100 nm al 5% (G5) se observaron las tasas más bajas (~70%), mientras que las tasas más altas se encontraron en el control de mezcla reactiva sin nZVI (~96%). La remoción de Mn se puede realizar mediante los diferentes mecanismos propuestos: adsorción y/o absorción, reacciones redox (biótica y abiótica) y precipitación o coprecipitación. Las condiciones para estos mecanismos varían y dependen de factores como la temperatura, el pH, el ORP, la acción bacteriana y las concentraciones de otros metales en el efluente. La precipitación, la adsorción o absorción por sí solas no permiten la eliminación eficiente del Mn presente en el DAM, sino que es necesario una combinación de mecanismos (Neculita & Rosa, 2018). La remoción del Mn en los reactores con mezcla es un tratamiento bioquímico en el que se presentan reacciones fisicoquímicas y formación de sulfuros por las BSR. Aunque estos tratamientos son efectivos para tratar metales, son ineficientes para eliminar Mn; además su adsorción en las células de la BSR debilita la capacidad sulfato-reductora de la bacteria (Neculita & Rosa, 2018).

Las tasas elevadas de eliminación (>95%) del Mn por sulfato-reducción se encuentran en concentraciones iniciales de 100-200 mg L⁻¹ (Neculita & Rosa, 2018). La concentración inicial de Mn en el DAM era 185,0 ± 0,1 mg L⁻¹ y las tasas de remoción están entre 70%-96%. Según el modelo en Minteq 3.0, en la tercera semana y hasta el final del tratamiento el Mn se precipita en forma de sulfuro MnS, lo cual demuestra que la capacidad reductora de las BSR no es afectada.

El Mn puede ser adsorbido por la materia orgánica presente en la mezcla y por la superficie de la nZVI, no obstante, la eliminación del Mn se inhibe con la presencia de altas concentraciones de Fe (Neculita & Rosa, 2018) y por la competencia entre los demás metales por los sitios de superficie disponibles para la adsorción. La eliminación del Mn está vinculada al aumento de la alcalinidad, además la adsorción es favorecida por valores de pH alcalinos, condición con la cual cumplen los reactores (Vásquez *et al.*, 2016b; Vásquez, 2016). Es probable que el Mn haya sido adsorbido en mayor proporción por la mezcla reactiva que por las nZVI debido a su contenido de Fe. La adsorción del Mn no se vio afectada ni siquiera en concentraciones de Fe bastante altas ni en concentraciones de otros metales (Zn) gracias a los diferentes mecanismos de remoción para cada metal.

En los reactores sin mezcla reactiva, las tasas de remoción del Mn fueron desde 39% hasta 46%; la elevada concentración del Fe, la adsorción de superficie del Zn y el bajo pH son factores que alteran las tasas de eliminación. La precipitación o coprecipitación del Mn con óxidos o hidróxidos generados a partir de la oxidación de la partícula es inhibida si existe una relación $Fe/Mn > 4$ (Neculita & Rosa, 2018; Vásquez, 2016), como en este estudio (relación: 6,0). A pesar de los factores de inhibición ya mencionados, se logró la remoción de una fracción del Mn, además, en estos reactores no se determinó la precipitación de algún mineral con Mn (modelo Minteq 3.0), lo cual confirma la remoción por adsorción de las nZVI. Durante el tratamiento, en ninguno de los reactores (con o sin mezcla) se presentó la disolución del Mn: en los reactores con mezcla posiblemente se haya evitado la disolución por la cantidad de materia orgánica, la eficiente remoción del Fe y el pH alcalino. En los reactores sin mezcla, la remoción simultánea con el Fe que reduce su concentración evita la disolución del Mn (Neculita & Rosa, 2018).

3.2 Efecto en la actividad de la comunidad microbiana

Las nZVI pueden crear condiciones adecuadas para el crecimiento de la comunidad microbiana, especialmente de las BSR, ya que, al entrar en contacto con el medio, se consume rápidamente el oxígeno disuelto, se disminuye el ORP y se produce H_2 , que se puede usar como donador de electrones por las BSR (Lefevre *et al.*, 2016). Algunos estudios han demostrado que las nZVI son tóxicas para las comunidades microbianas e inhiben completamente su actividad. También existen estudios como el de Saccá *et al.* (2013), los cuales demuestran que las nZVI no tienen efecto bactericida y bacteriostático en la comunidad microbiana.

Los resultados de la determinación de la actividad de la enzima deshidrogenasa en los reactores con mezcla reactiva muestran una diferencia significativa ($p < 0,05$) entre el control y los demás reactores, la mayor actividad enzimática se presenta en ausencia de nanopartículas (figura 4). En su estudio, Huang *et al.* (2016) evaluaron el uso de nZVI modificadas con alginato de sodio en la recuperación de sedimentos contaminados con cadmio y determinaron que la presencia de nZVI inhibe la actividad de la enzima deshidrogenasa. Los autores concluyeron que esta inhibición se debe a la presencia de iones férricos.

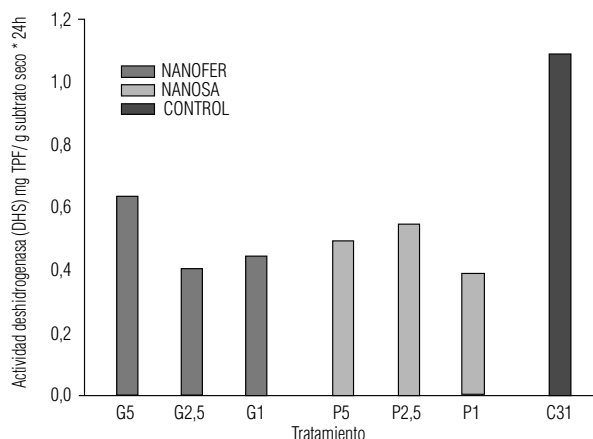


Figura 4. Actividad de la enzima deshidrogenasa (DHs) en el control y los reactores con mezcla reactiva. En la figura, G y P hacen referencia al tamaño, el número final es la concentración de nZVI y C31 es el control.

Fuente: elaboración propia.

Las nanopartículas pueden afectar los sistemas biológicos a nivel celular, subcelular y proteico, sin embargo, el mecanismo de toxicidad aún no es claro. Algunos de los mecanismos de toxicidad propuestos incluyen: (1) Alteración en la membrana celular, (2) interferencia con la respiración, (3) daño al ADN o proteínas enzimáticas causado por iones metálicos (Chen *et al.*, 2010), (4) el tamaño reducido de la partícula, (5) Fe^{2+} que induce la generación de especies reactivas de oxígeno (moléculas inestables que contienen oxígeno y que reaccionan fácilmente con otras moléculas de la célula) o una combinación de todos estos (Kumar *et al.*, 2013).

La mayor parte de los estudios sugieren que la ruptura de la membrana celular y el estrés oxidativo a través de la generación de Fe^{2+} y especies reactivas de oxígeno son probablemente los principales mecanismos que contribuyen a la toxicidad de las nZVI, ambos mecanismos implican un contacto directo entre las nanopartículas y las BSR (Chen *et al.*, 2010). Sin embargo, en los RBP donde hay gran cantidad de materia orgánica se puede revertir el efecto de las nZVI aumentando el sistema donador de electrones (Barton & Tomei, 1995). Altas cantidades de materia orgánica ayudan en la adaptación de la comunidad microbiana al medio, diferentes fuentes donadoras de electrones son ventajosas en términos de resistencia al estrés oxidativo (Vásquez *et al.*, 2016b).

Otro de los posibles mecanismos de prevención de la materia orgánica es el recubrimiento de la nZVI y las BSR, este recubrimiento impide el contacto directo entre ambas, ya que se cargan negativamente y se repelen (repulsión electrostática). El recubrimiento de materia orgánica en la nZVI puede afectar su reactividad al reducir el contacto con el agua, por lo tanto afecta la oxidación de la partícula y la producción de H_2 (Chen *et al.*, 2010). De igual manera que con los mecanismos de toxicidad, no se puede afirmar con certeza el mecanismo de mitigación de toxicidad.

También es importante tener en cuenta otros factores que pueden influir en la inhibición de las BSR, como la concentración y el tamaño de la partícula, según el análisis factorial (Anova; $p < 0,05$), pues ambos factores influyen en la actividad enzimática. En su estudio,

Diao y Yao (2009) determinaron que a mayor concentración de nZVI, menor es la tasa de supervivencia de la comunidad microbiana. Asimismo, encontraron que las altas concentraciones pueden resultar en una agregación de la partícula, lo cual reduce su reactividad, su toxicidad y aumenta su tamaño. También mencionan que las agregaciones son difíciles de evitar y están influidas por el tamaño de la partícula y el ambiente. El tamaño de partícula puede causar estrés oxidativo, las partículas más pequeñas pueden atravesar la pared celular liberando Fe^{2+} y permitiendo la acumulación de Fe^{2+} que ingresa por la membrana dañada y posteriormente reacciona con el H_2O_2 intracelular, lo cual crea especies reactivas de oxígeno que causan estrés oxidativo y la muerte celular (Lefevre *et al.*, 2016).

Como se mencionaba anteriormente, la mayor actividad enzimática se observa en ausencia de nZVI, al tiempo que se registra actividad enzimática en los demás reactores. En general, se observa que la actividad no fue inhibida en su totalidad. Es probable que el tamaño y la concentración sean factores claves que determinen el mecanismo de toxicidad e inhibición presentes en los reactores: en altas concentraciones se encuentran menores tasas de supervivencia y mayor posibilidad de formación de agregados de las nZVI, mientras que a menor tamaño hay mayor probabilidad de causar estrés oxidativo. Por el contrario, se puede afirmar que la materia orgánica es el principal mecanismo de prevención de la toxicidad, dado su alto porcentaje contenido en los reactores. El comportamiento de los reactores no permite establecer un patrón fijo (menor y mayor actividad) debido a las diferentes condiciones de cada uno de los reactores y a los múltiples mecanismos de toxicidad propuestos.

4. Conclusiones

El uso de nZVI como enmienda en la mezcla reactiva de los RBP para el tratamiento de DAM es una opción prometedora para la eliminación de metales (Zn^{+2} , Fe^{+2} , Mn^{+2}) y sulfatos. La adición de las nZVI en la mezcla reactiva fue eficiente en incrementar el pH y la alcalinidad, así como en disminuir el ORP, en la remoción de metales con tasas que superan el 80% y en la remoción de sulfatos con tasas de remoción del 83%. La remoción de los metales y el sulfato se dio por medio de diferentes mecanismos, que incluyen: la adsorción, la precipitación/coprecipitación con óxidos/hidróxidos, formación de sulfuros metálicos, reacciones redox y combinaciones de estos mecanismos. A su vez, las nZVI por sí solas no fueron muy eficientes en el aumento del pH y la alcalinidad, ni en la remoción de metales y sulfatos, pues únicamente lograron eliminar de manera eficiente el zinc. El tamaño y la concentración de las nZVI es determinante durante el tratamiento del DAM, puesto que estos dos factores pueden influir directamente en la eficiencia de remoción de metales y sulfatos.

Las nZVI conducen a una estimulación de la actividad microbiana, especialmente de las BSR, al acondicionar el medio para su óptimo desarrollo (disminuir el ORP y aumentar el pH), pero también conlleva la inhibición de su actividad. Se observó que las nZVI pueden inhibir la actividad microbiana por diferentes mecanismos, sin embargo dicha actividad no fue inhibida en su totalidad, dado que también existen mecanismos que evitan esta toxicidad.

En resumen, las nZVI mejoraron significativamente el tratamiento con mezcla reactiva en condiciones alcalinas y reductoras. Estas condiciones se mantienen durante el tratamiento sin presentar variación alguna, lo que evita que los metales y el sulfato vuelvan a disolverse en el DAM. Es recomendable realizar estudios más profundos de la toxicidad de las nZVI sobre la comunidad microbiana para plantear mecanismos que eviten dicha toxicidad, con lo cual se logrará un tratamiento aún más eficiente.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Central por la financiación de esta investigación y al semillero de Biotecnología Ambiental. Agradecemos a la empresa Milpa S.A. por las muestras de DAM. Agradecemos también a Luis Ángel López Zhou por su ayuda en los análisis fisicoquímicos del laboratorio y a la profesora Yaneth Vásquez por su continuo acompañamiento durante la ejecución de este proyecto.

Referencias

- Adams, B., Anderson, R., Bless, D., Butler, B., Conway, B., Dailey, A., & Hanley, J. (2014). *Reference guide to treatment technologies for mining-influenced water* [vol EPA 542-R-14-001]. Office of Superfund Remediation and Technology Innovation.
- American Public Health Association [APHA]. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. APHA.
- Ayala, P. P., Sierra, A. R., & Field, J. A. (2016). Treatment of acid rock drainage using a sulfate-reducing bioreactor with zero-valent iron. *Journal of Hazardous Materials*, 308, 97-105.
- Barton, L. L., & Tomei, F. A. (1995). Characteristics and activities of sulfate-reducing bacteria. En *Sulfate-reducing bacteria* (pp. 1-32). Springer.
- Calderón, B., & Fullana, A. (2015). Heavy metal release due to aging effect during zero valent iron nanoparticles remediation. *Water Research*, 83, 1-9.
- Chen, J., Xiu, Z., Lowry, G. V., & Alvarez, P. J. (2011). Effect of natural organic matter on toxicity and reactivity of nano-scale zero-valent iron. *Water Research*, 45(5), 1995-2001.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR]. (2010). Lineamientos para el ordenamiento de la minería en los municipios carboníferos del departamento de Cundinamarca.
- Diao, M., & Yao, M. (2009). Use of zero-valent iron nanoparticles in inactivating microbes. *Water Research*, 43(20), 5243-5251.
- Garzón, C., Beltrán, J., Vásquez, Y., & Prieto F. (2019). *Selección de un sistema de tratamiento para los drenajes ácidos de mina (DAM) de la mina Incarsa Ltda del municipio de Samacá, Boyacá* [tesis de pregrado, Universidad Central].

- Grande Gil, J. A. (ed.). (2016). *Drenaje ácido de mina en la faja pirítica ibérica: Técnicas de estudio e inventario de explotaciones* (vol. 15). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Huelva.
- Guo, X., Yang, Z., Dong, H., Guan, X., Ren, Q., Lv, X., & Jin, X. (2016). Simple combination of oxidants with zero-valent-iron (ZVI) achieved very rapid and highly efficient removal of heavy metals from water. *Water Research*, 88, 671-680.
- Huang, D., Xue, W., Zeng, G., Wan, J., Chen, G., Huang, C., & Xu, P. (2016). Immobilization of Cd in river sediments by sodium alginate modified nanoscale zero-valent iron: impact on enzyme activities and microbial community diversity. *Water Research*, 106, 15-25.
- Instituto Nacional de Normalización [INN]. (1979). *Mecánica de suelos. Determinación de la humedad. Método NCh 1515*. INN.
- Klimkova, S., Cernik, M., Lacinova, L., Filip, J., Jancik, D., & Zboril, R. (2011). Zero-valent iron nanoparticles in treatment of acid mine water from in situ uranium leaching. *Chemosphere*, 82(8), 1178-1184.
- Kumar, N., Omoregie, E. O., Rose, J., Masion, A., Lloyd, J. R., Diels, L., & Bastiaens, L. (2013). Inhibition of sulfate reducing bacteria in aquifer sediment by iron nanoparticles. *Water Research*, 51, 64-72.
- Lefevre, E., Bossa, N., Wiesner, M. R., & Gunsch, C. K. (2016). A review of the environmental implications of in situ remediation by nanoscale zero valent iron (nZVI): behavior, transport and impacts on microbial communities. *Science of the Total Environment*, 565, 889-901.
- Li, S., Wang, W., Liang, F., & Zhang, W. X. (2016). Heavy metal removal using nanoscale zero-valent iron (nZVI): Theory and application. *Journal of Hazardous Materials*, 322, 163-171.
- Lindsay, M., Wakeman, K., Rowe, F., Grail, B., Ptacek, C., Blowes, D., & Johnson, D. (2011). Microbiology and geochemistry of mine tailings amended with organic carbon for passive treatment of pore water. *Geomicrobiology Journal*, 28, 229-241.
- Martínez de Jesús, G. (2008). *Eliminación de sulfatos en un reactor de lecho móvil anaerobio-aerobio* [tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional UNAM. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000632922
- Miao, Z., Brusseau, M. L., Carroll, K. C., Carreón-Diazconti, C., & Johnson, B. (2012). Sulfate reduction in groundwater: characterization and applications for remediation. *Environmental Geochemistry and Health*, 34(4), 539-550.
- Ministerio de Minas y Energía. (2015). *Diseño de agenda para el desarrollo productivo y competitivo del distrito de Zipa-Samacá: informe final*.
- Mukherjee, R., Kumar, R., Sinha, A., Lama, Y., & Saha, A. K. (2016). A review on synthesis, characterization, and applications of nano zero valent iron (nZVI) for environmental remediation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(5), 443-466.
- Neculita, C. M., & Rosa, E. (2018). A review of the implications and challenges of manganese removal from mine drainage. *Chemosphere*, 214, 491-510.

- Neculita, C. M., Yim, G. J., Lee, G., Ji, S. W., Jung, J. W., Park, H. S., & Song, H. (2011). Comparative effectiveness of mixed organic substrates to mushroom compost for treatment of mine drainage in passive bioreactors. *Chemosphere*, 83(1), 76-82.
- Prieto, G., & Duitama, L. M. (2004). Acid drainage of coal mining in Cundinamarca Department, Colombia. En *Environmental geochemistry in tropical and subtropical environments* (pp. 125-134). Springer.
- Quicasán, D. F., Forero, N. F., & Vásquez, O. Y. (2017). Prevención de drenajes ácidos de mina utilizando compost de champiñón como enmienda orgánica. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 19(1), 92-100.
- Saccá, M. L., Fajardo, C., Costa, G., Lobo, C., Nande, M., & Martin, M. (2014). Integrating classical and molecular approaches to evaluate the impact of nanosized zero-valent iron (nZVI) on soil organisms. *Chemosphere*, 104, 184-189.
- Saccá, M. L., Fajardo, C., Nande, M., & Martín, M. (2013). Effects of nano zero-valent iron on *Klebsiella oxytoca* and stress response. *Microbial Ecology*, 66(4), 806-812.
- Serra-Wittling, C., Houot, S., & Barriuso, E. (1995). Soil enzymatic response to addition of municipal solid-waste compost. *Biology and Fertility of Soils*, 20(4), 226-236.
- Usepa, E. (2007). *Flame Atomic Absorption Spectrophotometry. Method 7000B*. US Environmental Protection Agency.
- Vangnai, A., Chaithawiwat, K., McEvoy, J. M., Pruess, B., Krajangpan, S., & Khan, E. (2015). Impact of nanoscale zero valent iron on bacteria is growth phase dependent. *Chemosphere*, 144, 352-359.
- Vásquez Ochoa, O. Y. (2016). *Evaluación de un biorreactor pasivo durante la remediación de drenajes ácidos de mina del distrito minero de Zipaquirá (Colombia)* [tesis de doctorado, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio Institucional Universidad Javeriana. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/19645>
- Vásquez, Y., Escobar, M. C., Neculita, C. M., Arbeli, Z., & Roldan, F. (2016a). Selection of reactive mixture for biochemical passive treatment of acid mine drainage. *Environmental Earth Sciences*, 75(7), 576.
- Vásquez, Y., Escobar, M. C., Neculita, C. M., Arbeli, Z., & Roldan, F. (2016b). Biochemical passive reactors for treatment of acid mine drainage: effect of hydraulic retention time on changes in efficiency, composition of reactive mixture, and microbial activity. *Chemosphere*, 153, 244-253.
- Vicente, M. S. (2006). *Uso de bacterias sulfato-reductoras inmovilizadas para la precipitación de metales pesados* [tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de la Plata. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/2191>
- Wilkin, R. T., & McNeil, M. S. (2003). Laboratory evaluation of zero-valent iron to treat water impacted by acid mine drainage. *Chemosphere*, 53(7), 715-725.
- Zagury, G. J., Kulnieks, V. I., & Neculita, C. M. (2006). Characterization and reactivity assessment of organic substrates for sulphate-reducing bacteria in acid mine drainage treatment. *Chemosphere*, 64(6), 944-954.

Bioacumulación de metales pesados en dos especies de peces vendidos en el mercado de Paloquemao (Bogotá)

Bioaccumulation of heavy metals in two species of fish sold in Paloquemao market (Bogotá)

Vanesa Perea* y Yaneth Vásquez Ochoa**

Cómo citar:

Perea, V., & Vásquez Ochoa, Y. (2019). Bioacumulación de metales pesados en dos especies de peces vendidos en el mercado de Paloquemao (Bogotá). *Ingeciencia*, 4, 55-65.

* Estudiante de Biología de la Universidad Central. Integrante del semillero de Biotecnología Ambiental, del Grupo de Investigación en Bioingeniería, Nanotecnología y Telecomunicaciones (SPIN). Correo: bpereac@ucentral.edu.co

** Licenciada en Química y Biología de la Universidad Libre de Colombia. Ms.C. en Ciencias Biológicas y Ph.D. en Ciencias Biológicas de la Pontificia Universidad Javeriana. Profesora asociada de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central. Correo: ovasquezo@ucentral.edu.co

Resumen

Los elementos químicos Hg, Pb, Zn y Cr son conocidos como metales pesados y son considerados una amenaza para la salud pública porque generan alteraciones neurológicas, afecciones del sistema respiratorio y nefrotoxicidad. En Colombia, se desconoce el número exacto de sitios contaminados con metales pesados como consecuencia de las actividades antrópicas que en muchos casos contaminan las fuentes de agua de la región. En el presente artículo se evaluó la concentración de metales pesados en dos especies de peces, *Pseudoplatystoma magdaleniatum* (Bagre rayado) y *Prochilodus magdalenae* (Bocachico), comercializadas en la ciudad de Bogotá. Se determinó la concentración de los metales en el músculo dorsal y en las branquias por su constante exposición al agua. Las muestras fueron sometidas a digestión ácida y los metales solubles fueron cuantificados por espectrofotometría de absorción atómica. Los resultados muestran que las concentraciones de metales pesados (Hg, Pb, Zn y Cr) bioacumulados en las branquias y en el músculo dorsal de las dos especies es inferior a los límites establecidos como seguros por la Organización Mundial de la Salud para el consumo humano.

Palabras clave: bioacumulación, biomagnificación, branquias, cadena trófica, contaminación, tejido muscular.

Abstract

The chemical elements Hg, Pb, Zn and Cr are known as heavy metals and are considered a threat to public health because they generate neurological disorders, respiratory system disorders and nephrotoxicity. In Colombia, the exact number of sites contaminated with heavy metals because of anthropic activities that in many cases contaminate the region's water sources is unknown. In this article, the concentration of heavy metals was evaluated in two species of fish *Pseudoplatystoma magdaleniatum* (striped catfish) and *Prochilodus magdalenae* (Bocachico) commercialized in the city of Bogotá. The concentration of metals in the dorsal muscle and in the gills was determined by their constant exposure to water. The samples were subjected to acid digestion and the soluble metals were quantified by atomic absorption spectrophotometry. The results show us the concentrations of heavy metals (Hg, Pb, Zn and Cr) bioaccumulated in the gills and in the dorsal muscle of the two species is lower than the limits established as safe by the World Organization of the Health for human consumption.

Keywords: bioaccumulation, biomagnification, food chain, gills, muscle tissue, pollution.

1. Introducción

La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC, por sus siglas en inglés) define el metal pesado como cualquier elemento químico metálico que tenga una densidad $\geq 4,5 \text{ g/cm}^3$. Sin embargo, muchos de los metales que tienen una densidad alta no son tóxicos y algunos son elementos esenciales en los organismos, independientemente de la concentración, como es el caso de Ca y Mg. Sin embargo, hay una serie de elementos que en alguna de sus formas pueden representar un serio problema medioambiental y es común referirse a ellos con el término genérico de *metales pesados* (Bosch, 2016). Estos metales constituyen un riesgo para el ambiente porque son sustancias con alta estabilidad química ante los procesos de biodegradación y poseen un efecto multiplicador en la concentración del contaminante en la cadena trófica. Además, alcanzan niveles altos de toxicidad y se absorben eficientemente a través de las membranas biológicas, debido a que tienen elevada afinidad química por el grupo sulfhídrico de las proteínas (Mancera-Rodríguez & Álvarez-León, 2006).

Los metales como Cd, Pb y Cr se acumulan en los tejidos humanos, especialmente en riñón y pulmón, alteran sus funciones básicas y provocan efectos tóxicos como neumonía, disfunción renal y enfisemas. En casos de intoxicaciones crónicas por metales pesados son habituales las osteopatías y algunos tipos de cáncer relacionados con el aparato reproductor masculino (Bosch *et al.*, 2016). La exposición al mercurio en casos de intoxicaciones agudas produce irritación en las vías respiratorias, bronquitis, bronquiolitis y otras enfermedades respiratorias (Pérez, 2011). La ingesta continua de alimentos contaminados con metales pesados promueve la bioacumulación en el cuerpo y causa un efecto multiplicador conocido como *biomagnificación* en la cadena trófica, proceso que continúa hasta que llega al consumo humano (González *et al.*, 2016).

