

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA
MARÍA**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA
VALPARAÍSO – CHILE**



**ESTUDIO DE LA FUERZA DE ADHESIÓN DE
PARTÍCULAS DE SOILING CON MICROSCOPIA
DE FUERZA ATÓMICA**

Cristobal Ignacio Ruiz Rebolledo

**PROYECTO PARA OPTAR AL GRADO DE LICENCIANDO EN CIENCIAS CON
MENCIÓN EN FÍSICA**

**PROFESORA GUÍA:
COMITÉ DE PROYECTO:**

**Dra. Valeria Del Campo Sfeir
Dr. Tomas Corrales
Dr. Patricio Haberle**

ABRIL – 2023

Agradecimientos:

El autor de este trabajo agradece el apoyo financiero de los siguientes proyectos: “Graphene as transparent current spreading electrode in silicon heterojunction solar cells” proyecto ANID-ECOS210038 #C21E08; “Millennium Nucleus in NanoBioPhysics” proyecto ANID - Millennium Science Initiative Program NNBP # NCN2021_021, “Glass nanopatterning for self cleaning photovoltaic modules” proyecto Fondecyt # 1210490; “Óxidos conductores nanoestructurados” proyecto PI_LIR_2020_16, “Programa de Investigación y Desarrollo de Tecnologías Fotovoltaicas de alta Radiación y Climas Desérticos” proyecto 17PTECES-75830, CORFO y “Solar Energy Research Center” proyecto FONDAP # 15110019.

Agradece también a amigos por su compañía a lo largo de la carrera, la familia por su apoyo incluso a larga distancia y profesores y compañeros del grupo del laboratorio que hicieron posible esta investigación y con su ayuda a lo largo del proceso. Sobre todo, a mi pareja, quien me dio su apoyo y cariño incondicional a lo largo de todo el proceso.

Índice

Resumen	3
Abstract.....	4
Antecedentes.....	5
Motivación.....	6
Estado del arte	7
Objetivo general	9
Objetivos específicos.....	9
Metodología.....	9
Resultados.....	14
Conclusiones preliminares.....	19
Proyecciones	19
Referencias	20

Resumen

La obtención de energía de forma más amigable con el medio ambiente es un tema que ha tomado fuerza en los últimos años, pues el desarrollo de nuevo conocimiento y nuevas tecnologías ha permitido abrir las puertas a nuevas opciones y mejoras en el campo. Una de las tecnologías más prometedoras y con mayor interés tanto, a nivel científico como de aplicación, es la energía solar fotovoltaica.

La energía generada con paneles fotovoltaicos consiste en utilizar la radiación proveniente del sol para la generación de electricidad, lo que es de gran interés por la alta disponibilidad de radiación solar que llega a la superficie en áreas como planicies y desiertos. La tecnología utilizada en la industria fotovoltaica lleva años siendo desarrollada y perfeccionada, sin embargo, aún no está cerca de alcanzar su máximo potencial.

Las mejoras a los paneles fotovoltaicos pueden ser implementadas en todos los ámbitos; desde su instalación hasta sus componentes. Es en este último punto donde centraremos la investigación, en específico en la capa protectora transparente de vidrio. Esta capa es la que se debe limpiar y cuidar constantemente en las instalaciones, pues al ensuciarse o dañarse generan un gran cambio en la eficiencia del módulo fotovoltaico. El ensuciamiento de los módulos por material particulado se conoce como *soiling*.

En este trabajo mediremos la fuerza de adhesión de las partículas de *soiling* sobre vidrio con microscopía de fuerza atómica (AFM). Para medir la fuerza de interacción primero debemos fabricar una sonda coloidal con un *cantilever* sin punta y una partícula del *soiling* recolectado directamente de paneles solares instalados en el Desierto de Atacama. El método para fabricar esta sonda consiste en utilizar un micromanipulador para acercar la esquina de la viga del *cantilever* sin punta a una muestra con un grano de arena previamente visualizado y escogido con un microscopio óptico. Luego buscamos fijar este grano a la punta de la viga para obtener la sonda que nos servirá para medir la fuerza de adhesión entre el grano de arena y diversas superficies por medio de microscopía de fuerza atómica.

