

# Microscopía de fuerza magnética: principio, aplicaciones y perspectivas

Magnetic force microscopy: principle, applications and perspectives

Cristhian Almonacid Rojas<sup>\*</sup>, Óscar Herrera Sandoval<sup>\*\*</sup> y José Augusto Galvis<sup>\*\*\*</sup>

---

---

## 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 Convergencia (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

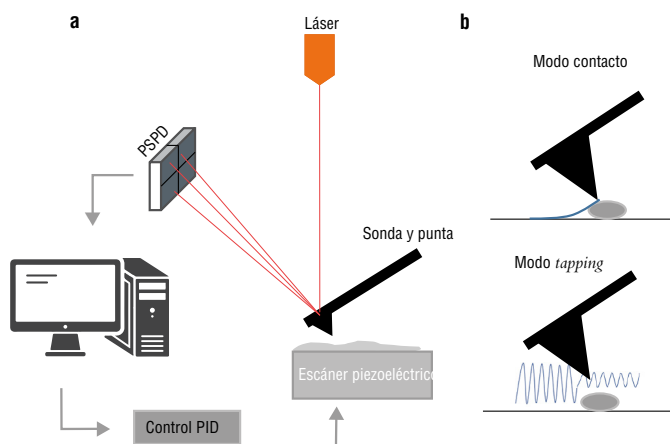
One of the main purposes of the nanotechnology is the correct use of the material properties which emerge in the nanoscale ( $10^{-9}$  m) to be used in the improvement of all aspect of humanity. One of the minimal condition to reach new Nanotechnological developments is the access and use of the right 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.



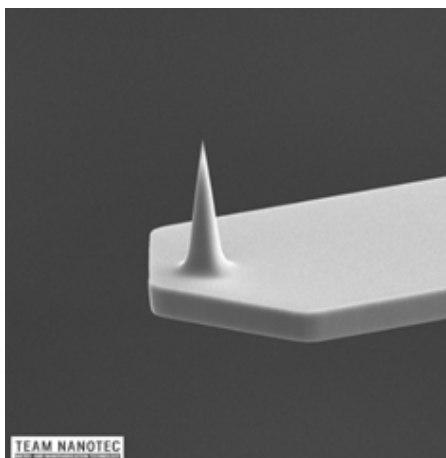
**Figura 1.** Componentes que integran un microscopio de fuerza atómica (AFM).  
**Fuente:** elaboración propia.

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  $\sim 8$  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)

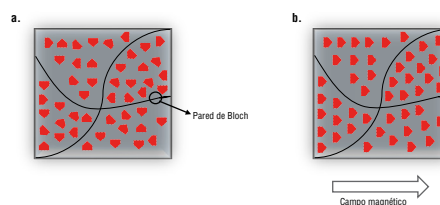
En este modo, la sonda cuenta con una punta magnética para interactuar con los dominios magnéticos presentes en la muestra. La fuerza magnética generada entre la punta y la muestra se usa para reconstruir la estructura magnética de la superficie que se estudia. Durante el proceso de barrido actúan diferentes 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.