Actualmente, en Colombia se desconoce la cantidad exacta de sitios contaminados con metales pesados como consecuencia de la actividad minera, de curtiembres o de la galvanoplastia. Los peces piscívoros (cuya dieta es principalmente peces más pequeños) presentes en los ríos que recogen efluentes contaminados con metales pesados generalmente los concentran en su organismo, por lo tanto, son la principal fuente de contaminación para los humanos (Ortega, 2014). En los sistemas acuáticos, tanto las partículas de sedimento como el material suspendido presentan metales pesados en altas concentraciones. El material suspendido y las partículas de sedimento constituyen la principal fuente de alimento para las especies detritívoras (se alimentan de materia en descomposición), filtradoras o suspensívoras (alimentación por filtración sistemática y masiva de agua). La ingestión de metales y los bajos niveles del pH en el tracto digestivo contribuyen a que esta sea una de las principales vías de absorción de tales elementos y probablemente son las finas partículas oxidativas la fuente más importante de metales disponibles para la biota (Campo, 1992).

A la fecha, en Colombia se han realizado varios estudios de la bioacumulación de metales en peces provenientes de los ríos Cauca y Magdalena, así como del riesgo que esto representa para la salud humana. Una de estas investigaciones fue realizada en la Ciénaga

Grande de Santa Marta, en la cual encontraron grandes concentraciones de Cu y Zn en el hígado, en comparación con el músculo, en el pez *Ariopsis bonillai* (Campo, 1992). Otro de los estudios en el país se llevó a cabo en la parte alta de la cuenca del río San Jorge en el departamento de Córdoba, por ser considerada una de las zonas más importantes para la minería en el país, con explotaciones de ferroníquel, carbón y oro (Madrid, 2011). Este trabajo evaluó los efectos genotóxicos de los metales pesados (Hg, Pb, Cd, Cu y Zn) asociados a explotaciones mineras en pobladores de la cuenca del río San Jorge y concluyó que los peces piscívoros concentran los metales pesados en su organismo y, por tanto, son la principal fuente de contaminación en humanos.

En otra importante región del país como Villavicencio se recolectaron once muestras de carne de pescado crudo para determinar los niveles de plomo y mercurio. Ocho muestras correspondieron a pescado congelado importado, de las cuales tres provenían de China y cinco de Vietnam; las otras tres muestras eran de pescado fresco, obtenidas en expendios locales. En todas las muestras se detectó Hg y Pb, sin embargo, la concentración de los metales se encontraba por debajo del límite establecido para consumo humano por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Instituto Nacional para la Vigilancia de Alimentos y Medicamentos (Invima) (Ortega, 2014).

En la ciudad de Bogotá, particularmente en la Plaza de Mercado de Paloquemao se comercializan aproximadamente 18 000 ton/año de carne de pescado, que son distribuidas a los supermercados, minimercados, carnicerías, restaurantes y tiendas hasta que llegan finalmente a la canasta familiar (Hoyos, 2011). Las especies de peces que más consume la población de la capital son bocachico (40%) y bagre rayado (25%), que provienen de los ríos Cauca y Magdalena, los cuales contienen altas concentraciones de metales pesados en sus aguas y sedimentos (Verbel *et al.*, 2011). Por tanto, en el presente trabajo se evalúa la concentración de metales pesados (Hg, Pb, Zn y Cr) en el músculo y las branquias de dos especies: Bagre rayado (*Pseudoplatystoma magdaleniatum*) y Bocachico (*Prochilodus magdalenae*).

2. Materiales y métodos

Selección y tratamiento de las muestras

Se seleccionaron dos especies de peces, Bagre rayado y Bocachico, de las cuales se compraron tres individuos por cada una en la plaza de Paloquemao en la ciudad de Bogotá. En el laboratorio, los individuos fueron pesados, medidos y lavados con agua destilada siguiendo las recomendaciones de Verbel (2011) y se realizaron cortes de secciones musculares dorsales superiores e inferiores, así como en las branquias (figura 1). Cada muestra (~5 g) fue almacenada en bolsas plásticas herméticas a una temperatura de -20 C° hasta que fueron analizadas. Cada análisis se realizó tres veces, con el fin de obtener una mayor precisión en los datos obtenidos.

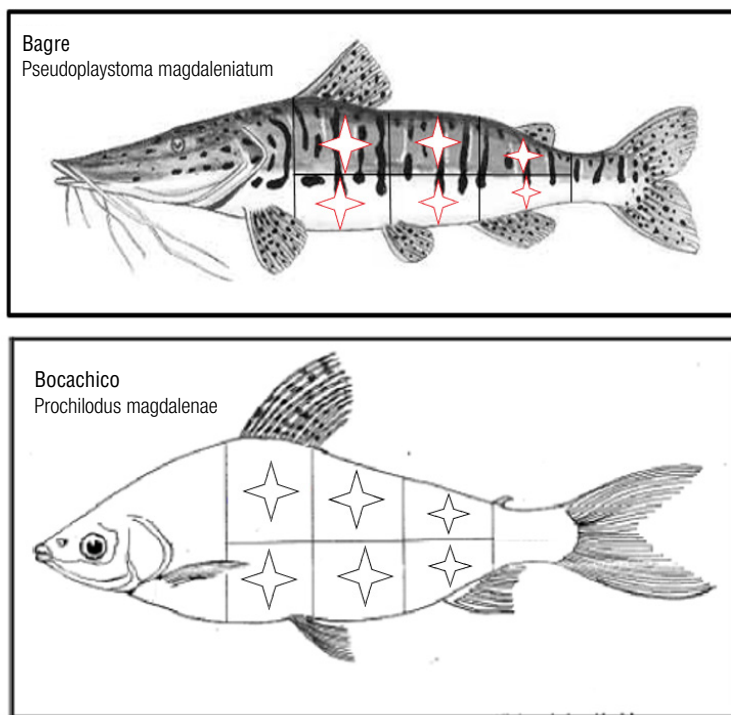


Figura 1. División del tejido animal para obtener las muestras del músculo dorsal superior e inferior de los individuos de las dos especies. Se tomaron seis muestras de cada individuo, como representan los asteriscos en la imagen.
Fuente: elaboración propia.

Todas las muestras, más un control artificial preparado con caolín y mercurio (utilizado con el fin de obtener un valor de concentración de referencia con respecto al Hg), fueron digeridas con una mezcla de ácido nítrico y ácido sulfúrico en relación 3:7 por un tiempo de 24 horas a temperatura controlada de 30 °C. Posteriormente, las muestras fueron centrifugadas y diluidas con agua desionizada en dos ocasiones a 4 °C para separar el pellet del sobrenadante (contenido de grasa animal), según las recomendaciones de Olivero y Johnson (2002).

La cuantificación de los metales se realizó por absorción atómica (Varian 240 FS), las curvas de calibración para metales específicos se evaluaron mediante un estándar de control preparado de forma independiente. El límite de detección del método (LDM) se definió como la concentración mínima de cada sustancia medida (Hg, Cr, Pb y Zn), en el que se utilizó un patrón de calibración para cada metal: para Pb y Zn 0,1 ppm, para el Hg 1 ppm y 50 ppb, finalmente 0,5 ppm para Cr.

Con el fin de realizar comparaciones múltiples entre las variables de los niveles de metales pesados presentes en las branquias y músculos de cada población se realizó la prueba de Shapiro-Wilk para comprobar la normalidad y la prueba de Levene para determinar la homogeneidad de varianzas, seguido de un Anova y una prueba post hoc (Tukey) según Acosta (2004).

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos por la prueba de Anova ($p \leq 0,05$) mostraron diferencias estadísticas significativas en las concentraciones de Pb en el tejido muscular y en las branquias de las dos especies de diferente nivel trófico. En el bagre se encontraron concentraciones similares de Pb en los tejidos analizados (músculo dorsal $4,990 \pm 0,200$ ng/g y branquias $4,911 \pm 0,683$ ng/g), mientras que en el bocachico se obtuvieron mayores valores en la concentración de Pb en el músculo dorsal ($3,851 \pm 0,300$ ng/g) con respecto a las branquias ($3,217 \pm 0,578$ ng/g), como se observa en la figura 2. Resultados similares fueron reportados por Ortega *et al.* (2020), en los cuales se presenta una mayor concentración de Pb en el músculo dorsal con respecto a los demás tejidos analizados.

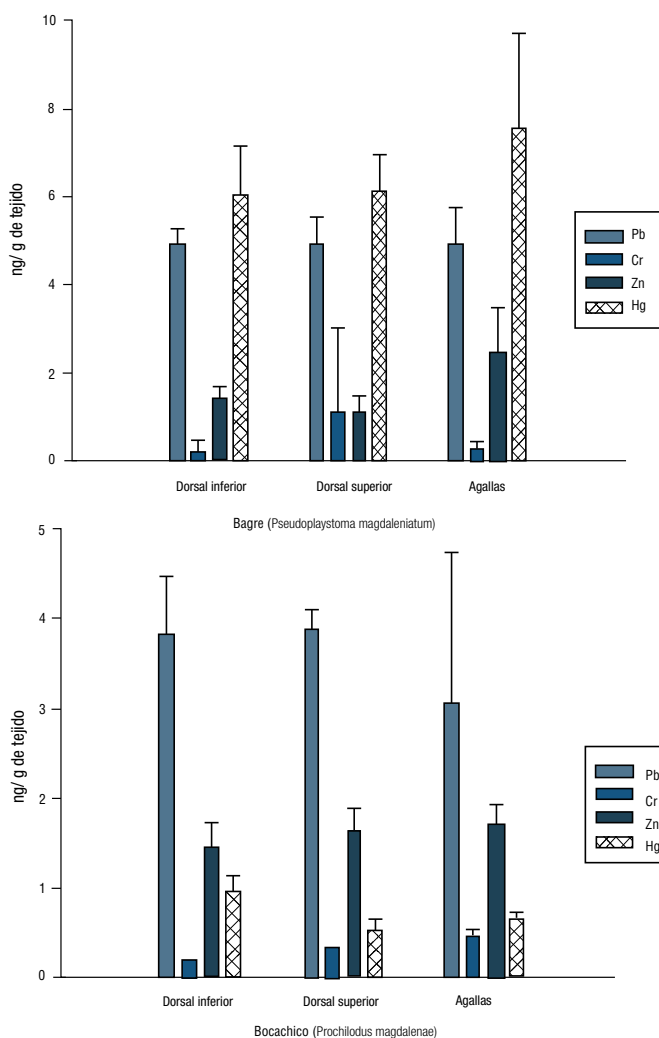


Figura 2. Comparación de la concentración de metales pesados (Pb, Cr, Zn, Hg) en músculo dorsal (superior e inferior) y branquias de Bagre rayado (*Pseudoplattystoma magdaleniatum*) y Bocachico (*Prochilodus magdalenae*). Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, los valores encontrados en este trabajo no superan el límite establecido como seguro por la OMS (300 ng/g con base en el peso húmedo) para adultos. En Colombia, el eje de la legislación que regula los metales pesados son las afectaciones que estos causan a la salud humana a través de procesos de bioacumulación. A partir de este criterio, el Ministerio de Ambiente y el de Salud y Protección Social establecieron la Resolución 122 de 2012, que reglamenta los límites máximos de metales pesados (Pb: 0,3 mg/kg, Hg: 0,5 mg/kg) y la Norma Técnica Colombiana (NTC) 1443, que establece los límites para consumo humano (Pb: 0,4 mg/kg; Hg: 0,5 mg/kg) (Licona & Negrete, 2019). El Pb es una neurotoxina que causa déficits de comportamiento en vertebrados, disminuye la supervivencia y las tasas de crecimiento, causa discapacidades de aprendizaje y puede generar un efecto crónico más prolongado en los niños (Rajeshkumar & Li, 2018).

En cuanto al Hg, la prueba de Anova ($p \leq 0,05$) muestra diferencias estadísticas significativas en las concentraciones en los tejidos musculares y en las branquias de las dos especies evaluadas, pues es mayor la concentración en el bagre rayado (*Pseudoplatystoma magdaleniatum*). En esta especie se encontraron valores similares en las concentraciones de Hg en las muestras de tejido muscular dorsal superior ($6,120 \pm 0,864$ ng/g) e inferior ($6,046 \pm 1,122$ ng/g) (tabla 1), en comparación con el bocachico (*Prochilodus magdalenae*), en el cual se obtuvieron mayores valores de concentración de Hg en las branquias ($0,642 \pm 0,068$ ng/g), seguido del músculo dorsal inferior ($0,553 \pm 0,039$ ng/g) y superior ($0,526 \pm 0,049$ ng/g). Las concentraciones de Hg más altas se encontraron en la especie carnívora (Bagre), resultados que son similares a los reportados por Mancera *et al.* (2006), en los cuales las concentraciones más altas también fueron observadas en peces carnívoros y estuvieron en un promedio de 240 ng Hg/g. Sin embargo, en este estudio el valor máximo reportado fue de 8,627 ng Hg/g, un valor que no supera el límite internacionalmente aceptado (500 ng Hg/g) como seguro para que sea consumido por el hombre (OMS, 2018).

Tabla 1. Promedio de las concentraciones de metales pesados (Pb, Cr, Zn, Hg) halladas en músculo dorsal (superior e inferior) y branquias de las muestras de Bocachico (*Prochilodus magdalenae*) y Bagre rayado (*Pseudoplatystoma magdaleniatum*).

Especies	Muestras	Concentración de metal (ng/g)			
		Pb	Cr	Zn	Hg
<i>Prochilodus magdalenae</i>	Músculo dorsal inferior	3,813±0,636	0,020±0,000	1,408±0,304	0,553±0,039
	Músculo dorsal superior	3,889±0,211	0,029±0,014	1,628±0,257	0,526±0,049
	Branquias	3,217±0,726	0,047±0,036	1,691±0,192	0,642±0,068
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	Músculo dorsal inferior	4,904±0,369	0,189±0,253	1,405±0,296	6,046±1,122
	Músculo dorsal superior	4,910±0,653	1,126±1,863	1,124±0,367	6,120±0,864
	Branquias	4,912±0,683	0,277±0,109	2,410±0,933	7,521±1,942

Fuente: elaboración propia.

El incremento en las concentraciones de mercurio cuando aumenta el nivel trófico de las especies analizadas sugiere la presencia del fenómeno de biomagnificación en los lugares de origen de dichas especies. Las especies con mayor capacidad de acumulación

de mercurio son las carnívoras, tales como el Bagre rayado, el Bagre blanquillo y el Bagre pintado, de manera que se debe minimizar el consumo diario de estas especies para disminuir el riesgo de intoxicación mercurial (Licon & Negrete, 2019). Por su parte, el Bocachico fue la especie que mostró las concentraciones más bajas de mercurio (figura 2), lo cual concuerda con los hábitos alimenticios de estos peces, como son fitoplanctónico y detritívoro (Bermeo & Céleri, 2016).

Cabe mencionar que de acuerdo con otras instituciones, como la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos y la Academia Nacional de Ciencias, el valor de referencia permitido para el consumo de metales como el Hg no debe exceder 1,0 mg/g, de manera que los resultados obtenidos durante la investigación no superan el valor permitido por dichas instituciones (Amador, 2015). Se puede concluir entonces que el consumo de Bagre y Bocachico no genera un riesgo para los consumidores de estas especies debido a que su concentración no supera los valores permitidos.

El Zn es un elemento traza importante en la nutrición humana y cumple muchas funciones bioquímicas en el metabolismo humano. Una deficiencia de Zn en el organismo humano conduce a varios trastornos, pero una ingesta excesiva puede causar efectos adversos agudos (Scherz & Kirchhoff, 2006). La dosis diaria recomendada de Zn es de 1,1000 ng/día para hombres y 8,000 ng/día para mujeres hasta los 19 años (Medeiros *et al.*, 2012). En nuestro estudio se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de Zn en los tejidos musculares y en las branquias de las dos especies evaluadas. En el bagre se encontraron valores bajos en los tejidos musculares dorsales ($1,2644 \pm 0,367$ ng/g) en comparación con el de las branquias ($2,4104 \pm 0,147$ ng/g). Asimismo, en el bocachico se encontró la mayor concentración de Zn en las branquias, probablemente por ser una especie detritívora (se alimentan de detritos, materia orgánica en descomposición), succiona con su boca el lodo del fondo para aprovechar detritos orgánicos, de modo que se ve afectada por la contaminación de los sedimentos de agua dulce (Genes *et al.*, 2019).

Con respecto al Cr, se encontró que la concentración en los tejidos musculares superiores ($1,126 \pm 1,863$ ng/g) fue mayor al de las branquias ($0,277 \pm 0,109$ ng/g) en el bagre. En contraste, los análisis evidencian que en el bocachico la mayor concentración del metal estaba en las branquias ($0,047 \pm 0,036$ ng/g). Al comparar los resultados del Cr con las investigaciones realizadas por Fuentes *et al.* (2018) y Campo y Simanca (2019), se halló que en el tejido muscular de las especies del género *Mugil* y *Prochilodus*, organismos detritívoros como el bocachico, los niveles de Cr son similares a los que reportamos en este estudio.

En esta investigación se encontró que la mayor concentración de Hg, Pb y Zn estaba en las branquias de los peces. Este tejido es un sitio importante para la entrada de metales pesados y es el primer órgano objetivo para la exposición. La alta concentración de metales en las branquias del bagre y en el bocachico se debe posiblemente a que durante el análisis fue el tejido que presentó menor volumen de grasa en comparación con los tejidos musculares, lo que en muchos casos dificultó el trabajo con las muestras. Además, la concentración de metales en las branquias refleja que se encuentra expuesto a la contaminación de metales en la zona por ser el primer órgano del pez que entra en contacto con el agua. Asimismo, las branquias se encargan de la filtración de partículas dentro de los organismos acuáticos, de manera que las mayores concentraciones de metales son un indicio de la calidad del agua donde habitan normalmente, mientras que la concentración de los tejidos musculares representa la bioacumulación en la cadena trófica.

4. Conclusiones

En el estudio se encontró que la concentración de Pb, Hg, Zn y Cr, presentes en las branquias y en el músculo dorsal de las especies Bagre rayado y Bocachico son inferiores a los límites establecidos como seguros por la OMS para el consumo humano. Sin embargo, estos resultados no son concluyentes dado que el número de muestras fue muy bajo y los peces eran de tamaño mediano, lo cual puede llevar a una baja bioacumulación en la cadena trófica.

Asimismo, la evidencia de que los tejidos musculares de los peces evaluados en este estudio tienen concentraciones de Pb, Hg, Zn y Cr es una alerta para las autoridades dada la persistencia de estas sustancias en los ecosistemas, que incluso pueden durar muchos años. También indica que es urgente realizar investigaciones en las fuentes hídricas del país para dimensionar el problema, de manera que las autoridades establezcan medidas de control a las empresas que utilizan o generan metales pesados durante la cadena productiva. Por último, se recomienda realizar el estudio con una población más amplia de peces, tomando muestras en diferentes plazas de mercado de Bogotá y analizando otros tejidos como ovarios, hígado y riñón, que permitan establecer con mayor precisión la bioacumulación.

5. Agradecimientos

La investigación fue financiada por el departamento de Ciencias Naturales de la Universidad Central. Los autores agradecen a Leonor Hernández, Carlos Díaz y Jorge Sierra por su colaboración durante los análisis de laboratorio.

6. Referencias

- Acosta, V., & Lodeiros, C. (2004). Metales pesados en la almeja *Tivela mactroides* Born, 1778 (Bivalvia: Veneridae) en localidades costeras con diferentes grados de contaminación en Venezuela. *Ciencias Marinas*, 30(2), 323-333.
- Amador, L. R. T., Martínez, F. D. G., Hernández, L. J. M., Vergara, L. A. W., & Suárez, J. N. C. (2015). Niveles de metales pesados en muestras biológicas y su importancia en salud. *Revista Nacional de Odontología*, 11(21). <https://doi.org/10.16925/od.v11i21.895>
- Bermeo Salinas, J. F., & Célleri Marín, A. S. (2016). *Cuantificación de la cantidad de metales pesados presentes en dos especies de peces (Oncorhynchus mykiss y Cyprinus carpio), y su relación con edad y tamaño en el embalse Daniel Palacios Proyecto Hidroeléctrico Paute-Molino* [tesis de pregrado, Universidad del Azuay]. Repositorio Institucional Universidad el Azuay. <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/6263/1/12461.pdf>
- Bosch, A. C., O'Neill, B., Sigge, G. O., Kerwath, S. E., & Hoffman, L. C. (2016). Heavy metals in marine fish meat and consumer health: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(1), 32-48.

- Campo Tatis, N. P., & Simanca Martínez, K. J. (2019). *Evaluación de las concentraciones de cadmio, plomo, zinc y cromo en especies ícticas del departamento de La Guajira-Colombia y riesgo de exposición en humanos* [tesis de doctorado, Universidad de La Costa]. Repositorio Institucional Universidad de la Costa. <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/5159>
- Campos, N. H. (1992). Concentraciones de metales traza en *Ariopsis bonillai* (Pisces: Siluriformes) de Santa Marta, Caribe colombiano. *Revista de Biología Tropical*, 40(2), 179-183.
- Fuentes Gándara, F. A., Pinedo Hernández, J. J., & Marrugo Negrete, J. L. (2018). Metales pesados en especies ícticas de la ciénaga de mallorquín, Colombia. *Revista Espacios*, 39(03). <https://www.revistaespacios.com/a18v39n03/a18v39n03p19.pdf>
- Genes, J. E. A., Buelvas, V. M. P., Velásquez, C. A. J., Araújo, J. A. E., Atencio-García, V. J., & Prieto-Guevara, M. J. (2019). Comunidades planctónicas y bacterianas asociadas al cultivo de bocachico *Prochilodus magdalenae* con tecnología biofloc. *Revista MVZ Córdoba*, 24(2), 7209-7217.
- González, M., Barrientos, M., & Juárez, A. (2016). Comemos lo que vertimos. Bioacumulación y biomagnificación. <http://cta-consultoria.com/espanol/comemos-lo-que-vertimos>
- Hoyos Hernández, V. E. (2011). *Evaluación y propuesta de mejora de las condiciones higiénico-sanitarias, de distribución y procesos de la plataforma para pescados en el marco del convenio 244* [tesis de pregrado, Universidad de La Salle]. Repositorio Institucional Universidad de La Salle. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos/77/
- Licon, S. P. V., & Negrete, J. L. M. (2019). Mercurio, metilmercurio y otros metales pesados en peces de Colombia: riesgo por ingesta. *Acta Biológica Colombiana*, 24(2), 232-242.
- Madrid, G. L. (2011). Genotoxicidad de metales pesados (Hg, Zn, Cu, Pb y Cd) asociado a explotaciones mineras en pobladores de la cuenca del río San Jorge del departamento de Córdoba, Colombia. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, 1(23).
- Mancera-Rodríguez, N. J., & Álvarez-León, R. (2006). Estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en peces dulceacuícolas de Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 11(1), 3-23.
- Medeiros, R. J., dos Santos, L. M. G., Freire, A. S., Santelli, R. E., Braga, A. M. C., Krauss, T. M., & Jacob, S. D. C. (2012). Determination of inorganic trace elements in edible marine fish from Rio de Janeiro State, Brazil. *Food Control*, 23(2), 535-541.
- Olivero, J., & Johnson, B. (2002). *El lado gris de la minería del oro: la contaminación con mercurio en el norte de Colombia*. Editorial Universitaria.
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2018, agosto 23). Intoxicación por plomo y salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>

- Ortega, E. R., Doria, M. C., Arenas, G.V., Dávila, F. S., Zare, E. G., & Ordóñez, E. S. (2020). Bioacumulación de metales pesados en tres especies de peces bentónicos del río Monzón, región Huánuco. *Rebiol*, 40(1), 69-78.
- Ortega, M. (2014). Niveles de plomo y mercurio en muestras de carne de pescado importado y local. *Pediatría*, 47(3), 51-54.
- Pérez, R. (2011). Efecto de los metales pesados en el medio ambiente y la salud humana. Pinar del Río. Cuba: Departamento de Geología, Universidad de Pinar del Río “Hermanos Saíz Montes de Oca”. Minería y Geología.
- Rajeshkumar, S., & Li, X. (2018). Bioaccumulation of heavy metals in fish species from the Meiliang Bay, Taihu Lake, China. *Toxicology Reports*, 5, 288-295.
- Scherz, H., & Kirchhoff, E. (2006). Trace elements in foods: zinc contents of raw foods —a comparison of data originating from different geographical regions of the world. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(5), 420-433.
- Verbel, J. (2011). *Efectos de la minería en Colombia sobre la salud humana*. Univ. Cart, 5-13. <https://bit.ly/3ysZYGI>

Problemática ambiental generada por lixiviados en Bogotá

Environmental problems generated by leachates in Bogota

Angélica María Quintero Gualteros* y Luisa Fernanda Melo Suárez**

Cómo citar:

Quintero Gualteros, A. M., & Melo Suárez, L. F. (2019). Problemática ambiental generada por lixiviados en Bogotá. *Ingeciencia*, 4, 66-78

* Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Central. Correo: aquinterog1@ucentral.edu.co
** Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Central. Correo: lmelos1@ucentral.edu.co

Resumen

Los lixiviados en rellenos sanitarios son producidos por factores como las condiciones climáticas, el diseño y la operación del relleno, la composición de los residuos sólidos, el mal manejo de estos residuos en la comunidad y la falta de una mejor estructura para el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos de Bogotá. El objetivo del estudio es informar sobre la problemática ambiental ocasionada por los lixiviados del relleno sanitario Doña Juana, teniendo en cuenta sus causas e impacto en el medioambiente y la comunidad. Mediante un *causal loop diagram*, se identificaron las variables con mayor impacto y su relación causal para una mejor profundización, conceptualización y comprensión del problema. La visita al área de influencia del relleno sanitario permitió analizar la situación, determinar la relación con la comunidad vecina e identificar las consecuencias ambientales y sociales.

