

---

## **Microscopía de fuerza atómica: técnica, equipo y aplicaciones**

**Santiago Sandoval**  
samos16@gmail.com  
**José Otálora**  
jcoa3@hotmail.com

**Grupo Física de Materiales**

### **Resumen**

Uno de los principales métodos de caracterización de superficies y películas delgadas es el de la microscopía de fuerza atómica, el cual permite obtener la morfología de la superficie desde el rango de los micrómetros y armstrong donde pueden hacerse medidas de tamaño de grano y rugosidad de la superficie, aún bajo ciertas condiciones especiales, el nivel atómico de especial interés en el campo de la nanotecnología. Se hace una introducción a la técnica, se describe su electrónica y funcionamiento. Se amplía el tema de los "cantilevers" y las puntas del equipo, describiendo su estructura, la resolución y la curva de fuerzas debida a las interatómicas implicadas en especial la fuerza de Van der Waals. También se describen algunas de las aplicaciones de la microscopía de fuerza atómica, que permiten obtener mayor información de la superficie, tales como sus propiedades magnéticas, eléctricas y su dureza.

**Palabras clave:** microscopía de fuerza atómica, cantiléver, punta AFM, nanotecnología.

### **Introducción**

La microscopía de fuerza atómica (AFM) examina la superficie de una muestra con una punta aguda, de un par de micrómetros de longitud y menos de 100Å en diámetro. La punta está localizada en la punta libre de un cantiléver que es de 100 a 200µm de longitud. Las fuerzas entre la punta y la superficie de la muestra producen que el cantiléver se curve o desvíe. Un detector mide la desviación del cantiléver a medida que la punta es barrida sobre la muestra, o la muestra es barrida bajo la punta. Las desviaciones medidas del cantiléver permiten a un computador generar un mapa de la superficie

topográfica. Los AFM pueden ser usados para estudiar aislantes y semiconductores tanto como para conductores eléctricos.

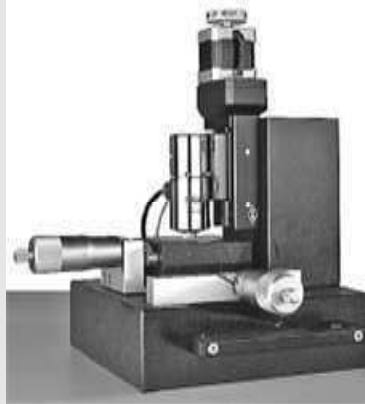


Figura 1. Microscopio de fuerza atómica  
Fuente: Sampson, 1996

### Microscopía de fuerza atómica

Un esquema de un microscopio de fuerza atómica se muestra en el diagrama. La muestra está montada sobre un detector piezocerámico que puede moverse con precisión en las coordenadas X, Y y Z. La muestra es barrida en las direcciones X y Y con una punta afilada. Esta punta está montada en el fin libre de un cantiléver sobre el que se enfoca un rayo láser.

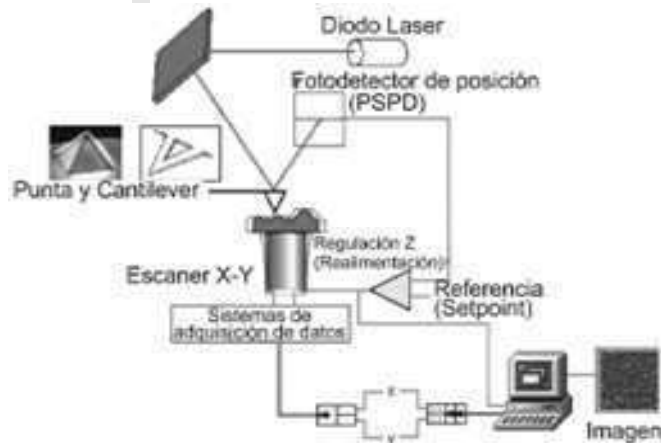


Figura 2. Esquema de funcionamiento de un AFM, en donde las desviaciones del cantiléver son medidas por dispositivos ópticos que miden las desviaciones que sufre el rayo láser al reflejarse en el cantiléver