Una vez fabricada la sonda, medimos la fuerza entre el grano de arena y una oblea de silicio, un vidrio recién sacado de la caja y un vidrio limpiado con isopropanol. Con esto, pudimos verificar que el método de fabricación de sonda coloidal es efectivo y que existe una diferencia entre las fuerzas del grano de arena sobre las distintas superficies a pesar de ser el mismo grano de arena para todas. Además, cambia la fuerza si el sustrato no se encuentra limpio, como es el caso del vidrio recién sacado de la caja en comparación con el mismo vidrio limpiado.

Abstract

Different ways to obtain energy in a more sustainable and eco-friendly manner is a topic that has gained strength during the last years thanks to the development of new knowledge and technology that opens the door to new opportunities and improvements in the field. One of the most promising technologies with interest in a scientific and applicated level is photovoltaic solar energy.

Energy is generated with photovoltaic panels by taking the radiation coming from the sun to generate electricity, this has a lot of interest thanks to the high availability of solar radiation in plains and deserts. The technology used in the photovoltaic industry has been developed during all these years but is not near to its maximum potential.

Improvements in photovoltaic panels can be implemented in every aspect, from its installation to the components. It is in the components where we will center the investigation, specifically in the glass protective layer. This layer is the one that must be cleaned and maintained constantly because any damage or soiling will drastically change the efficiency of the photovoltaic module.

In this work we will measure the adhesion force of this soiling particles on the glass with atomic force microscopy (AFM). To measure the force of the interaction first we have to fabricate a colloidal probe with a tipless cantilever and a particle of soiling from the photovoltaic panels installed at the Atacama Desert. The method to fabricate this probe consists in using a micromanipulator to approach the tip of the cantilever to a sample of soiling previously chosen with an optical microscope. Then we fix this particle to obtain the probe that will allow us to measure the adhesion force between the particle and different surfaces using atomic force microscopy.

Once the probe is fabricated, we measure the force between the sand particle and a silicon wafer, a fresh out of the box glass slide and a glass slide cleaned with isopropanol. We were able to verify the method to create the probe and notice a difference in the force measured between the particle and the different surfaces, although we used the same probe for every measurement. We were also able to notice a difference in the measured force when the surface was not cleaned as it is shown in the case of the different slides.

Antecedentes

El *soiling* corresponde a la deposición de partículas que al ser levantadas y llevadas por el aire pueden caer sobre los paneles solares y formar una capa de suciedad que no se quita fácilmente ni con el rocío natural ni con corrientes de vientos. Este proceso de deposición y cementación de las partículas de polvo puede verse afectado en el mecanismo y la recurrencia debido a la composición del polvo que se deposita sobre el panel y las condiciones climáticas del lugar donde se encuentre instalado. Es por esto que las investigaciones en el área han llegado a la conclusión de que, si bien, se puede estudiar las maneras en las que se genera el *soiling* de una forma generalizada, para cada caso en particular se debe estudiar el polvo y sus composiciones en conjunto con las condiciones climáticas de manera localizada y en cada contexto acorde a la instalación de los paneles solares.

El Desierto de Atacama es un lugar de interés en el área de las energías fotovoltaicas producto de la alta radiación que recibe a lo largo de todo el año. Sin embargo, es un desierto, y por lo mencionado anteriormente, sabemos que es un lugar complejo para la limpieza de los paneles, pues el *soiling* ocurre con mayor frecuencia que en otros lados. Esto se debe al ciclo diario que presenta el desierto, donde la temperatura y la humedad fluctúan lo necesario para fomentar el ciclo de generación de *soiling* [1], generando capa tras capa diariamente de este ensuciamiento en los paneles solares.

La fuerza de adhesión que se buscará en esta investigación es la correspondiente a la fuerza que mantiene las partículas de *soiling* del Desierto de Atacama adheridas a las superficies de los paneles solares, provocando una baja en su eficiencia y vida útil, además de una necesidad constante de limpiar estos paneles.