Palabras clave: contaminación, lixiviados, relleno sanitario, impacto ambiental.

Abstract

Leachates in sanitary landfills are produced by factors such as climatic conditions, landfill design and operation, solid waste composition, mismanagement of this type of waste in the community, and lack of a better structure for the Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos of Bogotá. This study aims to inform about the environmental issues caused by the leachates generated in the Doña Juana landfill, considering its causes and impact on the environment and the community. Using a causal loop diagram, the variables with the greater impact and their causal relationship were identified to have better insights, conceptualization and understanding of the problem. The visit to the area of influence allowed to analyze the situation, determine the relation with the neighboring community and identify the environmental and social consequences.

Keywords: pollution, leachates, landfill, environmental impact.

1. Introducción

Bogotá es la ciudad más grande de Colombia, actualmente cuenta con 8 millones de habitantes y, debido a su crecimiento económico, la demanda de bienes y servicios es cada vez mayor. El incremento de las basuras y su falta de control son algunos de los problemas ambientales que más afectan a la ciudad. Según el ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Luis Gilberto Murillo, “Bogotá genera unas 7500 toneladas al día y se reciclan entre 14% y 15% de estas” (Dinero, 2017); el resto es llevado al relleno sanitario Doña Juana. Ubicado en la localidad de Ciudad Bolívar, entre los sectores de Mochuelo Alto y Mochuelo Bajo, este relleno es el principal vertedero de Bogotá. Debido a la mala gestión de los residuos y la falta de estructura, ha colapsado en diversas ocasiones generando derrumbes que afectan a la comunidad vecina.

El problema se agudiza considerando que la producción de basura per cápita incrementa un kilogramo por habitante al día. La descomposición de estos residuos aumenta y, junto con los líquidos que entran al relleno de fuentes externas como la lluvia, forman un fluido altamente tóxico llamado *lixiviado*, que tiene un impacto significativo para el medio físico, químico y biológico. La filtración de este líquido en el suelo genera contaminación en las aguas subterráneas y malos olores durante el proceso de descomposición.

Aunque el relleno tiene una planta de tratamiento de lixiviados, esta no cuenta con la capacidad suficiente para realizar una limpieza adecuada. Según información tomada de diferentes entidades, como la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP, 2017a, 2017b) y la Contraloría de Bogotá (2016), se determina que no es posible llevar a cabo la descontaminación de estos líquidos pues, debido a fallas y grietas en las máquinas de la planta, se presentan filtraciones que contaminan el caudal del río Tunjuelo.

Además, un informe de auditoría de la Contraloría General de la República (2019) advierte sobre los problemas en la estructura del relleno y la planta de tratamiento que impiden su correcta operación, de modo que estos líquidos no cumplen con las normas de vertimientos y demás parámetros ambientales. Por otro lado, la UAESP (2017a) afirmó que se haría un reforzamiento estructural y una optimización en la planta de tratamiento; además, se está llevando a cabo un proceso de reforestación y mitigación del impacto ambiental con jornadas voluntarias de siembra al interior del relleno.

Este trabajo analiza los efectos de los lixiviados del relleno sanitario Doña Juana sobre el medioambiente y las comunidades aledañas. Para esto, se identifican las principales actividades que se realizan en el relleno sanitario, se evalúan las causas y consecuencias que generan los lixiviados y, finalmente, se proponen medidas de control y mitigación de daños.

2. Marco teórico

El relleno sanitario Doña Juana está ubicado en la localidad de Ciudad Bolívar, entre los barrios Mochuelo Alto y Mochuelo Bajo, en la margen izquierda del Río Tunjuelo, sobre la autopista a Villavicencio (figura 1).

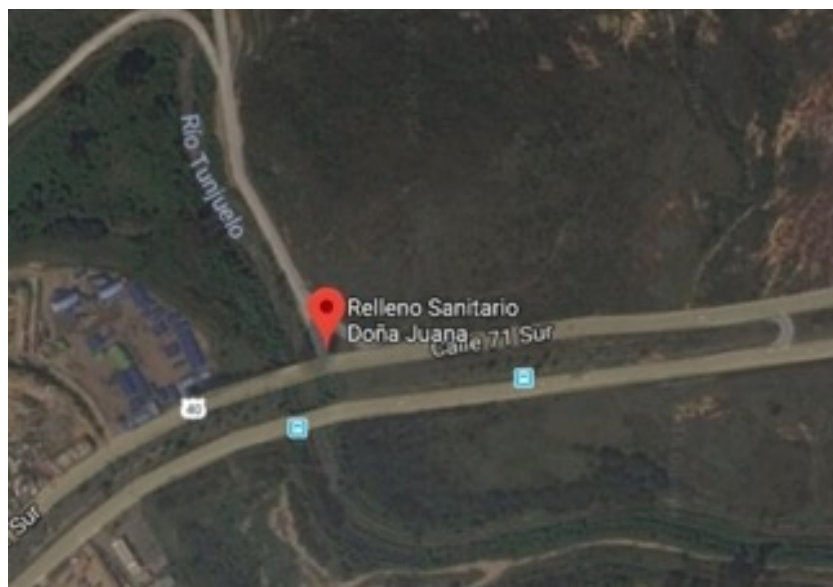


Figura 1. Ubicación del relleno sanitario Doña Juana.

Fuente: Google Maps.

La localización del relleno Doña Juana no es la más apta, pues se encuentra cerca de asentamientos humanos en las localidades de Usme y Ciudad Bolívar. Según la restricción ambiental, debería estar ubicado como mínimo a 1000 metros de distancia de grupos poblacionales; sin embargo, actualmente se ubica a unos cuantos metros de las veredas Mochuelo Alto y Mochuelo Bajo (Personería de Bogotá, 2017). Por otro lado, debido a la falta de control del ingreso de residuos, el depósito ilegal de residuos peligrosos (Respel) provoca graves consecuencias en el medioambiente y la salud humana.

Doña Juana ha sido una alternativa para el tratamiento y la disposición final de los residuos sólidos (Resol) generados en la capital del país y algunos municipios aledaños, por lo que durante muchos años ha recibido miles de toneladas de residuos. En la actualidad, la cantidad es tal que los daños ocasionados vulneran el derecho de gozar de un ambiente sano establecido por el artículo 79 de la Constitución Política de Colombia de 1991.

La disposición final de Resol genera la contaminación de agua, aire y suelo, así como la proliferación de fauna nociva (ratas, cucarachas, moscos, entre otros). El proceso de descomposición de los residuos, según Kiss y Encarnación (2006), “favorecen la emisión de productos contaminantes que pueden ser un riesgo potencial al ambiente y a la salud, entre los que se encuentran los lixiviados y el biogás, mismos que requieren de un manejo adecuado acorde a la normatividad ambiental” (p. 39). De acuerdo con Díaz *et al.* (2017), “la descomposición de los residuos orgánicos produce principalmente metano (CH_4), el mayor contribuyente al calentamiento global entre los gases de efecto invernadero, después del dióxido de carbono (CO_2). El potencial de calentamiento global del metano es 21 veces mayor que el del dióxido”.

La producción de lixiviados está influenciada por diferentes factores como la composición de los Resol dispuestos, las generalidades del terreno, el nivel de precipitación de la zona y el manejo descubierto de áreas. Las generalidades del terreno permiten que debido a la fuerza de gravedad el lixiviado fluya por toda la superficie como escorrentía,

arrastrando a su paso “material disuelto, en suspensión, fijo o volátil, lo que provoca que tengan elevadas cargas orgánicas y un color que varía desde café-pardo-grisáceo cuando están frescos hasta un color negro viscoso cuando envejecen” (Luna, 2008, p. 19). Los lixiviados contienen varios contaminantes cuya concentración varía con el paso el tiempo entre los que se cuentan “alto contenido de materia orgánica, alto contenido de nitrógeno y fósforo, presencia abundante de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados y constituyentes orgánicos” (Giraldo, 2001, p. 44). La tabla 1 muestra las características de los lixiviados teniendo en cuenta su tiempo de duración.

Tabla 1. Comparación de características de los lixiviados de rellenos sanitarios

Característica	Lixiviado joven	Lixiviado viejo
DBO	Muy alto	Bajo
DQO	Muy alto	Alto
Amoniac	Muy alto	Alto
Fósforo	Usualmente deficiente	Suficiente
pH	Muy bajo	Bajo
Detergentes	Muy altos	Bajos
Sales disueltas	Muy altas	Bajas (relativamente)
Agentes incrustantes (Fe, Ca, Mg)	Muy altos	Bajos
Metales pesados	Muy altos	Bajos

Fuente: Giraldo (2001).

Los lixiviados contaminan las aguas superficiales y subterráneas, emanan gases como el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂), y ocasionan una dispersión de bacterias fermentativas, metanogénicas, acetoclásticas y acetogénicas en el suelo, el cual luego de un tiempo puede quedar inerte por el daño en sus capas. Estos líquidos son considerados efluentes tóxicos y como tales pueden aumentar la mortalidad de flora y fauna y convertirse en un problema de salud pública. La tabla 2 presenta algunos de sus efectos en la salud humana.

Tabla 2. Efecto negativo de metales presentes en lixiviados sobre la salud humana

Metal	Efectos negativos
Arsénico	Afecciones en sistemas cardiovascular, respiratorio, nervioso periférico y reproductivo. Daños en hígado y riñón. Efecto cancerígeno y potencialmente teratogénico.
Cadmio	Alteraciones en sistemas nervioso central, reproductivo y respiratorio. Daños en riñón. Posible efecto cancerígeno y teratogénico.
Cromo	Enfermedades del sistema respiratorio, alergias e irritación en ojos. Posible efecto cancerígeno y mutagénico.
Plomo	Alteraciones en sistema nervioso central y reproductivo. Daños en células de la sangre. Probable efecto teratogénico.
Mercurio	Afecciones en sistemas nervioso central, cardiovascular y respiratorio. Daños en riñones y ojos. Efecto teratogénico.
Níquel	Enfermedades del sistema respiratorio, alergias, irritación ojos. Daños en piel, hígado y riñones. Probable efecto cancerígeno y teratogénico.

Fuente: Luna (2008).

Actualmente, el relleno sanitario genera 25 litros por segundo de lixiviados, que son tratados en la planta de tratamiento de lixiviados del relleno. Esta es una gran cantidad, si se considera que dicha planta solo tiene capacidad para tratar 15 litros por segundo, por lo cual su capacidad es sobrepasada significativamente. Este fluido es conducido a la entrada de la planta de tratamiento donde se distribuye por medio de válvulas de compuerta a los canales rectangulares de los pondajes de la planta, donde se retiene por dos días (figura 2). Allí se regula el caudal que entra a la planta y se precipitan los sólidos suspendidos totales (SST). El caudal de lixiviado que se trata en la planta se regula controlando la salida con un sistema de bombeo. Los SST y los metales del lixiviado crudo se tratan mediante un proceso físico-químico que consiste en adicionar cal al lixiviado para facilitar el proceso de floculación, manteniendo el pH del líquido entre 9,0 y 9,5.



Figura 2. Planta de tratamiento de lixiviados.

Fuente: Redacción Bogotá (2017).

Después, el líquido pasa por un decantador primario donde se retienen los SST con la cal anteriormente añadida. Los lodos sedimentados son extraídos por el fondo del decantador. Este lixiviado clarificado y con menor concentración de metales se transporta a la cámara de neutralización, donde se le adiciona ácido sulfúrico cuando es necesario corregir el pH y ácido fosfórico cuando se necesita aumentar la concentración de fósforo para que el tratamiento tenga las condiciones de nutrientes adecuadas.

En los reactores biológicos se realiza la remoción de nitrógeno, la limpieza de materia orgánica y la disminución de concentración de metales. Como consecuencia de este tratamiento se generan lodos biológicos que son separados en el decantador secundario para ser enviados al proceso de deshidratación. Allí se desprenden gases como nitrógeno y CO_2 , que son controlados con antiespumante.

Posteriormente, el lixiviado pasa al tanque de posdesnitrificación para terminar de reducir el nitrógeno gaseoso y luego se transporta al decantador secundario, donde se separan los lodos biológicos mediante el proceso de sedimentación y se retiran los lodos en el fondo del tanque. Finalmente, el líquido tratado es enviado al río Tunjuelo y los lodos extraídos y deshidratados a celdas donde se almacenan para su disposición final. El lixiviado que entra a la planta puede tener entre 9000 y 12000 ppm y tras el proceso de tratamiento es enviado al río Tunjuelo con una proporción de ≤ 100 ppm de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), concentración que no produce gran impacto en el medio.

Componente biótico	
Cobertura vegetal	Pastos
	Rastrojo bajo
	Cultivos de papa y arveja y potreros con pastos
	Bosque de galería
	Rastrojo bajo con alto proceso erosivo
	Áreas de extracción minera
	Zonas rellenadas con residuos sólidos
	Bosque cultivado
	Área urbana
	Asentamiento poblacional

Descripción de las zonas	
Zona I (caja 7)	Estuvo activa entre septiembre de 1993 y febrero de 1995 y funcionó según el diseño original. Tal diseño no incluyó tratamiento de lixiviados ni manejo de residuos peligrosos. En cuanto al manejo de gases, se construyeron chimeneas en piedra en todos los niveles de basura. Actualmente se encuentra clausurada y empradizada.
Zona Mansión	Operó entre febrero y octubre de 1995 y contó con un sistema de extracción forzada de gases. Actualmente se encuentra clausurada y empradizada.
Zona II	Recibió residuos desde octubre de 1995 hasta el 27 de septiembre de 1997, día en que colapsaron aproximadamente un millón de toneladas de residuos de los tres millones que se habían dispuesto. A esta zona se le había calculado una vida útil de 4 a 5 años aproximadamente; no obstante, estuvo en operación 1,5 años. El manejo de los lixiviados se realizaba por recirculación dentro de la masa de basura, por lo que dependía del buen funcionamiento del sistema de drenaje que mantenía el equilibrio entre la cantidad de líquido entrante y la saliente. El sistema falló produciendo un aumento de la presión de líquidos y gases en los poros de la masa de basura, lo cual ocasionó cambios en las características del material y, dada la configuración geométrica de diseño, el material se tornó inestable y se produjo un derrumbe de la celda que represó el río Tunjuelo.
Zona III	Inicialmente se planeó que en esta zona operaran las celdas de seguridad para residuos peligrosos. Sin embargo, se utilizó para la disposición de residuos convencionales y se anexó a la Zona II.
Zona IV	Operó entre el 28 de septiembre de 1997 y enero de 1999. Fue utilizada como zona de emergencia cuando ocurrió el deslizamiento en la Zona II. Actualmente está clausurada y revegetalizada.
Zona V	No se utilizó para la disposición final de residuos, en su lugar se construyó la Planta de Tratamiento de Lixiviados.
Zona VI	En la actualidad está adecuada como zona de emergencia y cuenta con una vida útil calculada a un mes.
Zona VII	Operó desde enero de 1999 hasta septiembre de 2002 con una capacidad superior a los 3 000 000 de toneladas de residuos sólidos.
Zona VIII	Inició su operación en marzo de 2002 (hasta octubre de 2008) con una vida útil calculada de 4,5 años. Se localiza en el sector suroccidental del predio de Doña Juana. Para garantizar la continuidad en la prestación del servicio de disposición final y con el objeto de utilizar esta zona, el operador del relleno adelantó los estudios de impacto ambiental con base en los términos de referencia entregados por la CAR y efectuó el diseño a detalle para la nueva zona de disposición final.

Sistema actual de operación	
Entrada al relleno	El depósito de residuos se realiza mediante actividades de arrastre, distribución, disgregación y compactación sobre un sistema de terrazas previamente adecuadas e impermeabilizadas. Los vehículos recolectores ingresan al relleno y luego de ser pesados en la báscula de entrada se dirigen por vía pavimentada hasta la zona en operación. Posteriormente, por vías temporales, ingresan y depositan los residuos.
Residuos	Son disgregados en el frente de trabajo y transportados a los diferentes niveles de las terrazas, donde se someten a un proceso de compactación.
Áreas de relleno	Son cubiertas temporalmente con un material impermeable mientras se alcanza la cota de diseño. Luego se procede a su cobertura definitiva, que se realiza con arcilla (mezcla de tierra negra y biosólido estabilizado) recubierta con cespedón. En la construcción de las terrazas se implementa un sistema de impermeabilización de fondo para prevenir las infiltraciones al subsuelo y la contaminación a las aguas subterráneas. El sistema de drenaje constituido por trincheras y filtros de fondo permite evacuar los lixiviados por la línea de conducción a través del dique de contención hasta los pondajes de almacenamiento y regulación, y luego hasta la planta de tratamiento de lixiviados.
Gases	Son evacuados durante la operación a través de chimeneas construidas en tubería y gavión, y chimeneas que se perforan luego del cierre de una terraza.
Monitoreo establecido por el Plan de Manejo Ambiental (PMA)	Aguas de escorrentía. Calidad del agua potable. Monitoreo hidrobiológico. Calidad del agua de las corrientes superficiales y subsuperficiales. Manejo y monitoreo de lixiviados. Monitoreo de las aguas del pondaje de la celda de hospitalarios. Monitoreo de ruido ambiental. Monitoreo de partículas suspendidas totales. Monitoreo de olores. Gases de chimeneas. Calidad del aire (gases). Caracterización de biosólidos.

Contexto local	
Vereda Mochuelo Alto	Según lo establecido por la Alcaldía Local de Ciudad Bolívar, “con un área total de 1455,07 hectáreas y un 15,14% de participación sobre el suelo rural de la localidad, la vereda limita al norte con el área urbana de la localidad de Ciudad Bolívar y la vereda de Mochuelo Bajo, al occidente con la vereda de Quiba Alta, al sur con la vereda Pasquilla y al oriente con el área urbana la localidad” (Alcaldía Local de Ciudad Bolívar, s.f.).
Vereda Mochuelo Bajo	La Alcaldía Local de Ciudad Bolívar indica que “con un área total de 828,54 hectáreas y un 8,62% de participación sobre el suelo rural de la localidad, la vereda limita al norte y al oriente con el área urbana de la localidad, al sur con la vereda de Mochuelo Alto y al occidente con las veredas de Quiba Alta y Quiba Baja” (Alcaldía Local de Ciudad Bolívar, s.f.).
Generalidades	Mochuelo Alto y Mochuelo Bajo eran veredas en condiciones exclusivamente rurales no urbanas como se encuentran hoy en día. El cambio más relevante que han tenido se debe a las alteraciones del medio ambiente y la salud pública como consecuencia del sistema de operación del relleno sanitario Doña Juana. Por lo anterior, se establece que es de vital importancia hacer énfasis en la gestión ambiental y social, con apoyo y vigilancia del Estado en la resolución de conflictos ambientales y sociales en estos territorios, para recuperar la ética ambiental y reivindicar los derechos humanos vulnerados en estos grupos poblacionales.

Fuente: elaboración propia.

Tras consultar en diversas fuentes (libros, páginas web, entre otros), se determinó el sistema de operación actual, el impacto en las comunidades aledañas y el impacto ambiental del relleno, teniendo en cuenta que ya casi cumple su vida útil. Según los habitantes de los alrededores, dado que las sanciones impuestas al operador del relleno no han sido suficientes, sería pertinente la cancelación del contrato debido a los incumplimientos en la licencia ambiental y el contrato de operación. Además, se deberían implementar tecnologías para el aprovechamiento de los residuos sólidos, la producción de energía limpia y otros aspectos

que mitiguen el impacto ambiental. Este problema ha recibido una única respuesta: “No hay plata”, ya que se necesitan cerca de 20 000 millones de pesos para mejorar esta situación. Por otra parte, los habitantes no quieren que se repita otra catástrofe ambiental como la que ocurrió en 2015, cuando se desplomaron 700 000 toneladas de basura.

Sin embargo, no solo el recurso monetario es indispensable, otros factores son determinantes, como la falta de reciclaje por parte de la ciudadanía, los intereses de los políticos, la falta de atención por parte del gobierno. A esto se suma la planta de tratamiento de lixiviados, que fue construida hace 20 años con una capacidad para 14 litros por segundo y actualmente opera a 25 litros por segundo, casi el doble, por lo que presenta algunas fallas y grietas en la infraestructura. Es evidente que se requiere modernizar la planta —lo cual tendría un costo aproximado de 120 000 millones de pesos— para evitar la contaminación del suelo y el tratamiento incompleto de los lixiviados antes de ser arrojados al río Tunjuelo.

4.1. Contextualización de la encuesta

La encuesta se llevó a cabo en las veredas La Aurora, Mochuelo Alto y Mochuelo Bajo de la localidad de Ciudad Bolívar. Se diseñó un formato con preguntas sobre la problemática estudiada y para su debido cumplimiento fue necesario responder la totalidad de las preguntas, por lo que no se dejaron respuestas en blanco (tabla 4).

Tabla 4. Encuesta aplicada a la comunidad aledaña al relleno sanitario Doña Juana.

Pregunta	Respuesta	Cantidad de personas (n=19)	Porcentaje
1. ¿Se ve afectado por la situación del relleno sanitario?	No	6	32 %
	Sí	13	68 %
2. ¿Las acciones de mejora que ha pronunciado el gobierno han funcionado?	No	7	37 %
	No sé	6	32 %
3. ¿Conoce acerca el concepto de lixiviado?	Sí	6	32 %
	No	6	32 %
4. ¿Cree que la problemática del relleno sanitario y de las basuras de Bogotá es culpa del Estado?	Sí	13	68 %
	No	0	0 %
5. ¿Se ve afectado en la salud por la situación del relleno?	Sí	19	100 %
	No	6	32 %
6. ¿Se ve afectado por el incremento de plagas en su hogar?	Sí	13	68 %
	No	6	32 %
7. ¿Sus hijos y su familia se ven afectados por esta problemática?	Sí	13	68 %
	No	6	32 %
8. ¿Cree que esta problemática afecta al medioambiente?	Sí	19	100 %
	No	0	0 %
9. ¿Cree que esta problemática seguirá aumentando?	Sí	19	100 %
	No	0	0 %
10. ¿Procura aplicar el reciclaje en su hogar?	Sí	8	42 %
	No	11	58 %

Fuente: elaboración propia.

En total, 13 de las 19 personas devolvieron la encuesta con comentarios sobre la problemática que se referían, la mayoría, a su inconformidad frente a soluciones acordadas por el Estado que nunca fueron implementadas. Por tal razón, la comunidad se ve obligada a realizar huelgas, asambleas y juntas comunales con el fin de recibir ayuda. También afirmaron que constantemente sufren efectos negativos en su salud tales como complicaciones respiratorias, alteraciones en el crecimiento de los niños y malestares generales. Además, manifestaron incomodidad causada por el ruido de los camiones de basura en horas de la tarde-noche y madrugada.

Ante la pregunta sobre el estado de la planta de lixiviados, afirmaron que no está funcionando de forma adecuada y contamina de cierta forma el río Tunjuelo. También manifestaron indignación porque en la última reunión con los líderes de la Asamblea Sur y representantes del Estado se comunicó que se prolongaría la vida útil del Doña Juana hasta el año 2022. La comunidad vive con el temor de ser despojados de sus tierras para la ampliación del relleno.