El rayo se refleja en la parte trasera del cantiléver hacia un juego de cuatro diodos fotosensibles. Estos detectan cualquier desviación del láser que se origine en el cantiléver que se mueve a medida que la muestra es barrida. Una realimentación actúa para mover el piezodetector en la dirección Z que lleva el rayo láser a su posición original. De esta manera la muestra se examina con una fuerza constante y el resultado de los movimientos del detector en Z producen un mapa topográfico de la región barrida con una resolución Vertical menor que  $1\text{\AA}$ ; en los casos favorables. El AFM puede usarse en una variedad de ambientes, en aire, en UHV o bajo los líquidos.

### **Operación de realimentación**

El AFM puede operar en dos modos principales: 1) Con control de realimentación y 2) Sin control de realimentación. Si la realimentación electrónica se enciende, entonces el piezodetector que está moviendo la muestra (o punta) de arriba abajo puede responder a cualquier cambio en la fuerza que detecte, y altera la separación de la punta-muestra para restaurar la fuerza a un valor predeterminado. Este modo de funcionamiento es conocido como "de fuerza constante" y normalmente permite obtener una imagen topográfica bastante fiel.

Si la realimentación electrónica se apaga se dice que el microscopio está operando en altura constante o modo de deflexión. Esto es particularmente útil para visualizar muestras relativamente planas a alta definición. A menudo es mejor tener una cantidad pequeña de ganancia de realimentación, para evitar los problemas de fluctuaciones térmicas o la posibilidad de que una muestra áspera dañe la punta y/o el cantiléver. Este modo también se conoce como modo de señal de error. El modo de señal de error puede mostrarse aunque la realimentación se encienda; esta imagen quitará las variaciones lentas de la topografía pero resaltará los bordes.

### **Modos de trabajo**

Varias fuerzas contribuyen típicamente a la desviación de un cantiléver de AFM. La fuerza más comúnmente asociada con la microscopía de fuerza atómica es una fuerza de interacción llamada la fuerza de Van der Waals. La dependencia de la fuerza de Van der Waals entre la distancia entre la punta y la muestra se muestra en la figura 3.

Dos regiones están señaladas en la figura 3: 1) La región de contacto y 2) La región de no-contacto. En la región de contacto el cantiléver se mantiene a menos de unos pocos angstrom de la superficie de la muestra, y la fuerza interatómica entre el cantiléver y la muestra es repulsiva. En la región de no-contacto el cantiléver se mantiene en el orden de diez a cien armstrong de la superficie de la muestra, y la fuerza interatómica entre el cantiléver y la muestra es atractiva (grandemente como un resultado de las interacciones de Van der Waals de largo alcance).

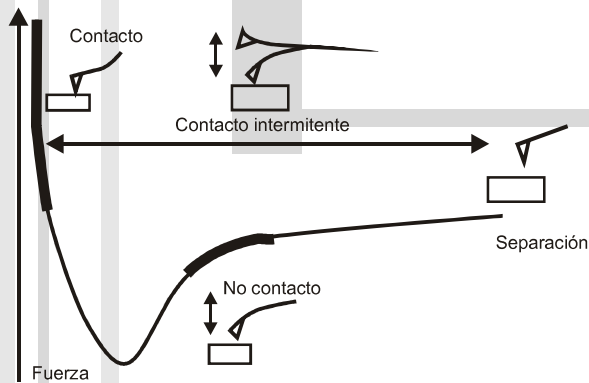


Figura 3. Gráfica de la fuerza de Van der Waals en función de la separación en donde se señalan las regiones para cada uno de los modos de trabajo en AFM

Existe otro modo que presenta ciertas ventajas en el análisis y ha superado en algunas limitaciones de los modos de contacto y no contacto, es el modo de contacto-intermitente, en donde la punta del cantiléver vibrante se acerca más a la muestra, así que en el fondo de su viaje esta apenas toca, o golpea la muestra. La región de operación intermitente está indicada en la curva de Van der Waals en la figura 3. La amplitud de oscilación del cantiléver cambia en respuesta a la distancia punta-muestra. La imagen que representa la topografía de superficie se obtiene monitoreando estos cambios.