Un método para la medición de fuerzas de adhesión consiste en la utilización de una sonda coloidal. Este método es utilizado en diversas áreas de la ciencia pues permite conocer, por medio de distintos tipos de mediciones, características micro y macroscópicas de diversas moléculas y sus interacciones con otras moléculas o superficies. Estas características que se pueden estudiar varían desde el tipo de deposición de la partícula, su unión con otras del mismo tipo, sus procesos de adhesión y, lo que nos interesa a nosotros, la fuerza de adhesión de la partícula con otras o una superficie.

Este método sirve para medir fuerzas entre dos partículas coloidales o entre una partícula coloidal y un sustrato plano. Y la forma en la que se realiza esta medición es utilizando un AFM con un *cantilever* que, en vez de tener una punta, posee una sonda coloidal que fue previamente colocada allí. Con este *cantilever* utilizamos el modo fuerza del AFM para medir la deflexión del *cantilever* y, por desplazamiento vertical dentro del escáner, pudimos calcular la fuerza entre la sonda y la superficie plana.

Motivación

Las energías renovables no convencionales van en constante aumento a nivel global y de manera transversal en la sociedad pues son utilizadas tanto en las casas particulares como a nivel industrial.

Aquí es donde la energía fotovoltaica ha ido tomando un rol protagónico pues junto a la energía eólica ha ido en aumento su uso y popularidad a la vez que disminuye sus costos [2]. Por esto, hoy en día grandes empresas y agrupaciones científicas se dedican a mejorar las tecnologías alrededor de la energía fotovoltaica desde su diseño hasta su implementación. Por ejemplo, existen empresas dedicadas a la implementación de los paneles y la transformación de empresas que usan energías no renovables a empresas que se alimenten de energía fotovoltaica. Por otro lado, existen investigaciones que buscan mejorar los componentes de un panel fotovoltaico como el sistema de recolección de energía, el material del que está hecho o el material que recubre el panel.

Es en este último punto donde centraremos la atención en este proyecto, pues todos los paneles solares necesitan de una capa transparente que proteja los componentes del panel a la vez que permita el buen funcionamiento de éste al dejar pasar la luz. Y es debido a esta función de protección de los componentes internos del panel, que se debe cuidar, limpiar y mantener constantemente, pues además de recibir la radiación solar, debe resistir a las condiciones ambientales.

Al ensuciarse el panel su eficiencia en la generación de energía se verá afectada provocando bajas en la producción que pueden llegar a ser mayores al 1% diario [3]. La suciedad que reciban, y el polvo que se deposite sobre el panel, dependerá del lugar donde esté instalado, pues no es lo mismo tener un panel en el Desierto de Atacama a colocar un panel en el tejado de una casa en Alemania. Aunque ambos paneles puedan ser exactamente el mismo, deben tener mantenciones distintas debido a la diferencia entre los climas y zonas geográficas, añadiendo a esto, las partículas de polvo que se depositen sobre cada uno de estos paneles serán distintas, al igual que su mecanismo de deposición sobre la superficie [3], lo que llevará a protocolos de mantención y limpieza distintos.

Debido a todos estos factores que dependen de la localización de los paneles, es que, para efecto de lograr un estudio local y en el contexto nacional, estudiaremos el caso en específico del Desierto de Atacama. La elección de esta locación se debe al gran interés que en ésta posee la industria fotovoltaica debido a que es un lugar donde llega una gran cantidad de radiación. A pesar de poseer una temperatura y humedad relativa que varían constantemente a lo largo del día, estas son conocidas [1]. Actualmente existen plantas fotovoltaicas y centros de investigación recopilando datos y estudiando el área por lo que tenemos antecedentes del comportamiento del polvo, y en específico, del *soiling* que diariamente se genera en este lugar.

Es por estas razones que estudiaremos la interacción entre las partículas del *soiling* presente en los paneles fotovoltaicos instalados en el Desierto de Atacama y la superficie de vidrio

que recubre dichos paneles, en específico la fuerza. De este modo comprender el ensuciamiento que ocurre en el desierto a nivel de pocos micrones complementando así la investigación que se ha hecho hasta el momento.

Estado del arte

La investigación de Varga y Wiesner [4], [5] está dividida en dos trabajos que consisten en dos metodologías distintas para calcular y medir la fuerza de adhesión de distintos contaminantes con las superficies de los paneles solares.