4.2. Análisis de diagrama causal

Mediante el diseño y análisis del CLD (figura 7) se determinaron tres principales variables entre de las cuales se derivan aspectos positivos y negativos que forman un ciclo (bucle): la contaminación del aire, del agua y del suelo. La calidad del aire se ve afectada no solo por el olor de la basura en descomposición, sino por los lixiviados, que al ser almacenados en un pondaje, generan dos problemáticas. La primera es el incremento de la proliferación de bacterias fermentativas, metanogénicas, acetoclásticas y acetogénicas, las cuales afectan a la fauna nociva. Esta fauna disminuye la calidad de la salud de la comunidad y aumenta el riesgo de sufrir enfermedades como leptospirosis, fiebre por dengue, zika, entre otras. La segunda es la evaporación y generación de gases tóxicos como el metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), que al ser responsables del efecto invernadero disminuyen la calidad del aire y aumentan el riesgo de sufrir enfermedades respiratorias y cáncer de piel.

El suelo se ve afectado por el efecto de infiltración de sustancias contaminantes, que disminuyen su calidad y los nutrientes de la capa vegetal, importantes en el crecimiento de los cultivos. Esto incrementa la pérdida de diversos cultivos y, por tanto, disminuye la producción agrícola. El menor abastecimiento aumenta los precios de diversos productos y genera un desequilibrio económico. Además, las pérdidas para los agricultores ocasionan una mayor explotación y contaminación del suelo, y la descomposición de estos cultivos aumenta la generación de lixiviados.

Por otra parte, al aumentar el nivel de precipitación (lluvias), incrementa la escorrentía superficial, que contamina las fuentes receptoras como ríos, lagos y estuarios y aumenta así la mortandad de peces y demás especies acuícolas. Asimismo, la saturación en el medio crea una percolación de sustancias tóxicas que no solo generan más lixiviados, sino también propician su filtración a través del suelo. Esto incrementa la contaminación del agua subterránea por compuestos orgánicos volátiles y disminuye así el abastecimiento de agua por medio de pozos sumeros. La posibilidad de enfermedades en el sistema nervioso y gastrointestinales en la población aumenta ante este escenario. Además, la filtración de los lixiviados aumenta el número de materia orgánica presente, que a su vez incrementa la demanda de oxígeno disuelto presente, lo que incrementa la mortalidad de peces y especies acuícolas.

5. Conclusiones

Los lixiviados producidos en el relleno sanitario Doña Juana generan contaminación en el agua, el suelo y el aire, lo cual tiene un impacto negativo en el medioambiente y en la comunidad. La falta de cultura y conciencia ambiental de la población ha contribuido a agudizar esta problemática. Se requiere de la implementación de la estrategia 3R (reducir, reciclar y reutilizar) en los hogares y la participación del Estado para mejorar la situación del relleno sanitario y brindar una pronta solución a la población afectada.

Referencias

- Alcaldía Local de Ciudad Bolívar. (s. f.). Vereda Mochuelo Alto. Bogotá, Colombia. <http://bit.ly/2IohJxY>
- Alcaldía Local de Ciudad Bolívar. (s. f.). Vereda Mochuelo Bajo. Bogotá, Colombia. <http://bit.ly/30QkU81>
- Contraloría de Bogotá. (2016). *Informe de auditoría de regularidad. Código 190. UAESP*. <https://bit.ly/338tHH2>
- Contraloría General de la República. (2019). *Informe de auditoría de desempeño. Gestión del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS y Autoridades Ambientales en Desarrollo...* <https://bit.ly/2EGHMC1>
- Díaz, A., Martínez, A., Moreno, G., Velandia, D., Acosta, K., & Tamayo-Figueroa, D. (2017). Problemática de basuras en el relleno sanitario Doña Juana. Fundación Universitaria Horizonte. <http://bit.ly/2Mdv2m6>.
- Dinero*. (2017, 31 de agosto). Colombia genera 12 millones de toneladas de basura y solo recicla el 17%. <https://bit.ly/3cFXTwj>
- Giraldo, E. (2001). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: Avances Recientes. 44-45. Consultado en <http://bit.ly/35b0fyX>.
- Kiss, G., & Encarnación, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica*, 79, 39-51.
- Luna, M. (2008). *Sistemas de tratamiento para lixiviados generados en rellenos sanitarios* [trabajo de grado, Ingeniería Civil, Universidad De Sucre]. Repositorio Unisucre. <http://bit.ly/2AFvYdM>.
- Personería de Bogotá. (2017, 18 de mayo). *Doña Juana: Relleno de irregularidades*. <http://bit.ly/2VcltIa>.
- Redacción Bogotá (2017a, 1 de marzo). Sigue preocupación por lixiviados en Doña Juana. *El Espectador*. <http://bit.ly/2oUOegI>.
- Redacción Bogotá. (2017b, 18 de mayo). Denuncian irregularidades en el relleno sanitario Doña Juana. *El Espectador*. <https://bit.ly/3g9Msx2>

Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP). (2017a). *Espacio de diálogo ciudadano sectorial del hábitat en el marco del proceso de rendición de cuentas de la Administración Distrital 2017* [informe]. Bogotá.

Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP). (2017b). *Seguimiento avance Plan de Supervisión y Control de Servicio de Disposición Final*. <https://bit.ly/33ZWuws>

Zonificación ambiental por riesgo de erosión en la vereda El Hato, municipio de Choachí, asociada al cultivo de girasol

Environmental zoning for erosion risk in the village El Hato of the Choachí municipality associated with sunflower cultivation

Wendy Yineth Peñuela Rincón*, María Fernanda Tocora Rodríguez**
y Laura Victoria Mahecha Anzola***

Cómo citar:

Peñuela Rincón, W. Y., Tocora Rodríguez, M. F., & Mahecha Anzola, L. V. (2019). Zonificación ambiental por riesgo de erosión en la vereda El Hato, municipio de Choachí, asociada al cultivo de girasol. *Ingeciencia*, 4, 79-96.

* Ingeniera ambiental, Universidad Central. Correo: wpenuelar@ucentral.edu.co
** Ingeniera ambiental, Universidad Central. Correo: mtocorar@ucentral.edu.co
*** Ingeniera ambiental. Docente del Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad Central. Correo: lmahechaa@ucentral.edu.co

Resumen

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), en 2014 el 40% de la superficie continental de Colombia presentaba degradación, la cual genera consecuencias ambientales, sociales y económicas a nivel nacional, regional y local. Por lo tanto, el presente estudio tuvo como objetivo realizar la zonificación ambiental de riesgo por erosión hídrica en los cultivos de girasol de la vereda El Hato del municipio de Choachí, Cundinamarca. Para el procesamiento de datos se implementaron dos metodologías: la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por su sigla en inglés), para identificar la amenaza, y la superposición ponderada, para evaluar la vulnerabilidad física. La investigación evidenció que la zona de estudio comprende un área de 355,98 hectáreas, de las cuales 217,7 se encuentran en un riesgo de erosión hídrica muy bajo. Además, de las 8,8 hectáreas de cultivo de girasol, aproximadamente 7,3 presentan riesgo de erosión muy bajo, comportamiento que depende de características climatológicas, geográficas y de la localización de las infraestructuras propias de la región. Finalmente, la evaluación del riesgo permitió plantear recomendaciones enfocadas en la mitigación y control de la erosión hídrica, las cuales aportarán a la Alcaldía Municipal y sus agricultores.

Palabras claves: actividad agrícola, amenaza, degradación, pérdida de suelo, vulnerabilidad.

Abstract

According to the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (Ideam) and the Ministry of Environment and Sustainable Development (MADS), by 2014, 40% of Colombia's continental surface area was degraded, with environmental, social and economic consequences at the national, regional and local levels. Therefore, the present study aimed to carry out the environmental zoning of erosion risk in the sunflower crops of the El Hato district in the municipality of Choachí, Cundinamarca. Two methodologies were implemented for data processing: the Universal Soil Loss Equation (USLE), to identify the threat, and the weighted overlay, to assess physical vulnerability. Through the development of the work, it became evident that the study zone comprises an area of 355,98 hectares, of which 217,7 are at a very low risk of water erosion. In addition, of the approximately 8,8 hectares of sunflower cultivation, 7,3 of these present a very low risk of erosion. This behavior depends on climatic and geographical characteristics and the location of the region's own infrastructure. Finally, the risk assessment led recommendations focused on the mitigation and control of water erosion, which will be provided to the City Hall and its farmers.

Keywords: agricultural activity, degradation, soil loss, threat, vulnerability.

1. Introducción

La erosión hídrica del suelo genera pérdida de la capa superficial de la corteza terrestre por acción del agua. En este proceso intervienen factores naturales y antrópicos que desencadenan cambios negativos en las funciones y propiedades del suelo (Gutiérrez & Pinzón, 2017).

En el año 2017, un estudio desarrollado por Castro *et al.* señala que la erosión hídrica de suelos en Colombia es un problema que afecta directamente su fertilidad, ocasiona baja producción de los cultivos e incrementa los costos de producción, de manera que determina el riesgo potencial de erosión de la zona de estudio. Sin embargo, actualmente en Colombia no existen suficientes estudios en los que se señale la magnitud del problema en diferentes zonas geográficas, ni las consecuencias socioambientales que genera este fenómeno (Ayala & Lozano, 2016).

En el año 2015, un estudio realizado por Rodríguez y García, denominado “Diagnóstico ambiental del turismo de naturaleza del municipio de Choachí”, menciona que el Parque Ecológico Matarredonda, el Parque Aventura la Chorrera y el centro turístico Aguas Termales de Santa Mónica son tres sitios destinados a actividades ecoturísticas que han generado una oportunidad de desarrollo económico y cultural. Con base en los estudios, se obtuvo que geomorfológicamente se encuentran ubicados en un área montañosa con laderas, cerros elevados y suelos con pendientes mayores al 40%, una topografía abrupta que los limita exclusivamente a uso de conservación forestal, además de procesos leves de erosión hídrica, los cuales se deben a la práctica de actividades pecuarias, expansión de áreas para la construcción de senderos, acumulación de materiales como leña y escombros y la remoción de la cobertura vegetal. A partir de allí, se identifican zonas del municipio con pocos estudios de degradación del suelo, por lo que se hace necesario realizar investigaciones que permitan reconocer las áreas que están en riesgo de presentar este fenómeno erosivo.

Específicamente, este proyecto hace la zonificación ambiental de riesgo por erosión hídrica de la vereda El Hato del municipio de Choachí (Cundinamarca) asociada al cultivo de girasol, a una escala de 1:16 000. La zonificación aporta a la planificación del uso de la tierra y la gestión del territorio, además proporciona información sobre el uso, la capacidad y la fragilidad del área.

2. Materiales y métodos

La zonificación ambiental se desarrolló a partir de un análisis cualitativo y cuantitativo de la amenaza y la vulnerabilidad. Con este propósito se desarrollaron dos metodologías, las cuales permitieron reconocer las diferentes variables presentes en la zona de estudio mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

La primera metodología, que se implementó para categorizar la amenaza, fue la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por su sigla en inglés), desarrollada por Wischmeier y Smith en 1978. La segunda metodología se aplicó para identificar la vulnerabilidad por medio de la superposición ponderada de planos. Las dos metodologías permitieron identificar y analizar el riesgo por erosión hídrica de la vereda El Hato (figura 1). Para determinar los dos factores se realizó una clasificación en cinco niveles —donde uno (1) es el más bajo y cinco (5) el más alto— para evaluar la erosión del suelo de la vereda por medio de elaboración cartográfica a una escala de 1:16 000.

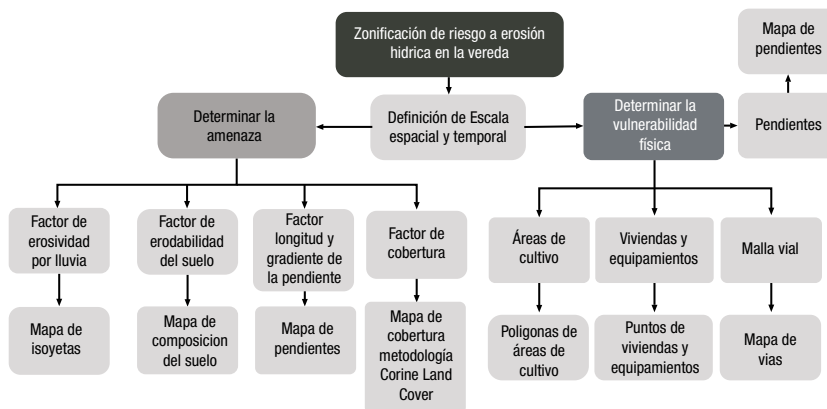


Figura 1. Metodología para hacer la zonificación de erosión hídrica. Fuente: adaptada de Gaitán *et al.* (2017) y Ospina (2015).

2.1 Evaluación de la amenaza

La metodología USLE considera la interacción de factores naturales y antrópicos (ecuación 1).

$$A = R * K * LS * C * P \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde,

A: Pérdida de suelo por unidad de superficie (tonelada/hectárea * año).

R: Factor de erosividad por lluvia.

K: Factor de erodabilidad del suelo.

LS: Factor longitud y gradiente de la pendiente.

C: Factor cobertura.

P: Factor de prácticas de conservación del suelo.

Las pérdidas de suelo por erosión se estimaron mediante la multiplicación de los factores R, K, LS y C, los cuales se describen posteriormente. El factor P no se tuvo en cuenta debido a la falta de información sobre las prácticas y manejos específicos dentro de la zona de estudio.

El factor R permite cuantificar el impacto de la lluvia y la tasa de escorrentía asociada a los eventos de precipitación (Loaiza & Da Silva, 2018). Para determinarlo se utilizó el índice de Fournier modificado (IFM) (ecuación 2), usando la información de los registros mensuales de lluvia de los últimos diez años, en tres estaciones de la red climatológica del Ideam más cercanas a la zona de estudio.

$$IFM = \sum_{i=1}^n \frac{pi^2}{P} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde,

pi= precipitación máxima mensual (mm).

P= precipitación total anual (mm).

La determinación del factor K indica la vulnerabilidad al desprendimiento y al transporte de suelo por medio de las gotas de lluvia y de escorrentía (Loaiza & Da Silva, 2018). Este fue generado a partir de la reclasificación del mapa de suelo digital del mundo (DSMW, por su sigla en inglés) de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por su sigla en inglés) a escala 1:5000.00, de acuerdo con los contenidos de arena, limo, arcilla y materia orgánica de la zona de estudio.

El factor de porcentaje de contenido bajo de arena (ecuación 3) reduce el indicador K; el factor de porcentaje de arcilla y limo (ecuación 4) genera factores bajos de erosión cuando hay proporciones altas de arcilla y limo; el factor de porcentaje de carbono orgánico (ecuación 5) reduce valores de K en suelos con altos contenidos de carbono, y el factor de porcentaje de contenido alto de arena (ecuación 6) disminuye los valores de K para suelo con altos contenidos de arena.

$$f_{csand} = (0,2 + 0,3 * \exp \left[-0,256 * m_s * \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right]) \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0,3} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$f_{orgC} = \left(1 - \frac{0,25 * orgC}{orgC + \exp [3,72 - 2,95 * orgC]} \right) \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0,7 * \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[-5,51 + 22,9 * \left(1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right) \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde,

m_s : porcentaje de arena.

m_{silt} : porcentaje de limo.

m_c : porcentaje de arcilla.

orgC: porcentaje de carbono orgánico.

Luego de determinar la composición del suelo, se realizó la multiplicación entre los factores descritos anteriormente (ecuación 7). De esta manera se obtuvo el factor K.

$$K_{USLE} = f_{csand} * f_{cl-si} * f_{orgC} * f_{hisand} \quad (\text{Ecuación 7})$$

El factor longitud y gradiente de la pendiente (LS) corresponde al factor topográfico, el cual indica que la erosión aumenta conforme a la pendiente (factor L) y la inclinación del terreno se hacen mayores (factor S) (Loaiza & Da Silva, 2018).

El cálculo de la pendiente (L) se hizo a partir del modelo digital de elevación de 12,5 metros de resolución. Con esta cartografía se obtuvo el valor de la pendiente a nivel del

pixel (β) y posteriormente se calculó el valor del radio F (ecuación 8), que indica la erosión por efecto de los flujos y el impacto de la precipitación.

$$F = \frac{\sin\beta}{\left(3(\sin\beta)^{0,8} + 0,56\right)} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Luego de calcular el radio F, se determinó el exponente de la longitud de la pendiente por medio de la ecuación 9.

$$m = \frac{F}{1 + F} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde,

m: exponente de la longitud de la pendiente.

F: valor del radio.

A partir de las ecuaciones 8 y 9 se calculó el factor L (ecuación 10).

$$L_{(i,j)} = \frac{\left[A_{(i,j)} + D^2\right]^{(m+1)} - A_{(i,j)}^{(m+1)}}{x^m * D^{m+2} * (22,13)^m} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde,

A: flujo acumulado.

D: tamaño del pixel.

X: factor de corrección de forma.

m: exponente de la longitud de la pendiente.

L: factor de la pendiente.

Para calcular el factor de inclinación del terreno (S), se empleó un condicional, que depende del ángulo de la pendiente β , para lo cual se empleó la ecuación 11.

$$\begin{aligned} \text{Cuando } \tan\beta_{(i,j)} < 0,09 \quad S_{(i,j)} &= 10,8 \sin\beta_{(i,j)} + 0,03 \\ \text{Cuando } \tan\beta_{(i,j)} \geq 0,09 \quad S_{(i,j)} &= 16,8 \sin\beta_{(i,j)} - 0,5 \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 11})$$

El factor LS se determinó mediante la multiplicación de los factores obtenidos previamente (factor L y S).






El factor de cobertura (C) representa la capacidad de la vegetación para impedir el arrastre de sedimento, de manera que este valor depende del tipo de vegetación y del porcentaje de cobertura (Loaiza & Da Silva, 2018). Inicialmente, se tuvo en cuenta el mapa de cobertura vegetal obtenido por medio de la metodología de Corine Land Cover, para lo cual fue necesario identificar el valor C para los dos tipos de cobertura presentes en el área de estudio.

2.2. Evaluación de la vulnerabilidad física

En la caracterización de la vulnerabilidad es importante identificar las variables de viviendas y áreas de cultivo de girasol presentes en la zona, para lo cual se utilizó el software Google Earth, en el que se trazaron dichas variables. Luego, en el software ArcGis 10.3 se procedió a cargar los puntos de equipamientos, las líneas de vías y los polígonos previamente realizados.

Otra de las variables importantes para el análisis de la erosión hídrica es la topografía, la cual se realiza a partir del modelo digital de elevación (DEM, por su sigla en inglés) y se clasifica en cinco rangos que describen el desarrollo o limitación de actividades e infraestructura según el porcentaje de inclinación de la pendiente (tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de la vulnerabilidad según la pendiente






Clase	Rango (%)	Pendiente	Calificación	Color
1	0 a 7	Plana y ligeramente inclinada	Nula	
2	7 a 12	Moderadamente inclinada	Leve	
3	12 a 25	Fuertemente inclinada	Moderada	
4	25 a 75	Ligera y moderadamente escarpada	Alta	
5	75 a 150	Fuertemente escarpada	Muy alta	

Fuente: adaptada de Corpochivor (2017).

Para cada una de las variables identificadas previamente, se realizó un análisis de vulnerabilidad a partir de las distancias medidas en línea recta, las cuales se determinaron en metros por medio de la herramienta de distancia euclidiana.

Posteriormente se realizó una reclasificación, la cual permitió señalar los valores máximos y mínimos para cada rango según las cinco clases, que varían desde 0 metros hasta 1500 metros. Esta distancia permitió clasificar y evaluar que tan expuestas o afectadas se encuentran la estructura física y las áreas de cultivos presentes en la vereda. En la tabla 2 se observa la clasificación de la vulnerabilidad según los rangos de distancia (metros).

Tabla 2. Clasificación de la vulnerabilidad según la distancia euclidiana

Clase	Distancia en áreas de cultivo (m)	Distancia de viviendas y equipamientos (m)	Distancia de las vías (m)	Calificación de vulnerabilidad	Color
1	401 a 1500	401 a 1500	351 a 1500	Nula	
2	301 a 400	251 a 400	251 a 350	Leve	
3	101 a 300	101 a 250	101 a 250	Moderada	
4	31 a 100	51 a 100	51 a 100	Alta	
5	0 a 30	0 a 50	0 a 50	Muy alta	

Fuente: la interacción de la malla vial y los sistemas naturales se tomó del Instituto Nacional de Vías (Invias, 2014), y las limitaciones del suelo según las clases del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2014).

A partir de los ráster obtenidos a una escala de medición común, se realizó una superposición ponderada, la cual permitió dar un valor porcentual para cada variable según su nivel de importancia (tabla 3).

Tabla 3. Superposición ponderada por variable

Variables	Porcentaje de importancia
Pendiente	35%
Cultivos	30%
Viviendas	20%
Vías	15%

Fuente: elaboración propia.

2.3. Evaluación del riesgo

En la etapa final de la investigación se determinó el riesgo a partir de los conceptos señalados en la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), en la cual se identifica la relación entre la amenaza y la vulnerabilidad (ecuación 12).

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza} * \text{Vulnerabilidad} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Esta metodología permitió clasificar el riesgo en cinco niveles, los cuales se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Clasificación del riesgo

Nivel	Calificación	Color
1	Muy bajo	
2	Bajo	
3	Medio	
4	Alto	
5	Muy alto	

Fuente: Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo (SNGRD, 2017).

3. Resultados

A partir de los datos y planos obtenidos en la evaluación de la amenaza y la vulnerabilidad física se generó como resultado principal dos planos, uno de ellos representa la zonificación de riesgo de erosión hídrica en la vereda El Hato, y el segundo hace referencia al plano de zonificación de riesgos de erosión en los cultivos de girasol presentes en la vereda.

3.1 Amenaza por erosión hídrica

Los planos que se muestran en la figura 2 tienen una escala espacial de 1:16 000.

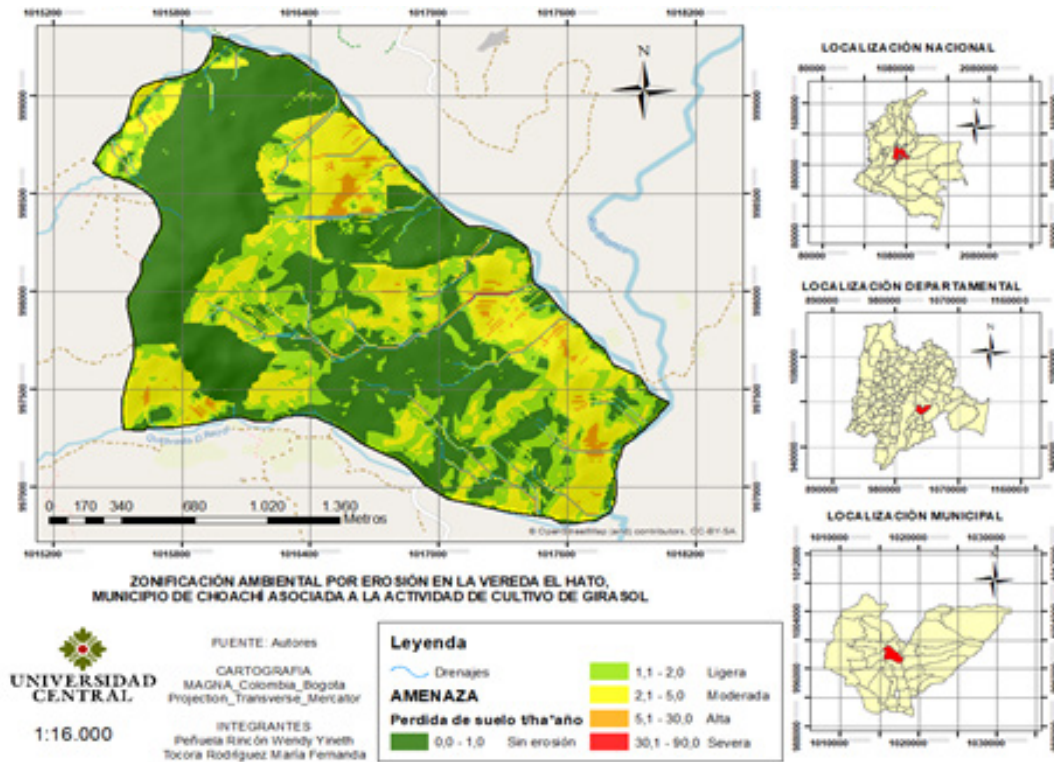


Figura 2. Amenaza por erosión hídrica en la vereda el Hato del municipio de Choachí.

Fuente: elaboración propia con base cartográfica tomada del Geoportal Gobernación de Cundinamarca; datos de precipitación de la red climatológica Ideam; pendiente e inclinación del terreno de imágenes radar de satélite ALOS; composición del suelo del mapa de suelos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); factor de cobertura del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC), y software ArcGis (Dangermond, 1969).