### Cantiléver

Los cantilevers y las puntas son componentes críticos en un sistema AFM, porque determinan la fuerza aplicada a la muestra y en últimas la resolución lateral del sistema.

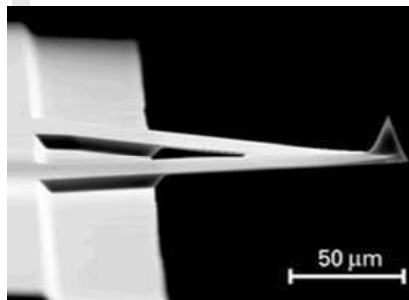


Figura 4. Imagen SEM de un cantiléver  
Fuente: Sampson, 1996

La punta y el ensamblaje del cantiléver puede estar fabricado de silicio o nitruro de silicio usando técnicas de fotolitografía. Más de 1000 puntas y cantilevers son producidas de una oblea de silicio. Los cantilevers en forma V son los más populares, proporcionando baja resistencia a la deflexión vertical, y alta resistencia a la torsión lateral. Los cantilevers usualmente tienen un largo de 100 a 200 $\mu\text{m}$ , 10 a 40 $\mu\text{m}$  de ancho, y 0.3 a 2 $\mu\text{m}$  en espesor y mantienen la constante de resorte. Las puntas de AFM son sondas micromaquinadas, monolíticas de silicio, que muestran una excelente uniformidad y un agudo radio de punta. El radio de la punta de menos de 10 nm da una buena resolución. Para una información detallada acerca de la forma de la punta que usted esté utilizando, además de su morfología, se recomienda el modulo caracterización de puntas del software SPIP (The Scanning Probe Image Processor) (Nanoscience Instruments, 2003).

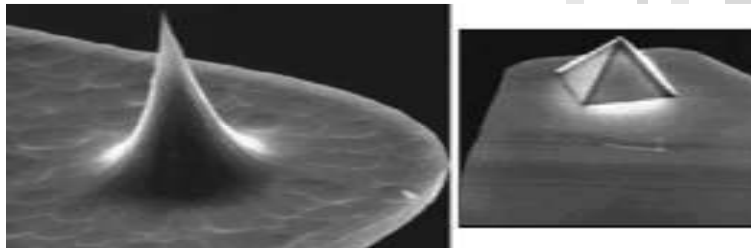


Figura 5. Imagen SEM de una punta "ultratip (izquierda)"  
Imagen SEM de una punta en forma piramidal (derecha)  
Fuente: Sampson, 1996

## Resolución

La resolución lateral de una imagen de AFM se determina por dos factores: El tamaño del paso de la imagen y el radio mínimo de la punta. Las puntas más agudas disponibles comercialmente tienen radios tan pequeños como 50Å. Debido a que el área de interacción entre la punta y la muestra es una fracción del radio de la punta estas puntas usualmente proporcionan una resolución lateral de 10 a 20Å. De este modo, la resolución de las imágenes de AFM mayores que 1 $\mu\text{m}$  por 1 $\mu\text{m}$  está usualmente determinada no sólo por la punta sino por el paso de la imagen. La mejor resolución de un AFM, sin embargo, depende sobre cómo se define la resolución. En la comunidad de la microscopía dos asperezas (picos) se consideran resueltos si la imagen satisface el criterio de Rayleigh. El criterio de Rayleigh requiere que la altura de la imagen se reduzca por lo menos 19% entre las asperezas, como se ilustra a continuación