En primer lugar realizaron mediciones con AFM creando sondas coloidales con 8 distintos contaminantes (polen de alfalfa, borosilicato, *fly ash*, grafito, yeso, polen de *lamb's quarter*, dióxido de silicio y *solosphere*) sobre una muestra correspondiente a un cubreobjetos de vidrio que simula la superficie del panel solar [4]. Para ver qué tipo de contaminante utilizar tomaron en cuenta el tipo de material más común presente en el polvo que se deposita sobre los paneles solares y seleccionaron muestras de partículas de cada tipo con ciertas características. Las características que buscaron para este trabajo fue que la muestra fuera lo más esférica y uniforme posible, para luego pegar esta partícula en un *cantilever* sin punta y utilizar microscopía de fuerza atómica con el objetivo de medir la fuerza de adhesión entre cada contaminante y un cubreobjetos de borosilicato que hace de la superficie del panel solar. Con cada muestra se realizaron 3 mediciones de fuerza en 5 posiciones distintas y luego realizaron gráficos que muestran la fuerza media de cada tipo de contaminante.

Para el segundo experimento se estudiaron 7 de los 8 tipos de contaminantes (dejando fuera la *solosphere*) pero con un método distinto al anterior, en el cual las muestras de polvo de cada tipo fueron depositadas sobre un cubreobjetos y fueron sometidas a fuerzas centrífugas para calcular de esta forma su fuerza de adhesión [5]. El método consistió en utilizar la fuerza centrífuga a distintas velocidades e ir midiendo con imágenes la cantidad de partículas que quedaban luego de cada ciclo de centrifugado. Los centrifugados fueron realizados a 1000, 3000, 5000, 7000 y 10000 rpm. Luego en base a modelos que utilizaron y conociendo los valores de la fuerza centrífuga calcularon un estimado de la fuerza de adhesión comparando las velocidades en rpm a la que fue cometida la muestra con la cual el 50% y el 90% de las partículas se desprendieron del sustrato. Todo esto con el fin de comparar estos resultados con aquellos obtenidos con el método de AFM.

Tabla 1: Fuerza de adhesión obtenida en estudio previo utilizando AFM en comparación a la fuerza centrífuga requerida para el desprendimiento de partículas [5].

particle type	average estimated diameter (μm)	adhesion force by AFM ¹⁴ (nN)	centrifugal force at 50% particle detachment (nN)	centrifugal force at 90% particle detachment (nN)
alfalfa	24.6–32.8	302 ± 21.4	65.9–183	183–359
lamb's quarter	25.6–29	204 ± 15.5	61.8–172	336–686
graphite	17.8–27.8	197 ± 13.2	52–103	209–301
gypsum	14.1–19.1	118 ± 2.60	2.84–25.6	139–284
flyash	9.5–20.1	92.0 ± 4.21	0–1.26	61.8–126
solosphere	10.8–18.6	100 ± 6.16	0–2.84	2.84–25.6
SiO ₂	14.3–30.3	79.5 ± 2.73	0–2.64	23.7–65.9

En primera instancia con los resultados obtenidos se puede ver una buena coherencia entre los valores obtenidos con método de AFM y con el método de la fuerza centrífuga. De acuerdo con los autores, los valores de las fuerzas son similares entre ambos métodos para cada tipo de partícula. La fuerza medida con AFM posee un menor rango comparado con el rango de la fuerza centrífuga al 90%.

La diferencia en las mediciones se le puede atribuir a las características de la morfología de las partículas. En muchos casos las partículas no eran perfectamente esféricas, lo que cambia su superficie de contacto con el vidrio afectando las fuerzas de adhesión dadas por las fuerzas de van der Waals [3]. Así al estudiar diversas partículas con diversas morfologías es esperable un cambio en la fuerza medida. Con el método AFM sólo se mide la fuerza entre una partícula y la superficie, mientras que con la fuerza centrífuga la muestra está compuesta de varias partículas que se someten a esta fuerza y luego se estima una media de fuerzas de adhesión. Además, al estudiar una sola partícula con el AFM, su fuerza de adhesión es un valor dado por el instrumento y no una estimación de la fuerza como lo es para el caso de la fuerza centrífuga.