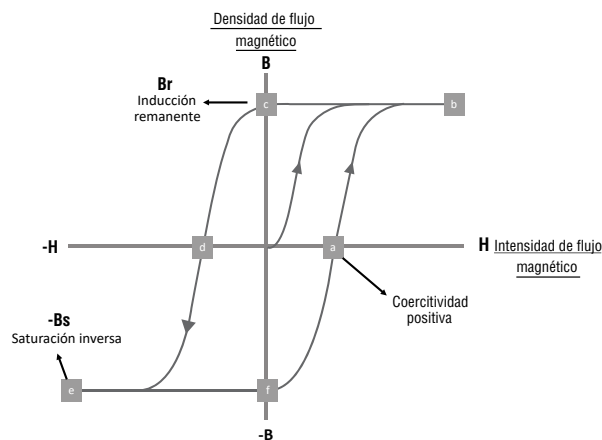


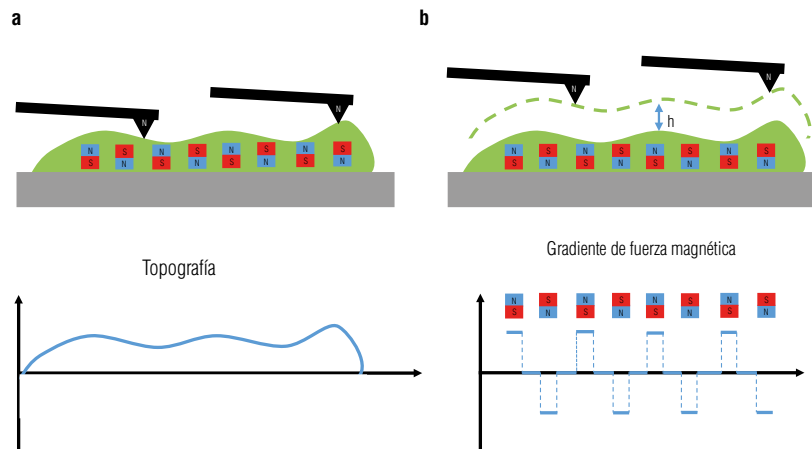
Figura 4. Ciclo de histéresis.

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 ( $\text{\AA}$ ) (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:



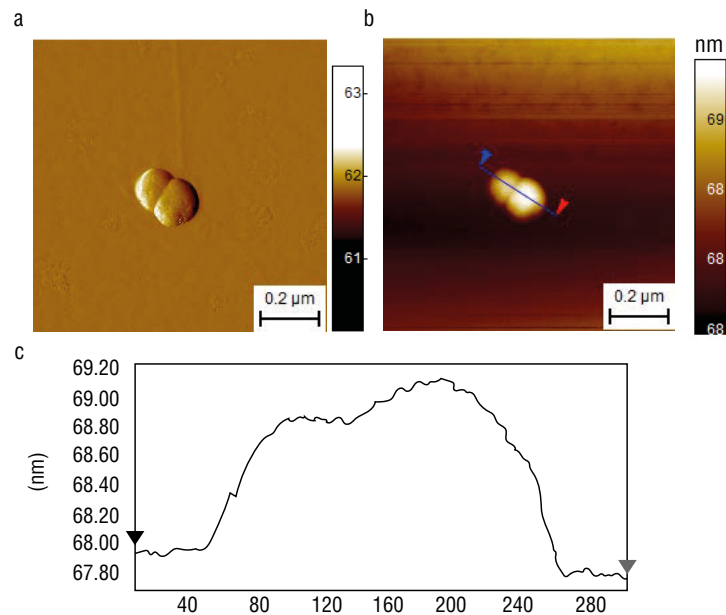
$$F'_z = -\frac{2k}{f_0} \Delta f' \quad (\text{Ec. 1})$$

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.



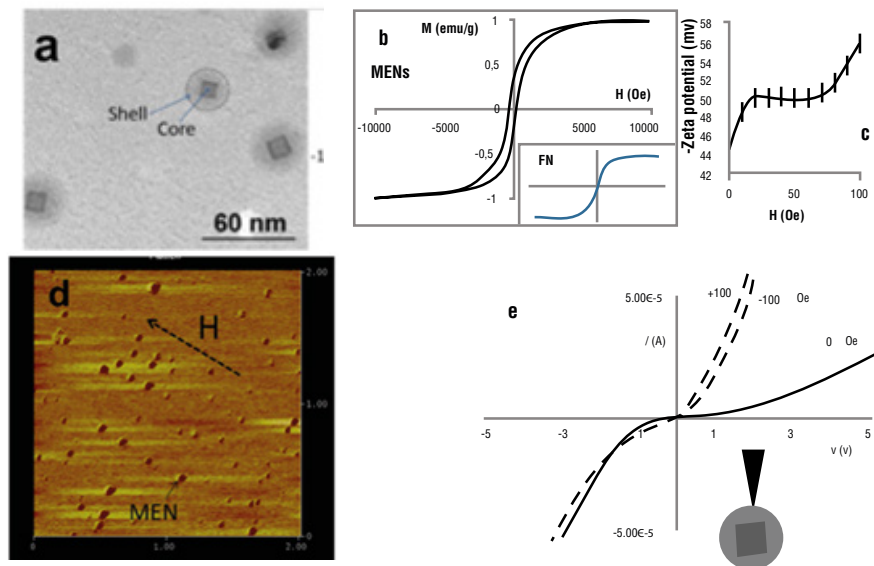
**Figura 6.** Imanes de AFM de dos nanopartículas de hierro, tomadas en el AFM de la Universidad Central. (a) Topografía en modo *tapping* de las nanopartículas. (b) Imagen de la respuesta magnética de las nanopartículas en modo MFM. (c) Cambio de amplitud en la oscilación de la sonda debido a la interacción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