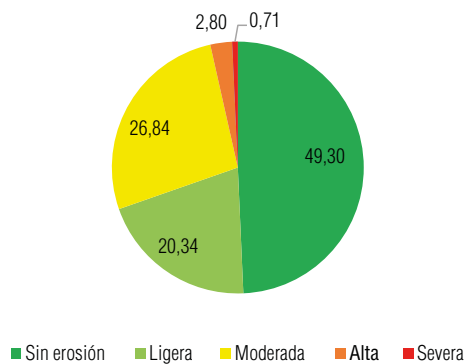


Figura 3. Porcentaje de amenaza por erosión.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Áreas de amenaza por erosión

Nivel	Calificación	Pérdida (t/ha* año)
1	Sin erosión	175,50
2	Ligera	72,42
3	Moderada	95,55
4	Alta	9,98
5	Severa	2,53

Fuente: elaboración propia.

El plano de amenaza evidencia cinco niveles, cada uno de los cuales refleja un nivel de pérdida de suelo a causa de la erosión hídrica en las distintas zonas de la vereda El Hato (tabla 5 y figura 3).

El nivel de amenaza 1 comprende un área de 175,50 hectáreas, equivalente al 49,30% de la vereda. Allí se ubican aquellas zonas que no presentan amenaza de erosión y se caracterizan por precipitaciones de fuertes a intensas. El suelo presenta pendientes desde pequeñas áreas planas hasta moderadamente escarpadas; la unidad de suelo es de tipo litosol, la cual indica una fertilidad de media a alta debido a la presencia de materia orgánica. Además, cuenta con dos tipos de cobertura: la primera corresponde a mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, lo que evita la pérdida de la capa superficial de la corteza terrestre; la segunda cobertura se encuentra en la mayor parte del área y está conformada por espacios naturales, lo cual refleja las limitaciones de uso por sus características biofísicas.

El nivel 2 hace referencia a zonas con erosión de tipo ligera: indica pérdida de suelo de 72,42 t/ha* año, lo cual corresponde al 20,34% de la vereda. El suelo se caracteriza por pendientes desde ligeras a moderadamente inclinadas, con unidad de suelo de tipo litosol y una cobertura de mosaico de pastos y cultivos, los cuales tienen la capacidad de interceptar una proporción de la lluvia y reducir la amenaza de erosión hídrica. Sin embargo, presenta infraestructuras como viviendas rurales, vías y cultivos con grandes extensiones, las cuales son variables que generan cambios en el uso del suelo.

El nivel 3 representa la amenaza moderada: refleja una pérdida de suelo de 95,55 t/ha* año, lo cual equivale al 26,84% del área total. Cuenta con pendientes desde moderadamente inclinadas hasta ligeramente escarpadas. En la zona sur de la vereda se evidencia una pequeña área con unidad de suelo tipo cambisol húmico, el cual acumula materia orgánica dentro del suelo superficial mineral; estas zonas presentan las mismas características climatológicas y de cobertura con respecto al tipo de amenaza ligera.

Los niveles 4 y 5 representan amenaza alta y severa: indican pérdida de suelo de 9,98 t/ha* año (2,8% de la zona) y 2,53 t/ha* año (0,71% de la vereda), respectivamente. Son zonas que se caracterizan por pendientes desde moderadamente escarpadas a fuertemente escarpadas. Se evidencian principalmente en lugares donde hay cauces y por sus condiciones topográficas pueden tener un comportamiento torrencial de gran intensidad, por lo cual la amenaza varía según las características propias del cauce.

3.2 Vulnerabilidad física de erosión hídrica

La figura 4 presenta el plano de vulnerabilidad física que se generó a partir de las cuatro variables nombradas en la figura 1.

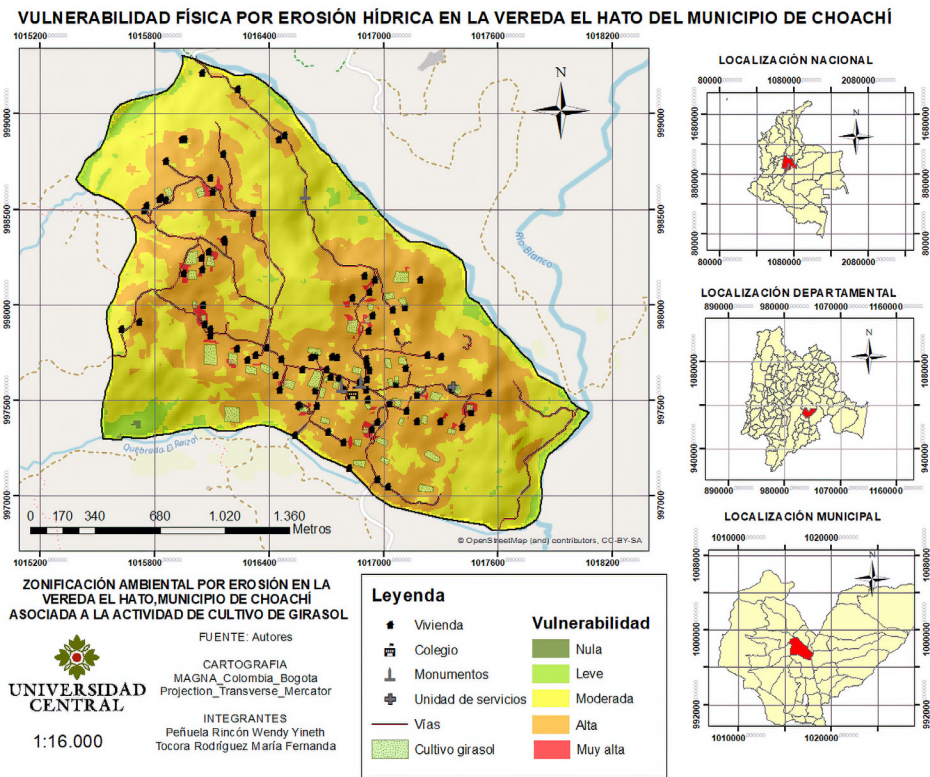


Figura 4: Vulnerabilidad física por erosión hídrica en la vereda El Hato del municipio de Choachí. **Fuente:** elaboración propia con base cartográfica tomada del Geoportal Gobernación de Cundinamarca; la pendiente de imágenes radar de satélite ALOS; identificación de cultivos por la Alcaldía Municipal de Choachí, Cundinamarca (2000), y equipamientos por medio de Google Earth (Keyhole, 2001) y software ArcGis, (Dangermond, 1969).

La vulnerabilidad se representa de manera cualitativa por medio de cinco colores, los cuales permiten identificar y priorizar las variables que están expuestas a un mayor riesgo (tabla 6, figura 5).

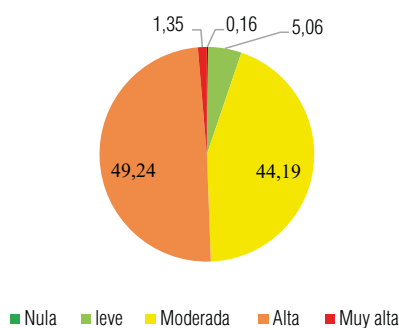


Figura 5. Porcentaje de vulnerabilidad a erosión. **Fuente:** elaboración propia.

Tabla 6. Áreas con vulnerabilidad física

Nivel	Calificación	Área (ha)
1	Nula	0,56
2	Leve	18,01
3	Moderada	157,32
4	Alta	175,30
5	Muy alta	4,79

Fuente: elaboración propia.

Las áreas de nivel 1 se representan en 0,56 hectáreas, lo que indica el 0,16% de la vereda. Son zonas que se caracterizan por tener pendientes planas, se presenta en pequeñas áreas y están alejadas a una distancia aproximada de entre 401 y 1500 metros de los elementos físicos que conforman la vereda.

El nivel 2 se presenta en 18,01 hectáreas del área de estudio, lo cual corresponde al 5,06%. Estas se encuentran alejadas de la infraestructura a una distancia aproximada de entre 301 y 400 metros, y se caracteriza por tener pendientes desde ligeramente inclinadas hasta ligeramente escarpadas.

El nivel 3, que señala la vulnerabilidad de tipo moderada, comprende el 44,19% de la vereda, lo que refleja un área aproximada de 157,32 hectáreas. Se presenta en zonas con pendientes desde fuertemente inclinadas hasta fuertemente escarpadas, a una distancia aproximada de entre 101 y 300 metros. Los tramos viales son la principal estructura afectada, sin embargo, en algunas zonas no se evidencia presencia de infraestructura física.

La vulnerabilidad alta (nivel 4) se evidencia en 175,30 hectáreas, lo cual equivale al 49,24% del área. Estas zonas se caracterizan por tener pendientes desde fuertemente inclinadas hasta pequeñas zonas moderadamente escarpadas. Allí se observan todas las infraestructuras físicas analizadas dentro del área de estudio que se encuentren a una distancia de entre 51 y 100 metros aproximadamente. Esta vulnerabilidad se ocasiona por la proximidad de las estructuras y las características topográficas del terreno.

El tipo de vulnerabilidad muy alta (nivel 5) corresponde a 4,79 hectáreas, lo cual representa el 1,35% de la zona. Tiene pendientes moderadamente escarpadas y se caracteriza por la presencia de infraestructuras cercanas con una distancia menor a 50 metros. Allí se encuentran en su mayoría las viviendas y los cultivos de girasol; sin embargo, algunos tramos de las líneas viales también pueden estar afectadas.

Con base en estos resultados se puede observar que la mayor parte de la zona de estudio se caracteriza por presentar zonas de vulnerabilidad física de tipo moderada. La principal característica de este comportamiento se debe a la cercanía de las infraestructuras físicas presentes en el área de estudio y la topografía de la zona.

3.3 Riesgo de erosión hídrica

La figura 6 presenta el plano de riesgo que se generó a partir de las figuras 2 y 4.

La zonificación de riesgo por erosión se clasifica en cinco niveles, los cuales van desde riesgo muy bajo hasta muy alto (tabla 7 y figura 7).

En el nivel de riesgo 1 se encuentran 217,77 hectáreas, lo que representa el 61,17% de la vereda. Estas zonas presentan precipitaciones intensas y pendientes que varían desde pequeñas áreas de tipo planas hasta fuertemente escarpadas. Se encuentran conformadas por unidades de suelo litosol y poseen los dos tipos de coberturas presentes en la vereda, como son el mosaico de cultivos y pastos, y mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, ambos con la capacidad de captar una parte de la lluvia, lo cual disminuye la pérdida de la capa superficial de la corteza terrestre.

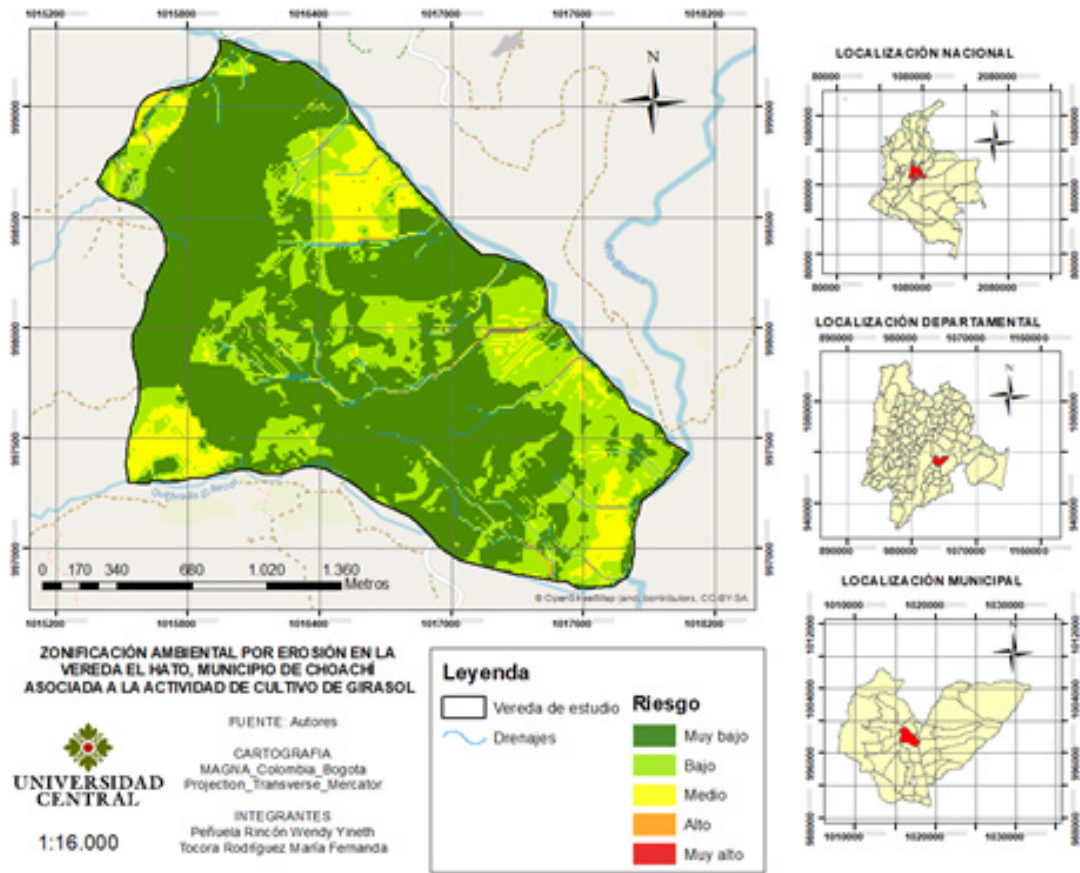


Figura 6. Riesgo de erosión hídrica en la vereda el Hato del municipio de Choachí.
 Fuente: elaboración propia con base cartográfica tomada de las figuras 2 y 4 y software ArcGis (Dangermond, 1969).

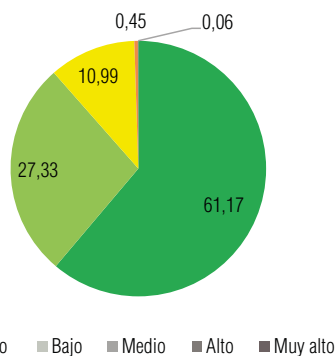


Figura 7. Porcentaje de riesgo de erosión.
 Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Áreas según riesgo de erosión

Nivel	Calificación	Área (ha)
1	Muy bajo	217,77
2	Bajo	97,29
3	Medio	39,13
4	Alto	1,59
5	Muy alto	0,21

Fuente: elaboración propia.

El nivel 2 se presenta en 97,29 hectáreas, que equivalen al 27,33%. Se caracteriza por precipitaciones moderadas y pendientes que varían desde fuertemente inclinadas hasta fuertemente escarpadas, con algunas zonas de pendientes planas. Se presenta en áreas con mosaico de cultivos y pastos, posee unidades de suelo de tipo litosol y pequeñas áreas con unidad de suelo de tipo cambisol húmico.

El nivel 3 se evidencia en 39,13 hectáreas, lo cual equivale al 10,99%. Se caracteriza por tener un suelo con coberturas de mosaico de cultivos y pastos, con unidades de suelo de tipo litosol y cambisol húmico. Estas se encuentran en pendientes desde ligeramente escarpadas hasta fuertemente escarpadas, dentro de las cuales se evidencian algunos cauces con características morfológicas de pendientes moderadas y mayor profundidad.

En el nivel 4 se clasifican 1,59 hectáreas de la vereda, lo cual equivale al 0,45%. El nivel 5 corresponde a 0,21 hectáreas con riesgo de tipo muy alto, que representa el 0,06%. Estos dos últimos niveles se presentan en las zonas con presencia de cauces y se caracterizan por una morfología de pendientes altas que varían de moderadamente escarpadas a fuertemente escarpadas. Los cauces anchos y poco profundos pueden llegar a tener un comportamiento torrencial con gran capacidad de erosión.

3.3 Riesgo de erosión hídrica en los cultivos de girasol

La figura 8 muestra el plano de riesgo que se generó a partir de las figuras 2 y 4, y la información sobre la presencia de cultivos de girasol.

La zonificación de riesgo refleja el nivel de afectación en las áreas dedicadas al cultivo de girasol de la vereda El Hato (tabla 8 y figura 9).

Del área total de la vereda, aproximadamente 8,83 hectáreas son usadas para cultivo de girasol, lo que equivale al 2,5% de la zona. Del total de las áreas cultivadas, aproximadamente 7,3 hectáreas se encuentran ubicadas en zonas de nivel de riesgo 1, lo que representa el 82,37%. Estas presentan pendientes desde planas hasta ligeramente inclinadas, y la mayoría de la zona corresponde a vocación de tipo agroforestal, lo que permite sistemas productivos que integran árboles y pastos.

En el nivel 2 se encuentran aproximadamente 1,51 hectáreas de cultivo, lo que representa el 17,11% de la actividad agrícola. Estas se caracterizan por tener áreas con pendientes moderadamente inclinadas y zonas con vocación agrícola, las cuales permiten la producción de un cultivo determinado.

El nivel 3 se presenta únicamente en 0,045 hectáreas dedicadas al cultivo de girasol, lo cual equivale al 0,50%. Allí la pendiente es fuertemente inclinada y el suelo sigue manteniendo su vocación agrícola.

El nivel 4 y 5 no se evidencia en las hectáreas dedicadas al cultivo de girasol. Estas áreas presentan pendientes moderada y fuertemente escarpadas, lo cual indica que las tierras tienen limitaciones severas y restringen la presencia de cultivos.

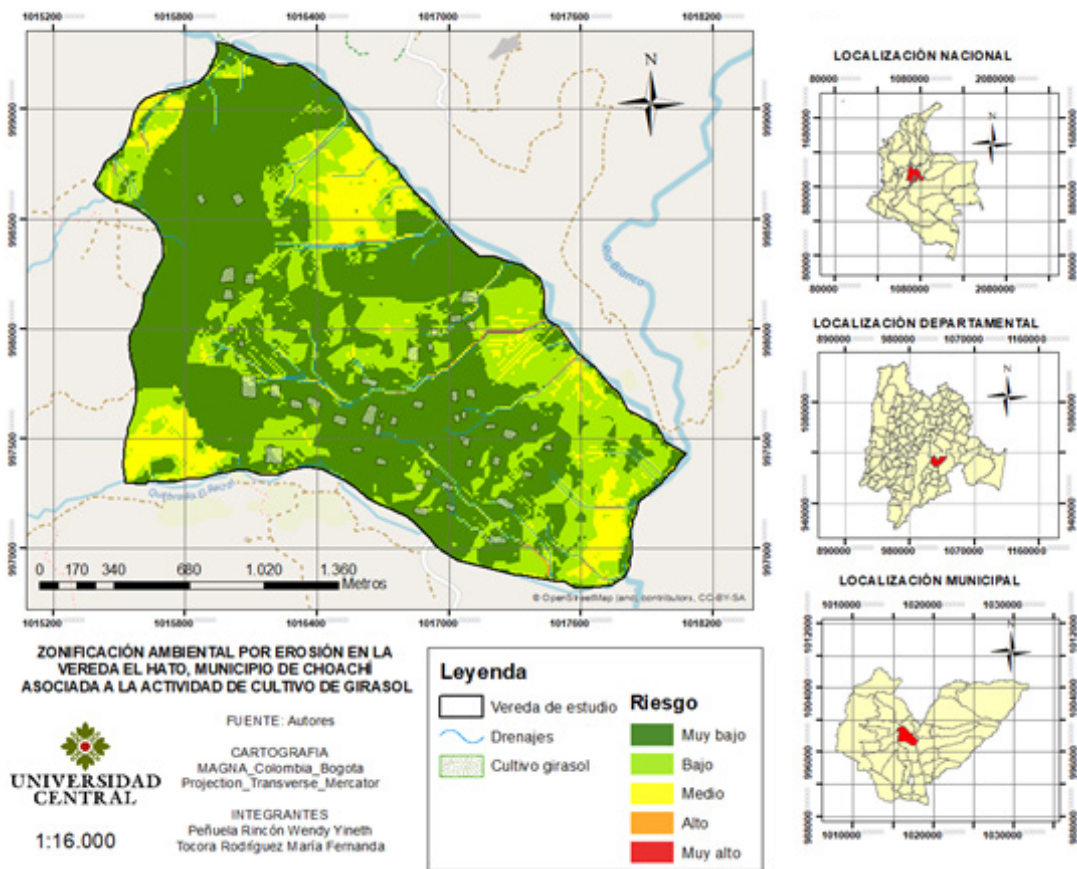


Figura 8. Riesgo de erosión hídrica en el cultivo de girasol de la vereda el Hato del municipio de Choachí. Fuente: elaboración propia con base cartográfica de la figura 6 y software ArcGis (Dangermond, 1969).

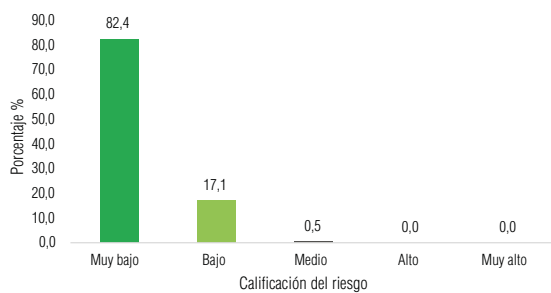


Figura 9. Porcentaje de áreas de cultivo en riesgo de erosión. Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Áreas de cultivo con riesgo de erosión

Nivel	Calificación	Área (ha)
1	Muy bajo	7,27
2	Bajo	1,51
3	Medio	0,045
4	Alto	0
5	Muy alto	0

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusión

La erosión es un proceso complejo que resulta de la interacción, presencia o ausencia del medio abiótico, biótico y socioeconómico. En este trabajo se evaluó este fenómeno a partir del factor de amenaza, que permitió identificar que 175,5 hectáreas (49,3% del territorio) corresponden a la categoría 1, la cual señala que no hay pérdida de suelo a causa de la erosión. Sin embargo, 2,5 t/ha * año (0,7%) tienen amenaza por pérdida de suelo con erosión severa de categoría 5. Este comportamiento se debe a las condiciones climatológicas y geográficas, como la precipitación, la topografía, la composición del suelo y la cobertura vegetal propias de la región.

Con respecto a las infraestructuras y al cultivo de girasol, la mayor parte de la vereda tiene una vulnerabilidad alta, que representa un área de 175,3 hectáreas (49,2% del territorio), las cuales se caracterizan por su predisposición a sufrir grandes pérdidas o daños físicos, económicos e institucionales. Las áreas menos vulnerables a la erosión corresponden a 0,56 hectáreas (0,16%); esta fragilidad física se debe a la ubicación de los equipamientos y los cultivos con respecto a la pendiente.

En la vereda El Hato se identifica un riesgo de erosión hídrica muy bajo, que representa un área aproximada de 217,8 hectáreas, lo que equivale al 61,2% del área total. La actividad económica predominante es el cultivo de girasol, con una extensión aproximada de 8,8 hectáreas, que en su mayoría corresponde a riesgo de erosión muy bajo (7,3 hectáreas de cultivo), lo cual indica que esta actividad presenta baja pérdida de la capa del suelo y por ende el potencial de producción de cultivos no se ve afectado. La mayor parte de la vereda no muestra pérdida de suelo a causa de la erosión a pesar de sus características topográficas y climatológicas. Esto se debe al tipo de suelo que posee, en el cual se encuentra vocación agroforestal y forestal, además de factores dinámicos como la cobertura vegetal (mosaico de cultivos y pastos, y mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales), la cual se relaciona de manera directa con la protección y la estabilidad del suelo, pues permite el aporte de materia orgánica y la captación de una proporción de lluvia.

El 1,70% de la zona tiene riesgo alto y muy alto, lo cual se debe a las altas pendientes y a los cuerpos de agua, que pueden tener una morfología de cauces anchos y poco profundos, lo que genera un comportamiento torrencial con gran capacidad de erosión.

Los resultados obtenidos de la zonificación ambiental permiten aportar desde el ámbito local y regional información del estado actual del territorio frente al riesgo de erosión hídrica asociada a los cultivos de girasol. De esta manera, la Secretaría Agrícola y la Alcaldía del Municipio de Choachí podrán gestionar acciones, evaluar alternativas y actualizar el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) con el objetivo de disminuir la vulnerabilidad física y reducir al mínimo la pérdida de suelo. Estas acciones brindarán a los agricultores herramientas enfocadas en la conservación del suelo y prácticas de cultivo orientadas a la conservación de su productividad.

5. Recomendaciones

Aunque la vereda no presente condiciones de riesgo significativas, es importante tomar medidas para conservar el cultivo de girasol, reducir al mínimo las pérdidas de suelo y evaluar alternativas que contribuyan en la planificación del uso de la tierra y el desarrollo agrícola sostenible.

En las zonas con riesgo muy bajo, los sistemas productivos deben estar sujetos a las buenas prácticas de cultivo orientadas a conservar su productividad, como rotación de cultivos, fertilización balanceada y equipos de cosecha.

En las zonas con riesgo bajo, los cultivos deben estar sujetos a buenas prácticas de cultivo y medidas de conservación del suelo. La vocación del suelo permite la producción de un cultivo determinado, de modo que se pueden implementar cultivos intercalados que mejoran la fertilidad del suelo, lo protegen de la erosión y ayudan a controlar malezas.