Una razón que los autores indican como origen de las pequeñas diferencias en magnitud de las fuerzas medidas es la aparición de una fuerza electrostática que perturba la medición con el AFM cuando el *cantilever* con la partícula comienza a aproximarse a la superficie de vidrio. Esto se evidencia en las mediciones que Varga y Wiesner realizaron [4], donde la curva de fuerza en el eje horizontal se ve levemente desviada producto de esta fuerza, sin embargo, no fue estudiada en profundidad por el énfasis en las interacciones a pequeñas distancias.

Objetivo general

Crear una sonda coloidal con partículas de *soiling* extraído directamente de paneles solares instalados en el Desierto de Atacama para medir la fuerza de adhesión entre la partícula y la superficie del panel por medio de microscopía de fuerza atómica.

Objetivos específicos

Fabricar una sonda coloidal utilizando partículas de *soiling* del Desierto de Atacama y un *cantilever* sin punta.

Determinar la fuerza de adhesión entre la partícula de *soiling* y una superficie plana.

Comparar la fuerza de adhesión de la partícula de *soiling* sobre distintas superficies.

Metodología

Para lograr el objetivo de medir fuerza de adhesión entre partículas de *soiling* provenientes del Desierto de Atacama y distintas superficies, debemos conseguir aislar una partícula del polvo que compone dicho *soiling*. Luego basándonos en la metodología descrita por Indrieri, *et al.* [6], crear una sonda coloidal para luego utilizarla en un microscopio de fuerza atómica (AFM) para calcular estas fuerzas.

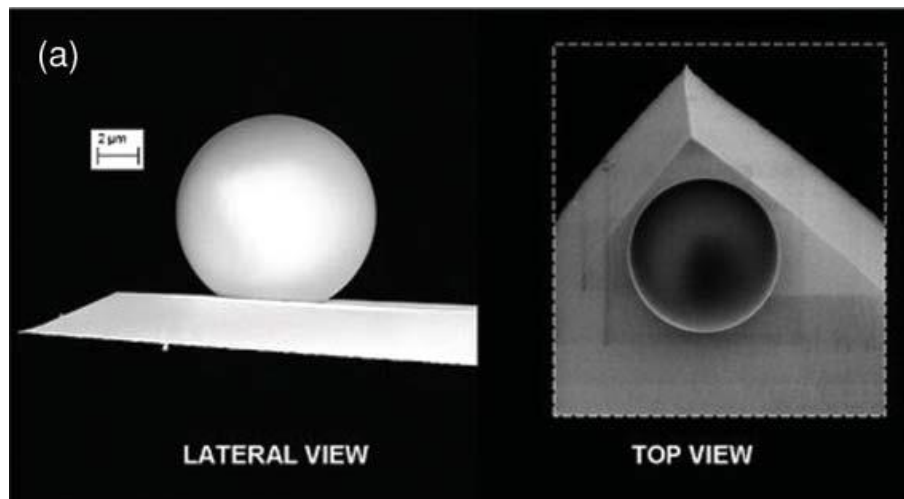


Figura 1: Sonda coloidal creada con el método libre de epoxi [6].

Para fabricar la sonda coloidal utilizaremos como muestra la parte del polvo que es soluble, por lo que ha sido previamente separado y seleccionado[1]. Del polvo soluble separamos granos de arena manualmente con ayuda de una espátula pequeña y un microscopio óptico para encontrar granos que puedan servir para crear la sonda coloidal. La principal característica que buscamos es que el grano posea una forma esférica y de un tamaño alrededor de los 20 μm .

El grano de arena debe ser lo más esférico posible para así minimizar el área de contacto y obtener una medición clara de la fuerza de adhesión [7]. Al ser esférica minimizamos las probabilidades de que haya más de un área de contacto entre la partícula y la superficie, además de permitirnos obtener un valor cuantitativo de la fuerza de adhesión. Por otro lado, la razón del tamaño de grano de arena que buscamos, es que en investigaciones anteriores se ha mostrado que partículas de un diámetro mayor a 50 μm suelen despegarse con mayor facilidad de las superficies de los paneles solares con ayuda del viento [4], por lo que no formarían gran parte del *soiling* presente en estos paneles. Además, el tamaño de las partículas del polvo en el Desierto de Atacama se encuentra en su mayoría entre 1 y 40 μm , por lo que un grano 20 μm sería representativo del promedio de tamaños presentes en el desierto.