mide a través del cambio que sufre la amplitud de oscilación ( $\Delta A$ ) de la sonda del AFM. La figura 6c muestra el valor de  $\Delta A$  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.



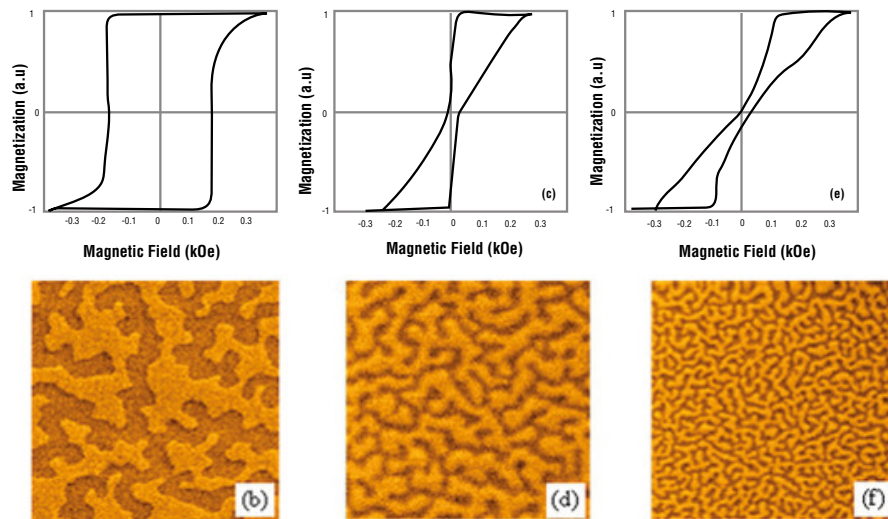
**Figura 7.** Caracterización de MEN con un microscopio electrónico de transmisión (TEM) (a) y MFM (b, c, d, e).

**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  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  y un caparazón de  $\text{BaTiO}_3$ . 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).

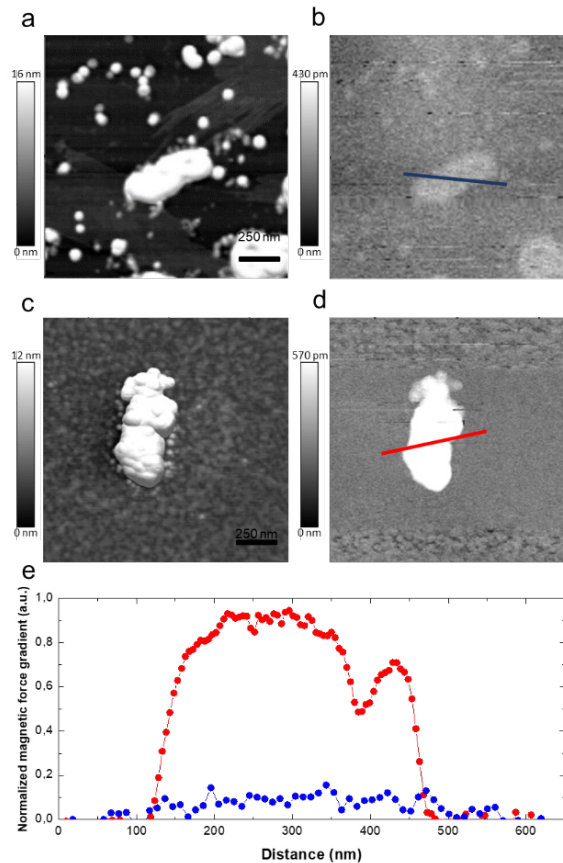
**Fuente:** Ermolaeva *et al.* (2017).

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.