Las zonas con riesgo medio deben implementar prácticas de conservación para poder controlar la pérdida de suelo y disminuir los niveles de erosión hídrica, para lo cual se deben implementar obras de conservación de suelo según la pendiente, como barreras vivas, zanjas a desnivel y barreras muertas de piedra.

Agradecimientos

Agradecemos a la ingeniera Laura Mahecha por su colaboración durante el desarrollo del proyecto, a la Alcaldía Municipal de Choachí por brindarnos la información con la que cuenta actualmente el municipio y, finalmente, a nuestras familias por todo su apoyo.

Referencias

- Alcaldía Municipal de Choachí, Cundinamarca. (2000). Acuerdo 005 de 2000. <http://www.choachi-cundinamarca.gov.co/normatividad/acuerdo-005--de-2000>
- Ayala, C.V., & Lozano, Á. L. (2016). *Estudio del riesgo generado por la erosión hídrica de suelo en la microcuenca quebrada mancilla del municipio de Facatativá, Cundinamarca, mediante la ecuación universal de pérdida de suelo* [tesis de pregrado, Universidad de Cundinamarca]. Repositorio Institucional Universidad de Cundinamarca. <https://bit.ly/3bJDTd1>
- Castro Quintero, A. F., Lince Salazar, L. A., & Riaño Melo, O. (2017). Determinación del riesgo a la erosión potencial de la zona cafetera del Quindío, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 17-26. <https://doi.org/10.22490/21456453.1828>
- Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo [SNGRD]. (2017). Terminología sobre gestión del riesgo de desastres y fenómenos amenazantes. <https://bit.ly/3wsRdKq>

- Corpochivor. (2017). Actualización POMCA río Garagoa, plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica. <https://bit.ly/3yuEWqT>
- Dangermond, J. (1969). ArcGis (versión 10.3) [software]. <https://www.esri.com/es-es/home>
- Gaitán, J., Navarro, M., Pizarro, M., Vuegen, L., Carfagno, P., & Rigo, S. (2017). Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina. Ediciones Inta. <https://bit.ly/3wvvH8d>
- Gutiérrez, V. L., & Pinzón, P. L. (2017). *Evaluación de la erosión hídrica y escorrentía en tres sistemas productivos para un manejo sostenible del suelo en la vereda Santa Marta, Cabrera, Cundinamarca* [tesis de pregrado, Universidad Minuto de Dios]. Repositorio Institucional Uniminuto. <https://bit.ly/3ysKPop>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2014). Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso. En *Levantamiento de suelos*. <https://bit.ly/34crda5>
- Instituto Nacional de Vías [Invías]. (2014). Plan vías C-C. Vías compatibles con el clima. En *Plan de adaptación de la red vial de Colombia*. <https://bit.ly/3f8UAAF>
- Keyhole, I. (2001) Google Earth (versión 7.3.0.3827) [software]. <https://www.google.com/intl/es/earth/versions/#earth-for-web>
- Loaiza, S., & Da Silva, M. (2018). Evaluación del potencial de mitigación de las estrategias de adaptación implementadas en los Territorios Sostenibles Adaptados al Clima. <https://bit.ly/3f70IsY>
- Ospina, P. E. (2015). *Determinación de zonas aptas para la construcción de colegios distritales en la localidad de Suba, partiendo de métodos de análisis multicriterio y herramientas SIG* [Trabajo de especialización, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá]. Repository Unimilitar. <https://bit.ly/3hJNNyV>
- Rodríguez, A., & García, M. (2015). *Diagnóstico ambiental del turismo de naturaleza en Choachí, Cundinamarca* [Trabajo de grado de tecnólogo, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá]. Repositorio Institucional. <https://bit.ly/3ywnVMP>

Sistema para detectar algunos símbolos del alfabeto de la lengua de señas colombiana a través de señales de electromiografía

System to detect certain symbols of the Colombian Sign Language alphabet through electromyography signals

Freddy Alexander Cepeda Ortiz* y Juan Sebastián Rubiano Labrador**

Cómo citar:

Cepeda Ortiz, F. A., & Rubiano Labrador, J. S. (2019). Sistema para detectar algunos símbolos del alfabeto de la lengua de señas colombiana a través de señales de electromiografía. *Ingeciencia*, 4, 96-115.

* Estudiante de Ingeniería Electrónica, Universidad Central. Integrante del semillero de Microelectrónica. Correo: fcepedao@ucentral.edu.co

** Ingeniero electrónico. MSc. en Ingeniería Electrónica y de Computadores. Profesor Asistente del Departamento de Ingeniería Electrónica. Profesor de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central. Integrante del grupo de investigación Bioingeniería, Nanotecnología y Comunicaciones (SPIN) de la Universidad Central. Correo: jrubianol@ucentral.edu.co

Resumen

Este artículo presenta la implementación de un prototipo de sistema que busca dar una alternativa para que las personas con discapacidad auditiva y discapacidad del habla se comuniquen con las personas del común. El sistema, un *wearable* con componentes hardware y software, identifica en un computador algunos símbolos del alfabeto de la lengua de señas colombiana mediante los movimientos de los dedos de la mano. Específicamente, se implementó un prototipo electrónico de adquisición, amplificación, filtrado y procesamiento de las señales de electromiografía (EMG) del antebrazo. Para procesar la información que arroja el dispositivo se desarrolló un software que emplea la aproximación temporal y espectral, así como las redes neuronales artificiales (RNA) como método para clasificar los patrones. Este software identifica los símbolos del alfabeto de la lengua de señas que una persona realiza con los dedos de la mano y los traduce en imágenes de las letras, las cuales se proyectan en un dispositivo electrónico, en este caso un computador.

Palabra clave: bioingeniería, discapacidad, electromiografía, lenguaje de señas, procesamiento digital de señales, reconocimiento de gestos, reconocimiento de patrones, redes neuronales artificiales (RNA).

Abstract

This article presents the implementation of a prototype wearable that seeks to provide an alternative for people with hearing and speech disabilities to communicate with ordinary people. The system is a wearable, with hardware and software components, it identifies in a computer some symbols of the Colombian sign language alphabet through the movements of the fingers. Specifically, an electronic prototype of acquisition, amplification, filtering and processing of the electromyography (EMGs) signals of the forearm was implemented. To process the information thrown by the device, software was developed that uses temporal and spectral approximation, as well as artificial neuronal networks (ANN) as a method to classify the patterns. This software identifies the symbols of the alphabet of the sign language that a person makes with the fingers of the hand and translates them into images of the letters, which are projected on an electronic device, in this case a computer.

Keywords: artificial neural networks (ANN), bioengineering, digital signal processing, disability, electromyography, gesture recognition, sign language, pattern recognition.

1. Introducción

La electromiografía ha sido de gran ayuda en el tratamiento de pacientes con lesiones y discapacidad en distintos músculos del cuerpo humano. Esta se basa en la obtención de señales eléctricas de los músculos cuando están en reposo o cuando se realiza algún movimiento, lo cual genera potenciales debido a la entrada y salida de iones (Caicedo & López, 2009).

Estos potenciales de acción son de valores del orden de microvoltios (valores positivos y negativos). Con el análisis en tiempo y frecuencia de los valores de la señal de electromiografía (EMG) es posible determinar los movimientos musculares que realiza la persona, ya sea en extremidades superiores o inferiores. En esta investigación se analizan las señales de los miembros superiores (antebrazo) para determinar las señales que se obtienen de ciertos músculos cuando las personas realizan diferentes símbolos con los dedos de la mano, ya que anatómicamente los músculos principales que mueven los dedos y la mano se encuentran en el antebrazo.

Por medio del análisis de señales de electromiografía en miembros superiores se han logrado avances en diferentes campos, por ejemplo en la construcción de mecanismos como prótesis, que ayudan a rehabilitar a las personas que han sufrido alguna discapacidad o pérdida de sus extremidades (manos, antebrazos o brazos) (Caicedo & López, 2009). Estos análisis tienen el propósito de que las prótesis sean más dinámicas para el paciente, de modo que le den independencia para realizar movimientos básicos y complejos, así como también generar autoestima y confianza en la persona.

Otro campo de acción de la electromiografía en miembros superiores es la robótica, específicamente en el diseño y elaboración de brazos robóticos, los cuales se usan en procesos que requieren precisión, como en cirugías, la manipulación de objetos pequeños, el trabajo en ambientes peligrosos y la manipulación de sustancias tóxicas y volátiles (Cifuentes, 2010).

Hoy en día también es importante tener en cuenta el entretenimiento como factor fundamental en el desarrollo humano. Este es el caso de los videojuegos, donde el uso de señales de electromiografía también es protagonista, puesto que en este campo se diseñan dispositivos que ayudan a generar una experiencia más real del usuario con el entorno virtual (Riaño & Quintero, 2010). Sin embargo, esto también es aplicable en la vida cotidiana, porque con el solo movimiento de un dedo se le pueden dar órdenes a un electrodoméstico, automóvil u otro artefacto que se desee, siempre y cuando sea compatible con el dispositivo de electromiografía.

2. Prototipado

El proyecto de investigación desarrolló el prototipo, denominado DetSim, de acuerdo con cuatro etapas: (1) alimentación, (2) adquisición y acondicionamiento de la señal, (3) control y procesamiento por hardware y (4) procesamiento por hardware (figura 1). A continuación, se describe con detalle cada uno de estos procesos.

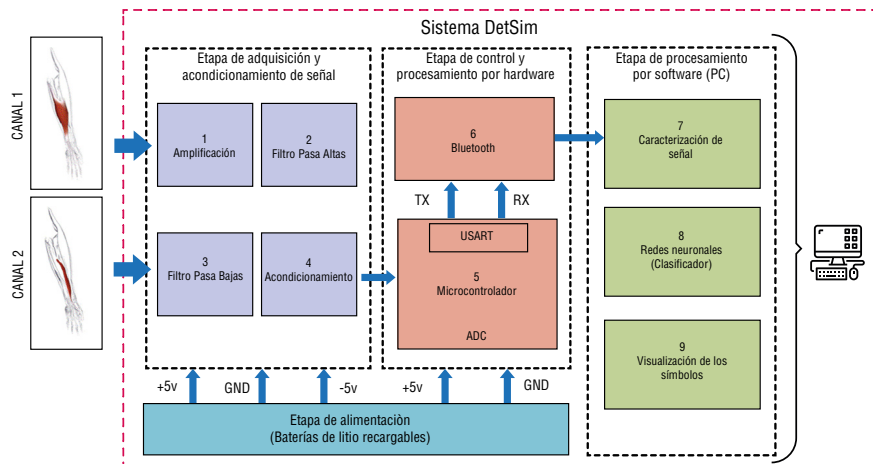


Figura 1. Diagrama de bloques del prototipo DetSim.

Fuente: elaboración propia.

2.1 Etapa 1. Alimentación

Como el prototipo desarrollado es portátil, es necesario que tenga una fuente de alimentación independiente que soporte los 100 mA de consumo del dispositivo. Esto se logró usando dos baterías recargables de litio de 9 V a 250 mA, una para el voltaje negativo y la otra para el voltaje positivo, ya que los amplificadores operacionales manejan estos voltajes para leer la señal EMG de forma correcta. Sin embargo, para que todos los circuitos, tanto el de acondicionamiento de señal como el de control y el Bluetooth, manejen el mismo voltaje, se empleó reguladores de voltaje LM7805 (regulador de 5 V) y LM7905 (regulador de -5 V).

2.2 Etapa 2. Adquisición, filtrado y acondicionamiento

En este apartado se presenta la forma de diseñar, calcular e implementar la etapa de adquisición, amplificación, filtrado y acondicionamiento de las señales adquiridas (etapas 1, 2, 3 y 4 en la figura 1). También se presenta el tipo de sensores utilizados y de qué manera se realizó la tarjeta electrónica con este fin.

2.2.1 Electrodo

Existen distintos electrodos para capturar señales de EMG: se encuentran electrodos invasivos que penetran la piel de la persona, de manera que no fueron una opción viable en el desarrollo del prototipo de este trabajo. También existen electrodos no invasivos, que son superficiales (EMG) y no penetran la piel de la persona. Otros más actuales son los electrodos inteligentes o sensores de EMG inteligentes. Inicialmente se buscó que el dispositivo se pudiera utilizar fácilmente con solo ajustarlo en el brazo, por esto se investigó y se encontró que hay electrodos EMG contruidos con acero inoxidable (Cifuentes, 2010). Estos electrodos tienen una ventaja con respecto a los usados superficialmente de Ag-Ag/Cl: se pueden utilizar varias veces, mientras que los otros usan adhesivo y solo sirven tres veces.

Por esta razón, se diseñaron y construyeron cinco electrodos en acero inoxidable para el prototipo: uno como referencia, dos para el canal del músculo flexor largo del pulgar y dos para el canal del músculo flexor superficial común de los dedos. Las dimensiones y forma de los electrodos se pueden apreciar en la figura 2.

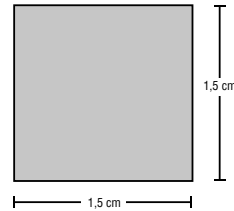


Figura 2. Dimensiones de los electrodos de acero inoxidable que se diseñaron y construyeron para el prototipo.
Fuente: elaboración propia.

2.2.2 Amplificador operacional de instrumentación

Para adquirir las señales y amplificarlas es necesario utilizar un amplificador de instrumentación, ya que este posee un CMRR (Common Mode Rejection Ratio) alto para que el ruido no afecte la señal original, que tiene una amplitud muy pequeña, por lo general del orden de mV (figura 3).

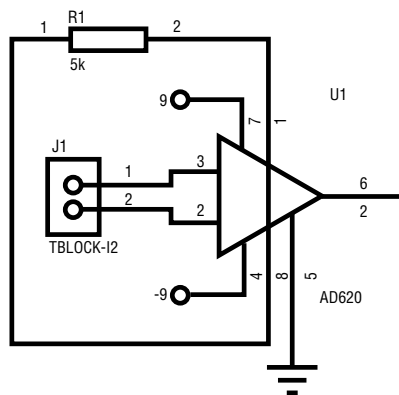


Figura 3. Configuración del amplificador AD620.
Fuente: elaboración propia.

2.2.3 Filtrado

Una vez se ha realizado la primera etapa de adquisición y amplificación, se procede a filtrar la señal original con el fin de discriminar las señales no deseadas y dejar las señales de frecuencia importantes, que en este caso tienen entre 20 Hz y 500 Hz, que es el umbral donde trabajan las señales de EMG. Primero se utiliza un filtro pasa altas Butterworth de segundo orden con una frecuencia de corte de 20 Hz (figura 4) y posteriormente un filtro pasa bajas Butterworth de segundo orden con una frecuencia de corte de 500 Hz (figura 5).

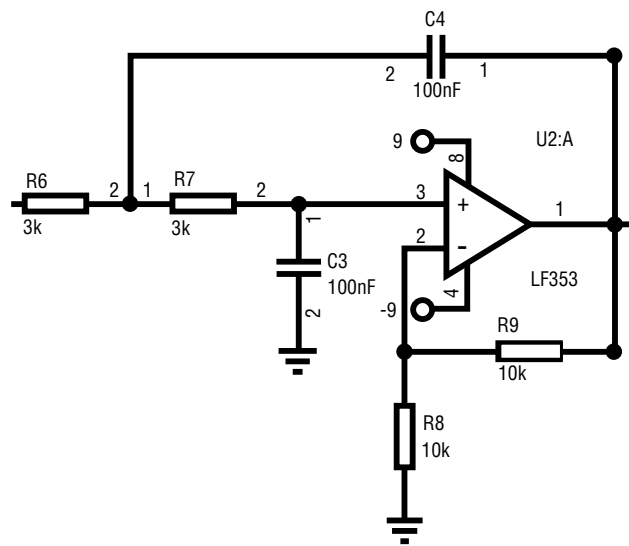


Figura 4. Configuración empleada para el filtro pasa altas.
Fuente: elaboración propia.

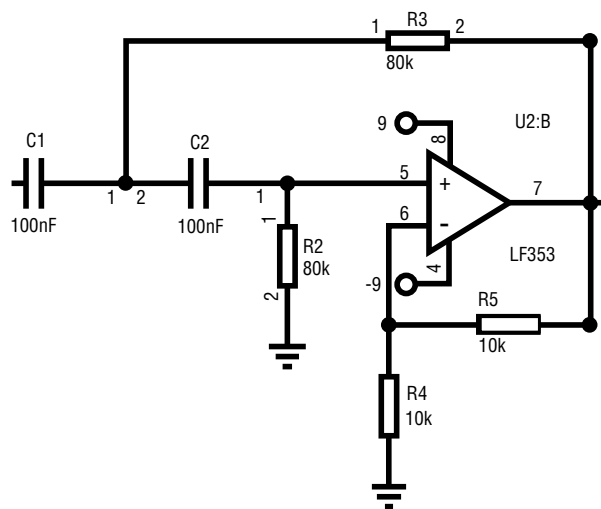


Figura 5. Configuración empleada para el filtro pasa bajas.
Fuente: elaboración propia.

Las señales de EMG tienen amplitudes muy pequeñas con valores en mV o μ V, de manera que estas señales bioeléctricas son susceptibles a ruidos, especialmente a los generados por la red eléctrica de 110 V 60 Hz, que las pueden afectar por adición de armónicos indeseables. Para corregir este problema se implementó un filtro Notch de 60 Hz (filtro muesca) (figura 6).

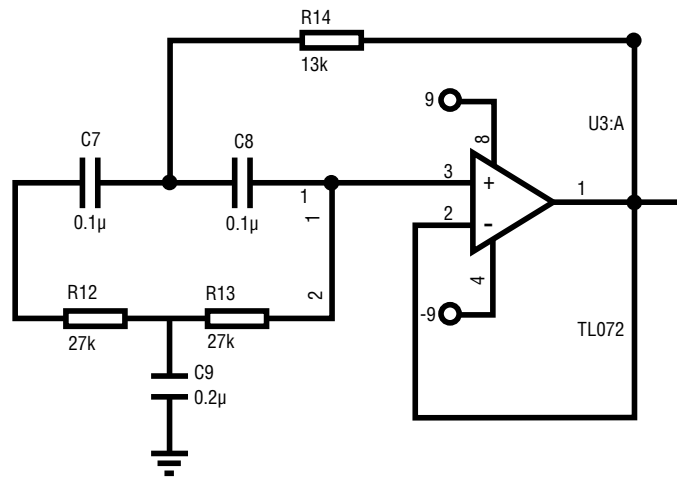


Figura 6. Configuración empleada para el filtro Notch.
Fuente: elaboración propia.

El microcontrolador elegido trabaja con voltajes positivos, ya que si obtiene voltajes negativos es posible que sufra daños o lecturas erróneas del ADC. Por tal razón, es necesario implementar un amplificador sumador, el cual suma las señales que se encuentren en sus entradas o le suma un valor DC a determinada señal. Con esta configuración se ajustó un valor DC a la señal de EMG de 2,5 V (figura 7).

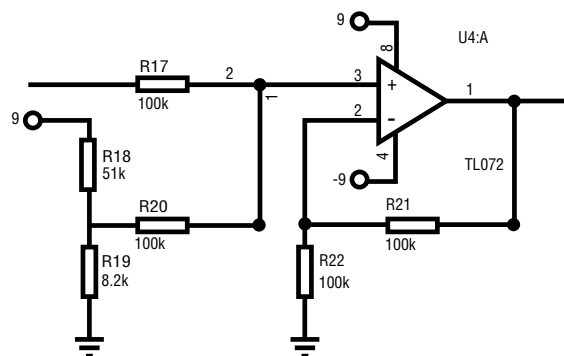


Figura 7. Configuración empleada para el sumador.
Fuente: elaboración propia.

2.3 Etapa 3. Procesamiento y control

Para realizar el procesamiento y control de las señales de EMG ya amplificadas, filtradas y acondicionadas se empleó el microcontrolador PIC16F87 de 8 bits trabajando a 20 MHz. La frecuencia de muestreo utilizada fue de 1000 Hz con un ADC de resolución de 10 bits.

La velocidad de comunicación de la UART fue configurada en este caso a 115200 bps, con un bit de inicio y un bit de parada, 8 bits de datos y sin paridad. El microcontrolador se comunica con el módulo Bluetooth HC-05 por medio de comunicación serial

asíncrona, y este último se encarga de enviar inalámbricamente la información de las señales de EMG capturadas a un computador personal (PC) (figura 8).

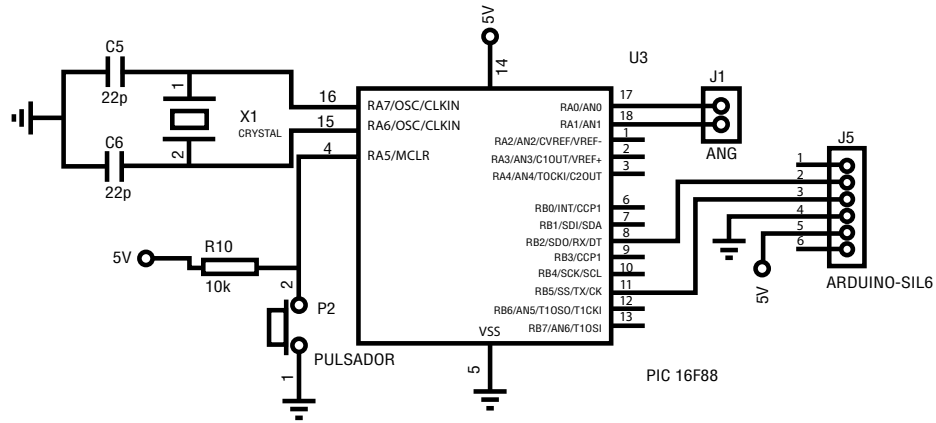


Figura 8. Esquema electrónico del bloque de control y procesamiento.

Fuente: elaboración propia.

2.4 Etapa 4. Interfaz gráfica y procesamiento por software

Con el fin de determinar qué tipo de movimiento se realiza, es necesario emplear métodos de caracterización y discriminación de señales. Por tal razón se empleó el software Matlab, con el cual se desarrolló una interfaz gráfica de usuario que se ejecuta en el computador personal que recibe inalámbricamente los datos de las señales de EMG capturadas para luego procesarlas. A continuación, se exponen los métodos utilizados.

2.4.1 Caracterización de las señales EMG

En este proyecto se siguieron los métodos de caracterización de señales en aproximación temporal y espectral, que se basan en los trabajos de Riaño y Quintero (2010), y Betancourt *et al.* (2004).

2.4.1.1 Aproximación temporal

2.4.1.1.1 Valor RMS

El valor RMS se expresa como el producto entre $1/N$ muestras por la raíz cuadrada de la sumatoria de $k=1$ a N muestras de la señal al cuadrado en el instante k (ecuación 1)

$$RMS = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{k=1}^N X_k^2} \quad (\text{Ecuación 1})$$

2.4.1.1.2 Cruces por cero

Una manera de identificar una señal es determinar cuántas veces pasa por cero en dos muestras consecutivas $X(k)$ y $X(k+1)$. Sin embargo, es necesario establecer un umbral ε con el fin de separar de la señal EMG los cruces por cero generados por el ruido. Esto, si se cumplen las condiciones de la ecuación 2.

$$\begin{aligned} & \{X_k > 0\} \text{ y } \{X_{k+1} < 0\} \\ & \text{O} \\ & \{X_k < 0\} \text{ y } \{X_{k+1} > 0\} \end{aligned} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

$$\text{Y}$$

$$|X_k - X_{k+1}| \geq \varepsilon$$

2.4.1.1.3 Cambios de pendiente

Los cambios de pendiente se pueden obtener definiendo un umbral ε , con lo cual se evita que el ruido sume cambios de pendiente inadecuados en la caracterización de la señal. Posteriormente, se toman tres muestras de señal X_{k-1} , X_k y X_{k+1} , que puedan cumplir las condiciones que se plantean en la ecuación 3.

$$\begin{aligned} & \{X_k > X_{k-1}\} \text{ y } \{X_k > X_{k+1}\} \\ & \text{O} \\ & \{X_k < X_{k-1}\} \text{ y } \{X_k > X_{k+1}\} \end{aligned} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

$$\text{Y}$$

$$|X_k - X_{k-1}| \geq \varepsilon \text{ O } |X_k - X_{k+1}| \geq \varepsilon$$

2.4.1.1.4 Longitud de onda

Para determinar esta característica temporal es necesario tomar dos muestras consecutivas de la señal, medir la distancia entre ellas y acumularlas. Con el valor obtenido se pueden definir otros parámetros, como la amplitud, la frecuencia y la duración. Por lo tanto, la longitud de onda da una idea de lo complejo que es una señal en un segmento pequeño. La expresión que determina la longitud de onda se muestra en la ecuación 4.

$$l_o = \sum_{k=1}^N |x_k - x_{k-1}| \quad \text{(Ecuación 4)}$$

2.4.1.2 Aproximación espectral

Las aproximaciones espectrales se pueden hacer de distintas formas, sin embargo la más usual es la transformada de Fourier. Específicamente, en este proyecto se emplearon dos métodos basados en Riaño y Quintero (2010), y Betancourt *et al.* (2004): el periodograma y el espectrograma.