Una vez que logramos aislar posibles granos candidatos para crear la sonda, los llevamos a un microscopio invertido que además posee un micromanipulador (Figura 2).

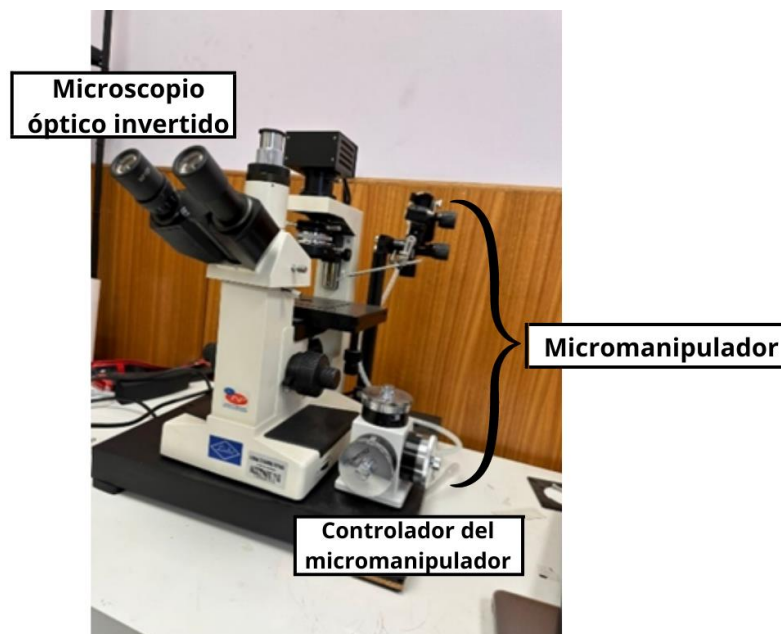


Figura 2: Configuración experimental del micromanipulador sobre el microscopio óptico invertido.

Con el micromanipulador acercamos el *cantilever* a los granos de arena seleccionados previamente para colocarlos en la punta y obtener así nuestra sonda coloidal.

Para lograr colocar el grano de arena nos basamos en una primera instancia en el procedimiento descrito por Indrieri, *et al.* [6] que consiste en acercar el *cantilever* a las partículas para que éstas por medio de la fuerza entre la partícula y el *cantilever*, y con ayuda de la adhesión capilar, se unieran. Luego llevarlas a un horno y calentarlas a 780°C por 2 horas con el objetivo de obtener una sonda coloidal con la cual hacer mediciones.

El primer obstáculo con el que nos encontramos en esta etapa fue el hecho de que el grano de arena, aunque lograra unirse al *cantilever*, con un leve movimiento se caía y volvíamos a tener el *cantilever* sin partículas. Con esto también perdíamos el grano de arena pues si no caía en el vidrio era imposible encontrarlo nuevamente. Para solucionar estos problemas intentamos aumentar la fuerza de capilaridad y utilizarla a nuestro favor mojando el *cantilever* con agua desionizada antes de colocarlo en el micromanipulador. Luego lo secamos con cuidado con una pistola de nitrógeno, así las pequeñas gotas de agua que quedaran serían capaces de formar meniscos de agua que unieran la partícula con el *cantilever* [6] ayudando a mantener la partícula adherida hasta el momento de llevarlo al horno y obtener así la sonda coloidal.

Aquí fue donde encontramos el segundo obstáculo, pues cuando logramos tener el *cantilever* con el grano de arena lo llevamos a un horno por 2 horas a 700°C para lograr obtener la sonda. Sin embargo, al momento de retirarlo del horno y verificar el estado de la partícula con el microscopio óptico pudimos observar que la partícula había desaparecido y se encontraba el *cantilever* nuevamente sin ningún grano de arena en su punta.

Viendo que había resultado el método de mojar previamente el *cantilever*, intentamos nuevamente este método, pero cambiando la forma de calentar la muestra, esta vez colocamos la muestra dentro de un vaso precipitado para luego colocarlo sobre un plato calefactor durante 1 hora 500°C. Una vez pasado el tiempo, nuevamente llevamos la muestra al microscopio óptico para verificar su estado y ver si la partícula había quedado en el lugar correcto. Pero nuevamente vimos que la partícula había desaparecido.