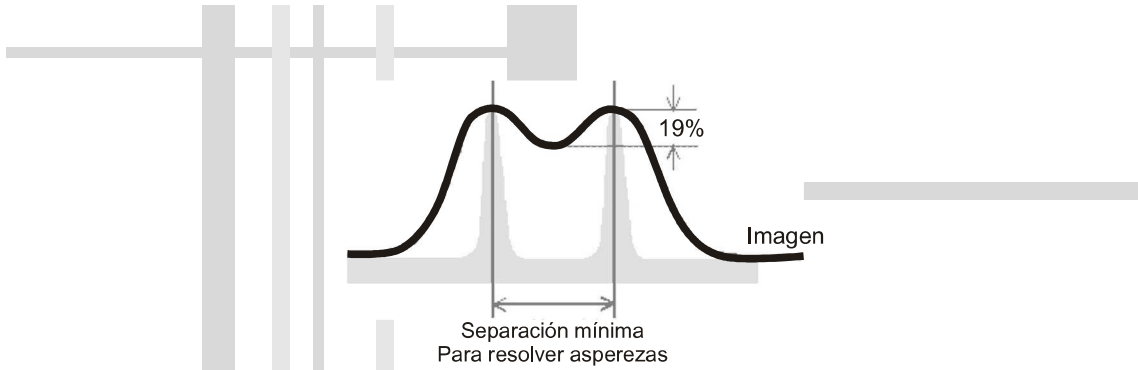


Figura 6. Definición de la resolución lateral usando el criterio de Rayleigh

La separación mínima entre asperezas resueltas determina la mejor resolución lateral del sistema. Usando esta definición, la resolución lateral de un AFM con las puntas más agudas disponibles comercialmente es de 10 a 20Å. Un STM da la verdadera resolución atómica. Debido a que la dependencia de la corriente de tunelamiento en la separación punta-muestra es exponencial, sólo el átomo más cercano de una buena punta de STM interactúa con el átomo más cercano en la muestra, como se muestra a continuación. Para AFM la dependencia de desviación del cantiléver en la separación punta-muestra es más débil. El resultado es que varios átomos en la punta interactúan simultáneamente con varios átomos en la muestra.

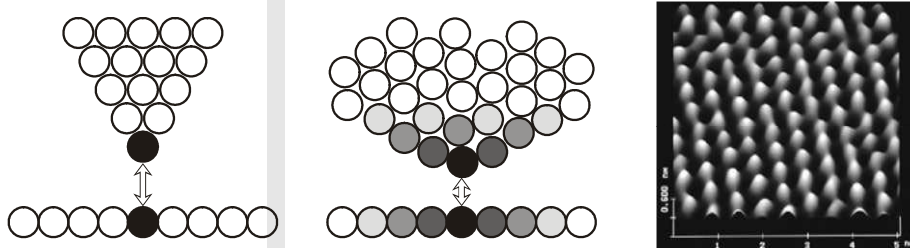


Figura 7. Interacción atómica para un STM (izquierda) y un AFM (centro).

El sombreado muestra la intensidad de la interacción, imagen de una muestra sometida al AFM (derecha)

Fuente: spmlab.science, 2004

## Conclusiones

El AFM puede visualizar en forma de análisis de rugosidad superficies conductoras y aislantes, a menudo con la misma resolución como el microscopio de efecto túnel.

La punta y el ensamblaje del cantiléver puede estar fabricado de silicio o nitruro de silicio usando técnicas de fotolitografía. Los cantilevers usualmente tienen un largo de 100 a 200 $\mu\text{m}$ , 10 a 40 $\mu\text{m}$  de ancho, y 0.3 a 2 $\mu\text{m}$  en espesor.

El tamaño del paso de la imagen y el radio mínimo de la punta son claves en la resolución lateral de un AFM.

La principal perspectiva de microscopia de fuerza atómica es la nanotecnología, que permitirá la miniaturización electrónica y la manipulación de polímetros.

### Referencias bibliográficas

Howland, R., y Benatar, L. (1997). *A Practical Guide to Scanning Probe Microscopy*. Extraído de <http://web.mit.edu/cortiz/www/AFMGallery/PracticalGuide.pdf>

NanoScience Instruments. (2003). *The Scanning Probe Images Processor*. Extraído de [http://www.nanoscience.com/products/SPIP\\_download.htm](http://www.nanoscience.com/products/SPIP_download.htm)

Sampson, A. (1996). *Scanning Electron Microscopy*. Advanced Research Systems. Extraído de <http://www.sem.com/analytic/sem.htm>

The Compton Group. (2001). *Chemistry at the Solid-Liquid Interface, Atomic Force Microscopy*. Extraído de <http://physchem.ox.ac.uk~rgc/research/afm/afm1.htm>.