2.4.1.2.1 Periodograma

La herramienta empleada para hallar el periodograma es la Fast Fourier Transform (FFT), denominada la transformada rápida de Fourier. Al conocer la FFT se obtiene su módulo elevado al cuadrado y su resultado final es la densidad espectral de potencia (PSD) o el espectro de potencia. Con esta información se puede obtener la potencia máxima y promedio de una señal (ecuación 5).

$$P_{xx}(k) = \frac{|x(k)|^2}{N} \quad (\text{Ecuación 5})$$

2.4.1.2.2 Espectrograma

Como se mencionó anteriormente, la transformada de Fourier tiene distintas derivaciones dependiendo de la forma como se tome la señal y el tipo de señal. Así, para determinar el espectrograma de una señal se emplea la transformada de Fourier en tiempo corto (Short Time Transform Fourier [STFT]). Esta herramienta toma la señal completa y la divide en pequeñas ventanas deslizantes, con lo cual se obtiene mayor información de una señal porque a cada ventana se le calcula la transformada de Fourier. Con los resultados de este proceso se pueden calcular parámetros como la energía promedio y máxima de la señal.

En el proyecto se decidió realizar el procesamiento de información y la interfaz gráfica en Matlab, como se mencionó anteriormente, ya que este software facilita el procesamiento de alta resolución de cálculos complejos, posee herramientas para el desarrollo de interfaces gráficas, tiene Toolbox ('caja de herramientas') en redes neuronales artificiales (RNA), procesamiento de señales, transformada Wavelet, entre otros. Por último, Matlab permite empaquetar los proyectos en un archivo ejecutable, el cual puede ser usado en computadoras que no tengan instalado el programa.

2.4.2 Redes neuronales artificiales (RNA)

Las redes neuronales se pueden ejecutar con o sin supervisión. En este proyecto se empleó el método de supervisión *feed forward back propagation*, un tipo de red perceptrón multicapa, por lo que es necesario entregarle los datos de entrada y de salida deseados. De esta manera, cada vez que realice un cálculo, la red obtiene el porcentaje de error y se lo entrega a las neuronas para que ajusten los pesos sinápticos por medio del gradiente descendente; así se supervisa que la red alcance los datos de salida que se le han proporcionado. Inicialmente se cargan los datos de entrada (Matriz 16x50) y los datos de salida (Matriz 5x50), los cuales se han definido como una combinación binaria que identifica el tipo de movimiento realizado.

Una vez se han cargado los datos, se procede a entrenar la red neuronal, para lo cual se define el tipo de red —en este caso se eligió el método *feed forward back propagation*—,

el número de neuronas que se van a emplear en la capa oculta que realizarán el entrenamiento —16— y, por último, se define la cantidad de neuronas de la capa de salida —5—.

Cabe aclarar que el porcentaje de error siempre estará presente y no es posible alcanzar el 100% de acierto. Específicamente, en este proyecto se logró un porcentaje de acierto del 97,4%, lo cual es bastante alto. El entrenamiento se guarda en una variable previamente definida, la cual contiene los pesos sinápticos y los resultados obtenidos, y sirve para poder establecer qué tipo de movimiento se realizará de acuerdo con sus parámetros de entrada.

3. Análisis de resultados

3.1 Electrodo

Como resultado inicial se presentan los ajustes del brazo y los electrodos elaborados en acero inoxidable con las dimensiones indicadas anteriormente. Para cada canal de señal de EMG se emplearon dos electrodos y uno para la referencia. Los electrodos se aseguraron a las bandas elásticas con velcro en los extremos para hacer una toma adecuada de las señales EMG en los músculos seleccionados (figura 9).



Figura 9. Electrodo de acero inoxidable ajustados en la banda elástica con velcro en los extremos (ajustes para el brazo).

Fuente: elaboración propia.

3.2 Hardware

Otro resultado del proyecto fue el acondicionamiento que se realizó a la señal de EMG en el músculo flexor superficial común de los dedos con la tarjeta electrónica diseñada. Esta señal se presenta en la figura 10.

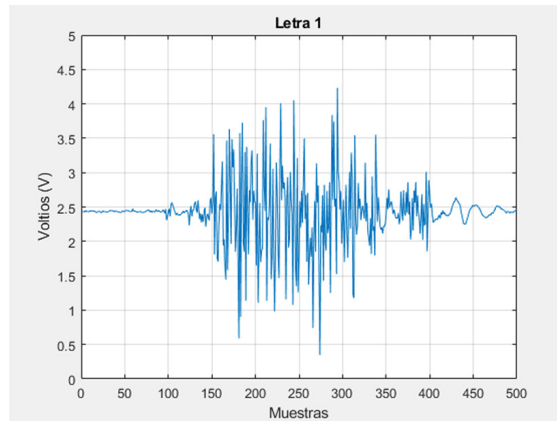


Figura 10. Señal de EMG obtenida con el prototipo desarrollado. $F_s = 1000$ Hz.
Fuente: elaboración propia.

Asimismo, se diseñó y elaboró el circuito impreso (PCB) de la etapa de adquisición, filtrado y acondicionamiento de señales de EMG (figura 11).

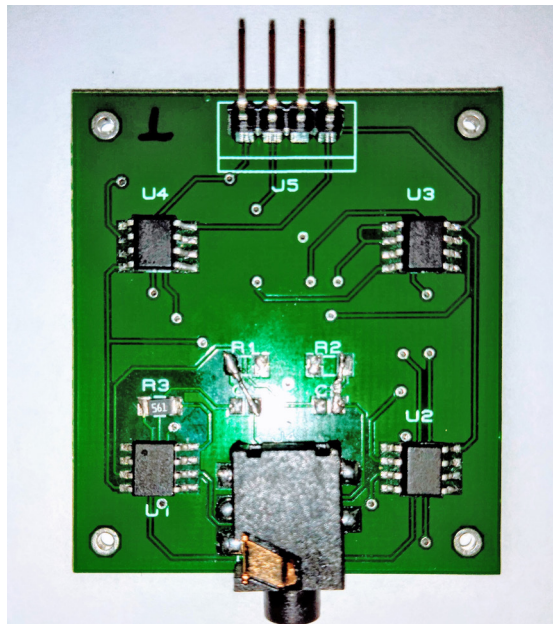


Figura 11. Tarjeta de adquisición, filtrado y acondicionamiento.
Fuente: elaboración propia.

También se puede mencionar como resultado el circuito de control y procesamiento de señales de EMG (figura 12).

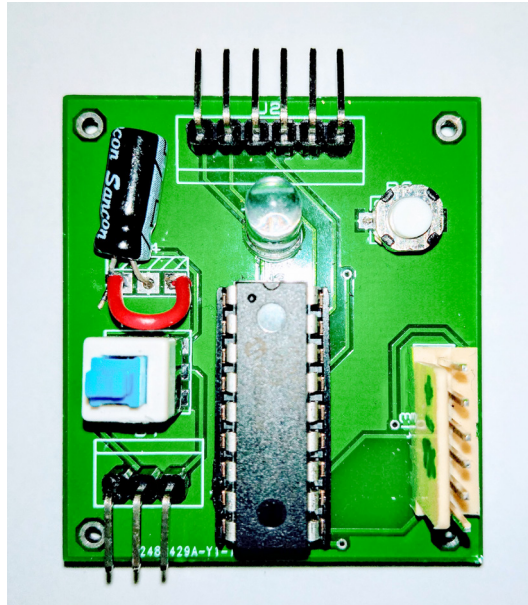


Figura 12. Tarjeta de control y procesamiento de señales de EMG.

Fuente: elaboración propia.

El prototipo (figura 13) posee seis compartimentos: en dos se encuentran los circuitos de regulación (el regulador de voltaje negativo de 5 V y positivo de 5 V, y las baterías de 9 V). Dos compartimentos para cada canal, donde se encuentran los circuitos de amplificación y filtrado de señal. Finalmente, un compartimento para el circuito de control y procesamiento, y el último para el Bluetooth.



Figura 13. DetSim, el prototipo desarrollado, con sus compartimentos y accesorios.

Fuente: elaboración propia.

Para situar los electrodos adecuadamente, se utilizaron tres bandas elásticas con velcro en sus extremos: una banda para los dos electrodos del músculo flexor superficial común de los dedos, una banda para los dos electrodos del músculo flexor largo del pulgar y el último para el electrodo de referencia situado en la muñeca (Hermens, 1999). Los canales y la referencia se conectaron por medio de un cableado a las tarjetas de amplificación y filtrado (figura 14).

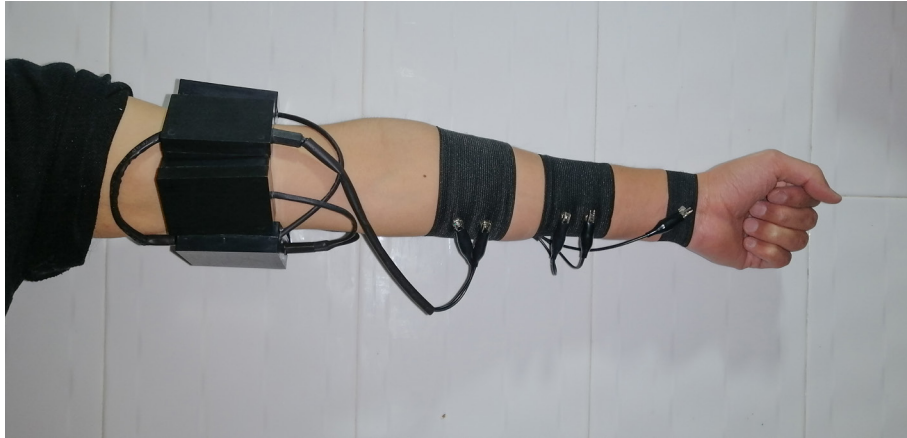


Figura 14. Localización y ajuste del prototipo en el antebrazo.
Fuente: elaboración propia.

3.3 Software de interfaz gráfica

La interfaz gráfica que se desarrolló en Matlab enlaza el prototipo hardware con el PC para recibir la información necesaria de las señales de EMG. Luego se realiza el procesamiento mediante aproximación temporal y espectral, y posteriormente todos estos datos se pueden almacenar en vectores o exportarlos a Excel para entrenar más adelante la red neuronal artificial (RNA). Por último, una vez ha sido entrenada la red, se pueden obtener nuevamente señales de EMG y determinar qué símbolo del alfabeto de la lengua de señas se ha realizado con el detector desarrollado (figura 15).

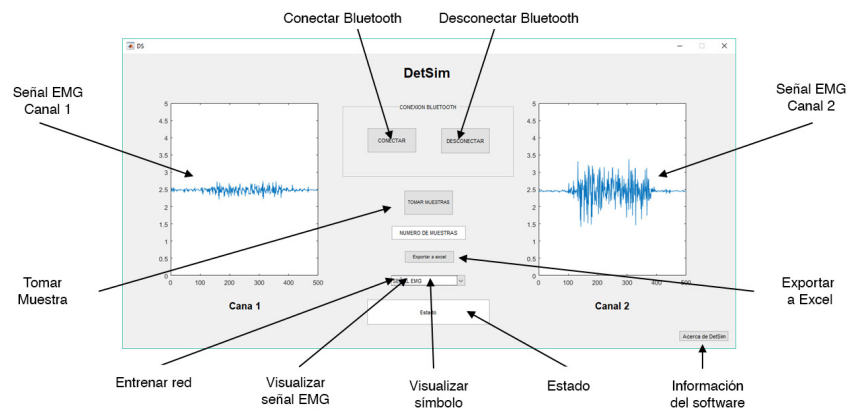


Figura 15. Software de procesamiento e interfaz gráfica desarrollada.
Fuente: elaboración propia.

3.4 Comparación de la adquisición de las señales de EMG con dispositivo certificado

Para comparar la adquisición de señales de EMG del prototipo desarrollado con un dispositivo certificado, se utilizó el equipo Biopac MP36 (figura 16), que permite obtener señales biomédicas como EMG, ECG, EEG, entre otras. El fabricante provee un software en el cual se pueden visualizar las señales capturadas y guardar los datos y las gráficas obtenidas, así como realizar algunas funciones, como la transformada de Fourier, integración y derivación. Se debe aclarar que este dispositivo solo adquiere señales, pero no realiza entrenamiento con redes neuronales o reconocimiento de patrones de movimiento en tiempo real. Los datos capturados con este dispositivo sirvieron para probar el algoritmo de detección de señas que se implementó en el software de interfaz gráfica desarrollado.



Figura 16. Dispositivo Biopac MP36.

Fuente: Biopac (2018).

En la figura 17 se presenta una señal de EMG obtenida con el dispositivo Biopac MP36 en el músculo flexor superficial común de los dedos con electrodos de superficie adhesivos desechables.

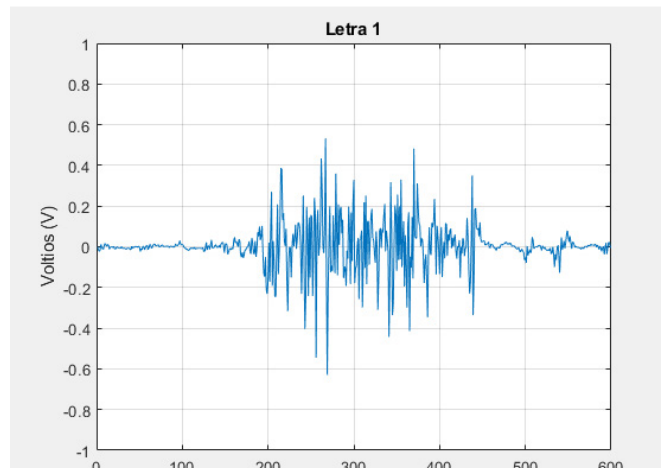


Figura 17. Señal obtenida con el dispositivo Biopac MP36.

Fuente: elaboración propia.

3.5 Resultados finales

Los datos de las señales de EMG registradas con el prototipo DetSim y con el equipo Biopac MP36 se procesaron en el software desarrollado para comprobar el funcionamiento de la detección de los gestos de cada símbolo del alfabeto elegido de la lengua de señas. A continuación, se muestran los resultados de la detección de los cinco gestos para los símbolos del alfabeto elegidos de la lengua de señas (A, C, L, Q y V).

3.5.1 Resultados con datos Biopac MP36

A partir de los datos analizados (figura 18) se puede inferir que de 50 movimientos realizados, 10 para cada gesto representado, el entrenamiento obtuvo un porcentaje de éxito del 96%. Esto equivale a 48 gestos reconocidos y a un porcentaje de error del 4%, que equivale a dos movimientos no identificados. El único movimiento que no fue reconocido en su totalidad fue la letra A, con ocho movimientos identificados y dos erróneos.



Figura 18. Diagrama circular que representa el entrenamiento realizado con los datos obtenidos con el dispositivo Biopac MP36.

Fuente: elaboración propia.

3.5.2 Resultados con datos del prototipo DetSim

En contraste con la información anterior, el prototipo DetSim obtuvo un porcentaje de acierto en tiempo real del 86%, que equivale a 100 movimientos entrenados (tabla 1). El porcentaje de error fue del 14%, es decir, 14 movimientos no identificados. Los movimientos poco reconocidos (gestos reconocidos) corresponden a los símbolos del alfabeto A y C, con un porcentaje del 16% y 15%, que significa 31 símbolos identificados de 40 realizados (figura 19).

Tabla 1. Símbolos que detectó DetSim de cien movimientos realizados

Símbolos (letras)	Movimientos detectados
Letra 1 (A)	16
Letra 2 (C)	15
Letra 3 (L)	19
Letra 4 (Q)	18
Letra 5 (V)	18
Error	14
Total	100

Fuente: elaboración propia.

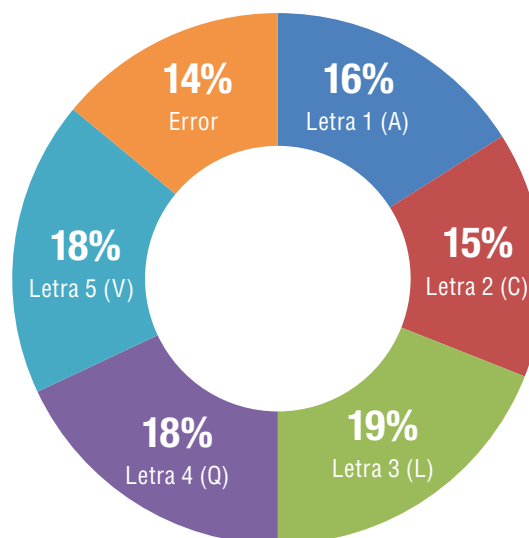


Figura 19. Diagrama circular que representa el entrenamiento realizado con los datos obtenidos con el prototipo DetSim.

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, los símbolos 1 y 2 (A y C, respectivamente) no fueron reconocidos correctamente. Esto se debe a que no es adecuado seleccionar dos músculos flexores porque se confunden entre sí cuando la persona realiza movimientos de cierre (figura 20), de tal manera que no es posible obtener un porcentaje alto del 100% en el entrenamiento de la red neuronal. En cambio, los símbolos 3, 4 y 5 (L, Q y V, respectivamente) tienen movimientos donde no actúa el músculo flexor superficial común de los dedos, sino el músculo extensor común de los dedos. Además, en la ejecución de estos símbolos no se flexiona el músculo flexor largo del pulgar, pero sí actúan otros músculos que se encargan de la pronación y extensión del pulgar.

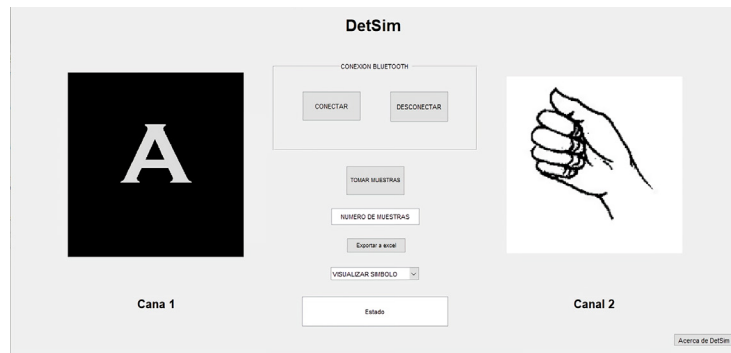


Figura 20. Visualización del símbolo detectado en el software desarrollado.

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados, se puede determinar el error absoluto (ecuación 6).

$$\begin{aligned} \text{Error absoluto} &= |\text{test} - \text{entrenamiento}| \\ \text{Error absoluto} &= |86 - 99| = 13 \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 6})$$

También se determinó el error relativo (ecuación 7).

$$\begin{aligned} \text{Error relativo} &= \frac{|\text{test} - \text{entrenamiento}|}{\text{entrenamiento}} \\ \text{Sensibilidad} &= \frac{86}{86 + 14} = 0.86 \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Por último, se calculó la sensibilidad, que es una estimación usada en bioestadística para detectar que un parámetro es realmente positivo a partir de los verdaderos positivos (VP) y los falsos negativos (FN) (ecuación 8).

$$\begin{aligned} \text{Sensibilidad} &= \frac{VP}{VP + FN} \\ \text{Sensibilidad} &= \frac{86}{86 + 14} = 0.86 \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 8})$$

4. Conclusiones

Cuanto mayor número de muestras se definan, más altos serán los porcentajes de acierto, lo cual es conveniente cuando entra a operar la red neuronal artificial (RNA), ya que entonces tendría un rango amplio para comparar las características de la señal y así poder determinar qué símbolo se ha realizado. Esto se comprobó tomando pocas muestras de los movimientos: aunque la red realizaba bien el entrenamiento, cuando hacía el reconocimiento en tiempo real el porcentaje de acierto bajaba para cada movimiento entre el 50% y el 70%.

Los resultados evidencian que se requiere ajustar la velocidad de transmisión y el procesamiento en el microcontrolador de los dos canales EMG adecuados, con el fin de alcanzar

el doble de la frecuencia más alta de la señal 500 Hz para poder reconstruirla según los requerimientos de muestreo de Nyquist. Por esta razón, fue necesario configurar el Timer para obtener 1000 muestras por segundo, así como procesar y transmitir los datos en la ventana de tiempo de 1 mS. Además, la transmisión serial asíncrona se configuró en el sistema a 115 200 bits/s.

Para cada sujeto de prueba es necesario realizar un análisis de señales diferente, ya que la fisonomía del brazo cambia para cada persona y esto puede afectar las señales de EMG capturadas.

Para evitar problemas en la adquisición de las señales es necesario situar adecuadamente los electrodos de acuerdo con la normatividad Seniam y mantener el brazo en una posición correcta, ya que cuando la persona realiza el movimiento de pronación de la mano, los músculos cambian de posición y los electrodos toman señales de zonas no apropiadas.

Los parámetros espectrales entregan una mejor información para discriminar la señal, ya que los parámetros temporales pueden variar por características o por las zonas elegidas de los músculos del antebrazo.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas de la Universidad Central. Nos gustaría agradecer a todos los miembros del personal de este laboratorio que siempre estuvieron dispuestos a apoyarnos durante este trabajo.

Referencias

- Betancourt O., G., Giraldo Suárez, E., & Franco B., J. (2004). Reconocimiento de patrones de movimiento a partir de señales electromiográficas. *Scientia Et Technica*, 3(26). <https://doi.org/10.22517/23447214.7045>
- Biopac. (2018). Upgrade to mp36 system. <https://www.biopac.com/product/upgrade-to-mp36-system/>
- Caicedo Bravo, F., & López Sotelo, J. (2009). *Una aproximación práctica a las redes neuronales artificiales*. Universidad del Valle.
- Cifuentes González, I. A. (2010). *Diseño y construcción de un sistema para la detección de señales electromiográficas* [tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Yucatán] Repositorio Institucional UADY. <http://redi.uady.mx/>
- Hermens, H. J., Freriks, B., Merletti, R., Stegeman, D., Blok, J., Rau, G., Disselhorst-Klug, C., & Hägg, G. (1999). *European recommendations for Surface Electromyography Results of the SENIAM project*. Renssingh Research and Development. <http://www.seniam.org/pdf/contents8.PDF>
- Riño Ríos, C. A., & Quintero Machado, V. E. (2010). *Control de una mano virtual usando señales electromiográficas* [tesis de pregrado, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio Institucional UMNG. <http://hdl.handle.net/10654/3302>

Mil palabras en acción

A thousand words in action

Los textos de mil palabras que se presentan en esta sección son el resultado del quehacer de los profesores en investigación, extensión y docencia, en sus respectivos campos de acción. La escritura de cada texto, sus gozos y usos, fue acompañada por un grupo de trabajo y un seminario permanente inaugurado para este fin. Por ello, tienen el tono comprometido de las conversaciones en la universidad, en los salones de los eventos, en las páginas de las revistas. Su propósito es comunicar la faena de la ingeniería, la ciencia o sus aprendizajes.

Bioingeniería: construyendo el futuro

Luis Armando Carvajal Ahumada*

La bioingeniería está llamada a ser una de las disciplinas que durante este siglo XXI ayudará a construir el futuro, un futuro que además avanza a ritmos sin precedentes. Como un pequeño ejemplo, en estos últimos 70 años hemos recopilado más información y aprendido más de ella que durante todo el resto de nuestra historia como humanidad, por lo que los retos y desafíos que propone la actualidad son de una exigencia máxima. Pero antes de hablar del futuro debemos remontarnos al pasado para así entender de dónde venimos y hacia dónde vamos.

Durante el siglo XIX era común que el papel del médico no tuviera mucha importancia en la vida diaria. Era frecuente que cuando una persona enfermaba, su lugar de recuperación fuera la casa y que la mayoría de “remedios” fueran caseros y de origen natural. Si la persona enferma no mejoraba con los tratamientos de casa, era muy probable que falleciera, por lo que la expectativa de vida era mucho menor que la actual.

Sin embargo, el siglo XIX no se despidió sin dejarnos uno de los mayores regalos que las ciencias biomédicas pudieran recibir. En 1895, el investigador W. K. Röntgen daba a conocer el resultado de su trabajo: “Sobre una nueva clase de rayos”, que posteriormente se llamaron los rayos X. Fue esta innovación la que permitió explorar el interior del cuerpo humano de forma no invasiva, un avance que cambiaría el rumbo de la medicina para siempre.

Posteriormente, con el inicio del siglo XX, la medicina continuó sufriendo cambios propiciados por las ciencias aplicadas, principalmente la química, la física y la ingeniería, de tal manera que se acercaba cada vez más a ser una disciplina científica, pero sin dejar de ser también un arte basado en la observación y la experiencia. Un claro ejemplo es el del fisiólogo holandés Willem Einthoven, quien propuso la primera metodología para medir la actividad cardíaca del corazón.