Para solucionar el problema de fijación de la partícula al *cantilever* utilizamos el procedimiento descrito por Zakerin [8], que reemplaza la sujeción de la partícula al *cantilever* con el horneado de la sonda por un epoxi que ayuda a mantener la partícula pegada. El epoxi utilizado fue el “Adhesivo Epóxico” para metal (Figura 3) con la metodología descrita por Zakeri que nos permite obtener una gota de epoxi lo suficientemente pequeña para que no interfiera en las mediciones de fuerza, pero lo suficientemente grande para que la partícula quedara adherida al *cantilever*. Este procedimiento consiste en obtener una gota pequeña con algún objeto pequeño y puntiagudo para luego, con ayuda del micromanipulador bajo el microscopio óptico, ir achicando la gota tocando el sustrato donde está para obtener una gota del tamaño deseado. De modo que la gota final sea lo suficientemente grande para poder pegar el grano de arena, pero lo suficientemente pequeña para que no interfiera en las mediciones de fuerza.



Figura 3: Epoxi utilizado en la fabricación de la sonda coloidal.

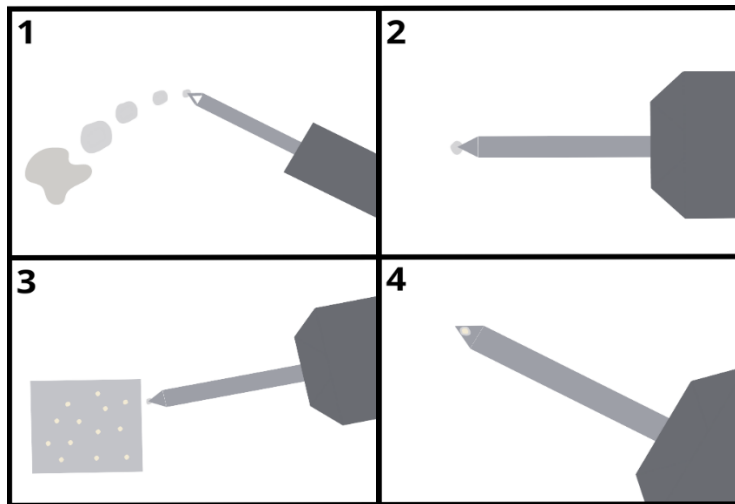


Figura 4: Esquema de proceso de fabricación de sonda coloidal: 1) Proceso para achicar la gota de epoxi, con objeto puntiagudo pequeño, 2) Colocación de gota de epoxi en cantilever que se utilizará para la sonda, 3) Tocar grano de arena previamente seleccionado con la gota de epoxi para crear la sonda, 4) Obtención de sonda coloidal.

Una vez obtenida esta pequeña gota de epoxi la tocamos con el *cantilever* sujeto con el micromanipulador y colocamos la muestra con las partículas de *soiling*. Luego, utilizando la sección que quedó con epoxi, tocamos la partícula deseada y logramos colocar la partícula en el lugar correcto en el *cantilever*, corroborando la posición con el microscopio óptico para arreglar cualquier posible error antes de que se seque por completo el pegamento.

Para confirmar la posición y verificar si la forma del grano colocado es lo suficientemente esférica para realizar las mediciones realizamos microscopía electrónica de barrido (SEM). En la Figura 5 podemos observar la primera muestra fabricada, a la que le llamamos Cantilever 00.