* Ingeniero electrónico de la Universidad Nacional de Colombia. MSc. en Bioingeniería, Universidad Politécnica de Madrid. Doctor en Ingeniería Biomédica, Universidad Politécnica de Madrid (España). Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica hasta 2020, Universidad Central. Correo: luis.carvajal@docentes.umb.edu.co

Ya para mediados del siglo XX, todo el mundo científico, y puntualmente la medicina, viviría uno de sus mayores auges propiciado principalmente por la guerra. En las décadas de 1930 y 1940 hubo por primera vez colaboración y trabajo conjunto entre profesionales y especialistas de diferentes áreas, ingenieros trabajando mancomunadamente con médicos, físicos, matemáticos y biólogos, lo cual dio lugar a desarrollos como el ultrasonido en medicina, la guerra química, máscaras para proteger a las personas de los agentes químicos, aviones volando a velocidades supersónicas, bombas nucleares y, por primera vez, intentando de manera conjunta entender el funcionamiento del complejo mecanismo de la vida y la naturaleza, para solo encontrar mejores formas de acabar con ella...

Afortunadamente la guerra terminó y luego de su finalización fue evidente para muchas de las instituciones involucradas, tanto gubernamentales como académicas, que la sinergia generada por estos grupos interdisciplinarios había sido tan exitosa que era necesario que siguiera existiendo el trabajo colaborativo interdisciplinario. Fue así que, en consecuencia, se comenzaron a fundar las primeras escuelas y centros de investigación en bioingeniería y ciencias biomédicas en Europa y Estados Unidos. Algunos ejemplos son el laboratorio de Ingeniería en Medicina del Imperial College, fundado en 1963, con sus investigaciones en los efectos fisiológicos en aeronáutica, el ultrasonido como aplicación biomédica y la mecánica de fluidos respiratorios, y el Departamento de Bioingeniería de la Universidad de Washington, fundado en 1967 con especialidad en pruebas cardiacas y hemodiálisis.

A finales de la década de 1990 y comienzo de los años 2000, algunas otras universidades de relevancia académica y científica mundial se sumaron a la creación de departamentos y programas en bioingeniería y ciencias biomédicas. Por ejemplo, en Berkeley, el Departamento de Bioingeniería se fundó en 1998. En Stanford, la idea de crear el Departamento en Bioingeniería se materializó en enero de 2002. En Harvard, la Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas John A. Paulson (SEAS, por su sigla en inglés) fue fundada en 2007 con el objeto de investigar en ingeniería de células y tejidos, biomateriales, suministro de fármacos, robótica, imágenes, biomecánica y neuroingeniería.

Ahora bien, con base en este pequeño brochazo de historia, podríamos definir a la bioingeniería como aquella disciplina que interpreta, modela e interviene los fenómenos físicos, los sistemas biológicos y tecnológicos, e integra métodos y criterios propios de la ingeniería para diseñar e implementar soluciones sostenibles a necesidades y retos definidos desde la sociedad, respetando los principios éticos, morales y sociales. De esta definición, hay algunas palabras que cobran mayor relevancia en la actualidad: los principios éticos, morales y sociales.

En 1865, Julio Verne publicaba su libro *De la Tierra a la Luna*, y cien años después, en 1969, la misión del Apolo 11 colocaba a dos hombres en la Luna: Neil Armstrong y Edwin Aldrin. Una brecha de cien años entre la ficción y la realidad. Ahora bien, la película *Gattaca*, de 1997, nos habla de la edición genética y cómo la humanidad desarrolla humanos mejorados genéticamente, y tan solo 18 años después, en 2015, la investigadora Jennifer Doudna hablaba en un TED Talk de una técnica de edición de genes (Crispr) como una tecnología que podría proporcionar la solución para muchas enfermedades genéticas. En 2018, un científico chino, He Jiankui, anunciaba al mundo que había editado genéticamente dos gemelas haciéndolas resistentes contra el virus causante del sida. Meses después fue condenado a cárcel y a pagar una multa de tres millones de yuanes. Una investigación técnicamente prometedora, pero carente de toda ética.

Son muchos los desafíos que este siglo trae a la humanidad: el cambio climático, el aumento de personas mayores en todo el mundo, la falta de nuevas fuentes de generación de energía, el exceso de contaminación ambiental, nuevas enfermedades multirresistentes, entre otros muchos, que requieren de urgentes soluciones, las cuales en gran medida serán propuestas desde la bioingeniería. Por lo tanto, ingenieros y bioingenieros están llamados a formarse intelectualmente para poder contar con las herramientas necesarias para proponer soluciones a todas estas problemáticas, pero también están llamados a formarse en principios y valores para que sean capaces de discernir el camino que se debe trazar y la manera en que se deben implementar dichas soluciones.

Ciencias y tecnologías convergentes (NBCI): fundamentación teórica de la Maestría en Bioingeniería y Nanotecnología

Óscar Leonardo Herrera Sandoval* y Yaneth Vásquez Ochoa**

La convergencia científica-tecnológica se refiere a la combinación sinérgica de cuatro disciplinas “NBCI” (Nano, Bio, Info, Cogno), que han tenido un rápido avance en el desarrollo de investigaciones en áreas como: (1) nanociencia y nanotecnología; (2) biotecnología y biomedicina, incluyendo ingeniería genética; (3) tecnología de la información, incluida la informática y las comunicaciones avanzadas, y (3) ciencia cognitiva, incluida la neurociencia cognitiva.

Son numerosos los ejemplos del impacto que la convergencia científico-tecnológica ha logrado desde hace poco más de una década en nuestra sociedad. Dentro de los más destacados se pueden mencionar: los avances en el campo de las neuroprótesis, mediante las cuales un paciente con tetraplejía puede mover a voluntad un brazo robótico, gracias a una serie de microelectrodos conectados directamente a la corteza motora, como parte de una interface cerebro-máquina (Collinger *et al.*, 2013; Hochberg *et al.*, 2012); el desarrollo de nanobiosensores que pueden ser empleados para identificar agentes patógenos de difícil diagnóstico en humanos (Liu *et al.*, 2012) o para la identificación de toxinas, pesticidas, antibióticos y diversos contaminantes en alimentos (Yang *et al.*, 2016), donde las estructuras biológicas sensibles al agente que se debe detectar son interconectadas con los arreglos no biológicos, mediante los cuales se pueden cuantificar los niveles presentes en una muestra; el diseño de estructuras a nanoescala que facilitan la adhesión celular, así como la proliferación celular para la regeneración celular y para la ingeniería de tejidos (Souza *et al.*, 2014), y el uso de sistemas operados remotamente para el desarrollo de cirugías, bien sea para dar el tratamiento requerido por un paciente que se encuentra distante del especialista, bien para la planeación de cirugías con alto riesgo o incluso para el entrenamiento del personal médico, en los cuales un robot desarrolla actividades de alta precisión directamente sobre un paciente (Galluzi *et al.*, 2015).

* Físico de la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero electrónico de la Universidad Antonio Nariño (Colombia). MSc. en Ingeniería Electrónica y Computadores de la Universidad de Los Andes (Colombia). Ph.D. en Nanotecnología Università Degli Studi Di Genova (Italia). Posdoctorado en Nanotecnología en Technische Universität Darmstadt (Alemania). Profesor asociado de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central. Correo: oherreras@ucentral.edu.co

** Licenciada en Química y Biología de la Universidad Libre de Colombia. MSc. en Ciencias Biológicas y Ph.D. en Ciencias Biológicas de la Pontificia Universidad Javeriana. Profesora asociada de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central. Correo: ovasquez@ucentral.edu.co

La convergencia científico-tecnológica es considerada el motor del desarrollo del siglo XXI (Bainbridge & Roco, 2016) y sus bases provienen de la Teoría General de los Sistemas (TGS) y la cibernética. Dos principios de la TGS nos proporcionan los elementos de análisis: por una parte, el primero plantea la superposición de los sistemas que permite configurar sistemas de mayor nivel y complejidad, con lo cual señala un orden jerárquico. El segundo principio es el isomorfismo de las leyes fundamentales de las ciencias, donde algunas leyes generales aplican para diversos sistemas independientemente de su naturaleza. Por otra parte, la cibernética, que se ocupa del mando, el control y las regulaciones de los sistemas, señala los escenarios en que la convergencia opera y operará.

Por tanto, estos campos del conocimiento transdisciplinarios nos muestran una nueva visión del mundo. Principios como la jerarquía, el isomorfismo de las leyes y la realimentación son algunos de los aspectos que pueden ser tomados como origen de los principios de la convergencia científico-tecnológica, los cuales se describen a continuación.

1. Unidad material a nanoescala

Este principio postula que es posible interpretar la convergencia tecnológica con base en la unidad material a nanoescala, lo cual da como resultado el uso de estructuras unificadas o módulos, tales como clústeres atómicos o biomoléculas. Roco y Bainbridge (2004) plantean como unidades básicas de la convergencia científico-tecnológica a las neuronas (o las sinapsis en un planteamiento más reciente; Roco *et al.*, 2013), los bits, los átomos y los genes (figura 1), es decir, las unidades básicas de construcción de la convergencia entre las ciencias de la vida, las ciencias físicas y la ingeniería.

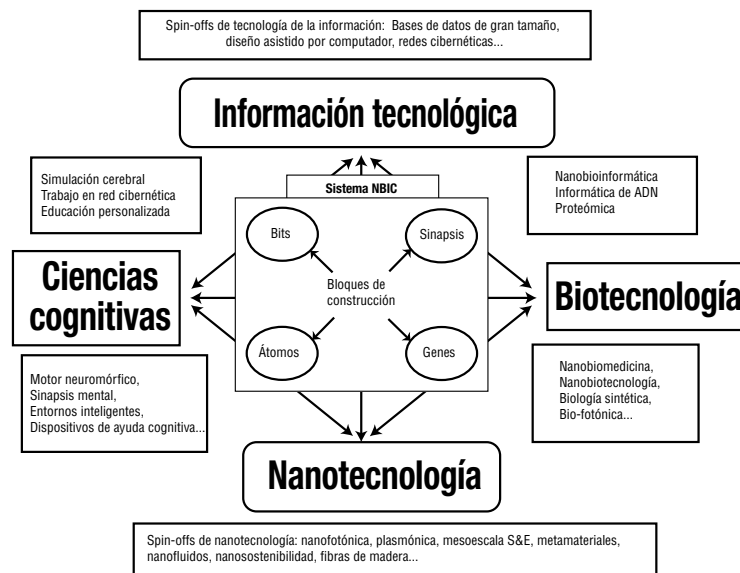


Figura 1. Integración de la ciencia y la técnica a partir de "building blocks"
 Fuente: adaptado de Roco y Bainbridge (2004).

2 La integración de ciencia y tecnología, caracterizada por la transformación e intercambio de instrumentos propios de cada campo

En el estudio de las unidades básicas de construcción de la convergencia ha sido necesario implementar instrumentos científicos, métodos analíticos y nuevos materiales provenientes de diferentes campos científicos. Estos instrumentos propios de cada campo han encontrado una serie de articulaciones que permiten aproximar, ya no solo el conocimiento, sino también las estrategias de uso de dichos instrumentos y de los “nuevos” métodos aplicables a los elementos de estudio. La fisicoquímica de materiales, junto con el procesamiento de señales, los sistemas de control, las técnicas de la biología molecular o el procesamiento de imágenes, evidencian la integración que emerge en el ámbito tecnológico gracias a las posibilidades de intercambio de instrumentos propios de cada campo.

3. Sistemas jerárquicos y complejos

El concepto de *sistema* es entendido como un conjunto de elementos que guardan estrechas relaciones entre sí, que se mantienen unidos de manera estable y cuyo comportamiento persigue un objetivo (Arnold & Orozco, 1998). Es fundamental señalar que en este principio se trabaja con sistemas que mantienen estructuras jerárquicas, es decir, que pueden ser modelados mediante sistemas conformados a su vez por otros subsistemas (Roco & Bainbridge, 2004; Roco *et al.*, 2013). Los modelos complejos indican la cantidad de elementos presentes en un sistema, sus potenciales interacciones y el número posible de estados que se producen a partir de estos.

4. El esfuerzo por mejorar las condiciones de vida humana, con las correspondientes implicaciones éticas

Este es quizás uno de los mayores paradigmas de la evolución de los conceptos de la TGS y la cibernética. Los avances generados por la convergencia científico-tecnológica de los últimos quince años, sumados al potencial de inversión que movilizan estos nuevos campos (Roco *et al.*, 2013), ponen en el centro de la discusión la posibilidad de manipular la naturaleza, ya no solo a nivel físico, sino también a nivel biológico, con las consideraciones éticas que esto implica. Este planteamiento es, entonces, una de las bases de discusión más importantes que facilita la convergencia entre las posiciones de las ciencias sociales, las ciencias humanas con las ciencias naturales y la ingeniería, y sobre la cual el desarrollo de los modelos económicos, sociales y culturales en los próximos años puede llegar a transformarse significativamente.

La convergencia científico-tecnológica entre las cuatro áreas centrales (Nano, Bio, Info, Cogno), soportada por los principios y conceptos de la TGS y la cibernética, demarca el objeto de estudio de la Maestría en Bioingeniería y Nanotecnología de la Universidad Central y la Fundación Universitaria de Ciencias de la Salud: “La aplicación de los conceptos y métodos de la ingeniería, con los principios de la convergencia científico-tecnológica, al estudio de sistemas biológicos y físicos para buscar solución a problemas de las ciencias de la vida”.

La trayectoria de nuestras dos instituciones nos permite asumir con suficiencia el desarrollo académico y disciplinar que este programa demanda. Nuestra infraestructura y la formación de los docentes que participan en el programa nos permiten implementar y potenciar la convergencia disciplinar indispensable para viabilizar este programa y garantizar su impacto social, que en últimas es nuestro mayor objetivo.

Referencias

- Arnold, M., & Osorio, F. (1998). Introducción a los conceptos básicos de la teoría general de sistemas. *Cinta de Moebio. Revista de Epistemología de Ciencias Sociales*, 3. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10100306>
- Bainbridge, W. S., & Roco, M. C. (2016). Science and technology convergence: with emphasis for nanotechnology-inspired convergence. *Journal of Nanoparticle Research*, 18(7), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s11051-016-3520-0>
- Collinger, J. L., Wodlinger, B., Downey, J. E., Wang, W., Tyler-Kabara, E. C., Weber, D. J., & Schwartz, A. B. (2013). High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia. *The Lancet*, 381(9866), 557-564.
- Galluzzi, L., Pietrocola, F., Bravo-San Pedro, J. M., Amaravadi, R. K., Baehrecke, E. H., Cecconi, F., & Kimmelman, A. (2015). Autophagy in malignant transformation and cancer progression. *The EMBO Journal*, 34(7), 856-880.
- Hochberg, M. C., Altman, R. D., April, K. T., Benkhalti, M., Guyatt, G., McGowan, J., & Tugwell, P. (2012). American College of Rheumatology 2012 recommendations for the use of nonpharmacologic and pharmacologic therapies in osteoarthritis of the hand, hip, and knee. *Arthritis Care & Research*, 64(4), 465-474.
- Liu, Y. Y., Wang, Y., Walsh, T. R., Yi, L. X., Zhang, R., Spencer, J., & Yu, L. F. (2016). Emergence of plasmid-mediated colistin resistance mechanism MCR-1 in animals and human beings in China: a microbiological and molecular biological study. *The Lancet Infectious Diseases*, 16(2), 161-168.
- Roco, M. C., Bainbridge, W. S., Tonn, B., & Whitesides, G. (2013). *Converging knowledge, technology and society: beyond convergence of Nano-Bio-Info-Cognitive Technologies*. Springer. http://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-02204-2_208.pdf
- Roco, M. C., & Bainbridge, W. S. (2004). Converging technologies for improving human performance. *Journal of Nanoparticle Research*, 6(6), 671-671. <https://doi.org/10.1007/s11051-005-2296-4>
- Souza Carvalho-Wodarz, C., Repnik, U., Collnot, E. M., Schneider-Daum, N., Griffiths, G. W., & Lehr, C. M. (2016). A 3D co-culture of three human cell lines to model the inflamed intestinal mucosa for safety testing of nanomaterials. *Nanotoxicology*, 10(1), 53-62.
- Yang, Y., Faust, J. J., Schoepf, J., Hristovski, K., Capco, D. G., Herckes, P., & Westerhoff, P. (2016). Survey of food-grade silica dioxide nanomaterial occurrence, characterization, human gut impacts and fate across its lifecycle. *Science of the Total Environment*, 565, 902-912.

Fortalecimiento del trabajo conjunto universidad-industria, un aprendizaje que nos deja la coyuntura de salud generada por la COVID-19

Víctor Felipe Vallejo Rodríguez*

La coyuntura de salud pública que ha enfrentado nuestro país y el resto del mundo, relacionada con la COVID-19, no solo ha generado dificultades en términos de salud, sino que además ha afectado un amplio espectro de sectores, del que no se escapa la educación. A pesar de esto, la coyuntura también ha evidenciado aspectos muy positivos en la manera como se han enfrentado estos desafíos. En especial, ha sido muy grato y satisfactorio ver cómo las universidades han participado activamente en generar soluciones para mitigar los impactos de la COVID-19, lo cual demuestra las capacidades que tienen para atacar problemáticas de manera rápida, confiable y de calidad, así como para aportar a mercados que en su momento podían ser desconocidos.

Una de las grandes misiones que tenemos como ingenieros es diseñar e implementar propuestas tecnológicas basadas en herramientas de ingeniería que aborden los desafíos de la vida real. En este sentido, la coyuntura de salud actual ofreció oportunidades para continuar cumpliendo con nuestra misión, como lo atestigua el hecho de que gran parte de las soluciones desarrolladas desde las universidades para afrontar la COVID-19 nacieron en las facultades de ingeniería.

En este contexto, la Universidad Central y su Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas han propuesto soluciones desde diferentes áreas que vale la pena mencionar: por un lado, una de nuestras estudiantes de biología, junto con una estudiante de diseño industrial de la Universidad del Bosque y una odontóloga especialista ganaron el primer premio del reto Cascos de Vida, organizado y patrocinado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), con el diseño de una barrera de protección para mitigar el contagio de la COVID-19.

Por otro lado, existe el convenio macro Universidad Central-Fundación Universitaria de Ciencias de la Salud (FUCS), que ha dado frutos importantes, como la creación de la Maestría en Bioingeniería y Nanotecnología, el desarrollo de proyectos de investigación conjuntos y el plan de implementación de un pregrado en bioingeniería. En el marco de

* Ingeniero electrónico de la Universidad Central con maestría en Automatización y Robótica de la Universidad Técnica de Dortmund. Profesor de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas de la Universidad Central. Correo: vvallejor@ucentral.edu.co

este convenio, aprovechando la amplia experiencia médica de la FUCS y nuestra trayectoria en desarrollo tecnológico, a través de la Unidad de Diseño, Innovación e Integración de Tecnología (DIT) se conceptualizó la creación del ventilador mecánico controlado por presión y por volumen. Cabe resaltar que esta iniciativa tiene como elemento vital el trabajo conjunto interdisciplinario y la participación de actores relevantes, como personal médico, técnico, hospitales, especialistas, etc.

El trabajo inicial entre el personal médico-técnico de las dos instituciones facilitó que en cuestión de semanas nuestros investigadores e ingenieros de la Unidad DIT se documentaran acerca de los conceptos médicos relacionados con la ventilación mecánica, lo cual les permitió proponer una primera solución funcional de un ventilador mecánico controlado por presión. Esta propuesta se evaluó rápidamente en el laboratorio para validar la funcionalidad básica de un mecanismo para introducir y sacar aire de los pulmones (inspiración/espiron) controlando la presión ejercida sobre estos a unos intervalos determinados (frecuencia respiratoria) (figura 1).



Figura 1. Validación inicial de la funcionalidad básica del prototipo propuesto en los laboratorios de la Universidad Central.
Fuente: elaboración propia.

Una vez se validó la funcionalidad básica de la solución propuesta, se diseñó e implementó el primer prototipo funcional, para el cual se desarrolló una tarjeta electrónica especialmente diseñada para ventilación mecánica, la cual tuvo en cuenta elementos como electroválvulas, interfaz humano-máquina, escalabilidad para nuevas funcionalidades, entre otros aspectos. Asimismo, se realizó la estructura metalmecánica del dispositivo de acuerdo con los estándares de protección, estabilidad, ángulos de visibilidad, movilidad, etc. Las variables controladas del prototipo fueron certificadas por una empresa de metrología biomédica, que validó el correcto funcionamiento del ventilador (figura 2).

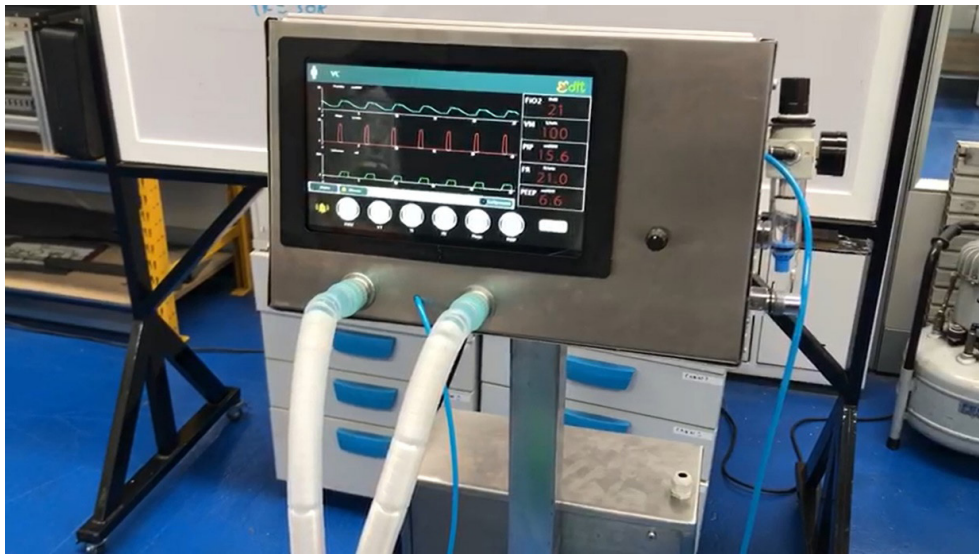


Figura 2. Primer prototipo funcional del ventilador mecánico desarrollado entre la Universidad Central y la FUCS.
Fuente: elaboración propia.

Después de obtener la certificación, se realizaron pruebas animales en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Nacional de Colombia. Los resultados de las pruebas fueron extremadamente satisfactorios, por lo cual el proyecto está actualmente en revisión por parte del Invima, entidad encargada de aprobar la fabricación del ventilador y autorizar su subsecuente uso médico.

Es muy satisfactorio ver el esfuerzo, no solo de la academia, sino también de muchos sectores y de la comunidad en general para generar propuestas, soluciones o aportar con donaciones que impacten de alguna manera a la mitigación de la problemática de salud. En estos tiempos de dificultad, la visibilidad de esos esfuerzos y voluntades es de vital importancia y dan un aliento de esperanza.

Uno de los grandes aprendizajes y resultados de las soluciones que se han desarrollado para combatir la coyuntura de salud pública ha sido la unión entre las universidades y la industria, así como el trabajo colaborativo e interdisciplinar, lo cual ha permitido que se desarrollen dispositivos de alto impacto y calidad de manera rápida y eficaz. Estos procesos deben ser un punto de inflexión para que las universidades y las empresas flexibilicemos nuestros procesos internos para trabajar colaborativamente de una manera efectiva y fortalecer la competitividad de la industria colombiana.

Otro aprendizaje significativo ha sido considerar la importancia de la propiedad industrial en estos procesos de desarrollo e innovación. En la elaboración de nuestro ventilador se usó estratégicamente la propiedad industrial, en especial patentes de dominio público de ventiladores comerciales para fortalecer el proyecto con información tecnológica abierta. También cabe mencionar que algunas empresas líderes en la manufactura de ventiladores liberaron algunas patentes de sus modelos antiguos como aporte a la coyuntura y el desarrollo rápido de prototipos.

Todo este esfuerzo colectivo y las capacidades que se han visibilizado durante esta coyuntura crea una expectativa interesante frente a un escenario post-COVID-19, de modo que la industria colombiana, apoyada desde la academia, pueda competir en el desarrollo y fabricación de dispositivos médicos y soluciones tecnológicas en diferentes mercados. El fortalecimiento de la unión universidad-industria en Colombia debe ser un objetivo común y vital para el crecimiento y el desarrollo de nuestro país.



La preparación editorial del volumen 4 de *Ingeciencia* estuvo a cargo de Ediciones Universidad Central.

En la composición del texto se utilizaron fuentes Bembo Std, Memphis LT Std y Centaur.

La revista se publicó en 2021 en la ciudad de Bogotá.

Indicadores



UNIVERSIDAD
CENTRAL