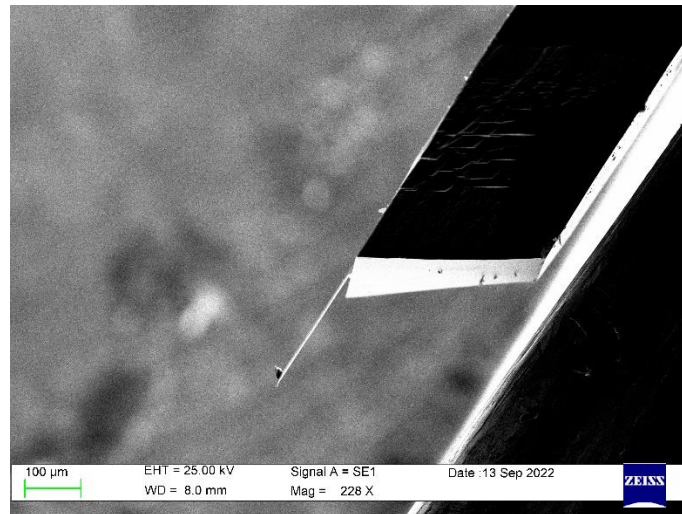


Figura 5: Primera sonda coloidal creada, muestra Cantilever 00

La sonda coloidal lista la llevamos al AFM y preparamos la muestra de vidrio para medir la fuerza de adhesión entre el grano de arena y el vidrio que simulará la capa protectora del panel solar. Por errores en el procedimiento de preparación en el AFM la muestra Cantilever 00 se rompió por lo que debemos volver al paso anterior y crear nuevamente sondas coloidales.

Repitiendo el procedimiento descrito anteriormente con ayuda del epoxi fuimos capaces de fabricar 3 sondas coloidales con granos de arena de una misma muestra de polvo. Estas muestras las catalogamos como Cantilever 01, Cantilever 02 y Cantilever 03 en el orden que fueron creadas. Sus imágenes SEM se muestran en la Figura 6.

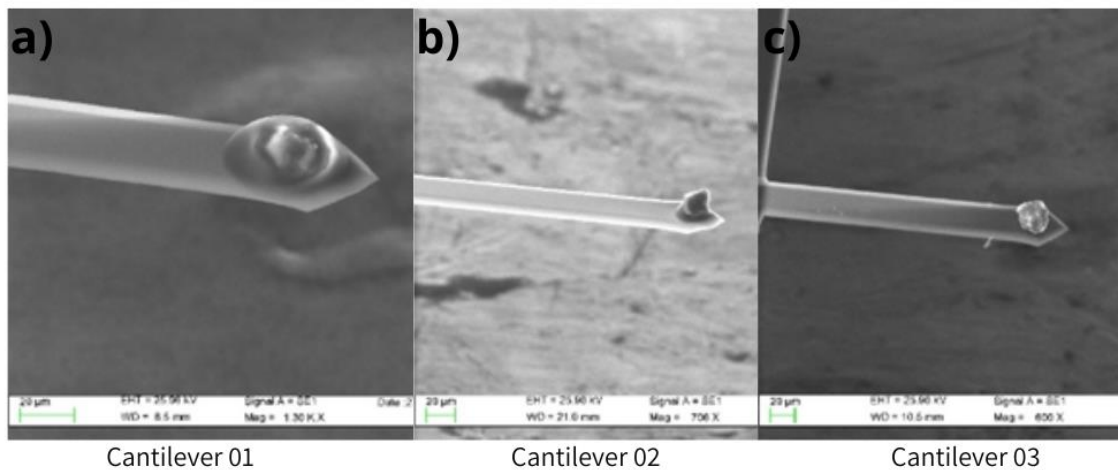


Figura 6: Imágenes SEM de las 3 muestras fabricadas con epoxi: a) Cantilever 01, b) Cantilever 02, c) Cantilever 03.

Como podemos observar en las imágenes, la muestra Cantilever 01 no es adecuada para el experimento, pues se puede observar una capa de epoxi cubriendo por completo la partícula, lo que no nos permitiría medir la fuerza de adhesión entre la partícula y la superficie, más bien mediríamos la interacción entre el epoxi y la superficie.

Por otro lado, las muestras Cantilever 02 y Cantilever 03 pueden ser utilizadas para realizar las mediciones, pues se puede observar claramente el grano de arena colocado en el centro del *cantilever* sin estar cubierto por el epoxi. Sin embargo, utilizaremos el Cantilever 03 debido a su forma, pues se puede observar que tiene un tamaño más cercano a los 20µm de diámetro que buscábamos en comparación con el otro grano de arena. Además, se puede observar que tiene menos epoxi en la base de la partícula, lo que nos ayudaría a tener una medición más confiable al haber menos probabilidades de que el epoxi afecte en la fuerza de adhesión.

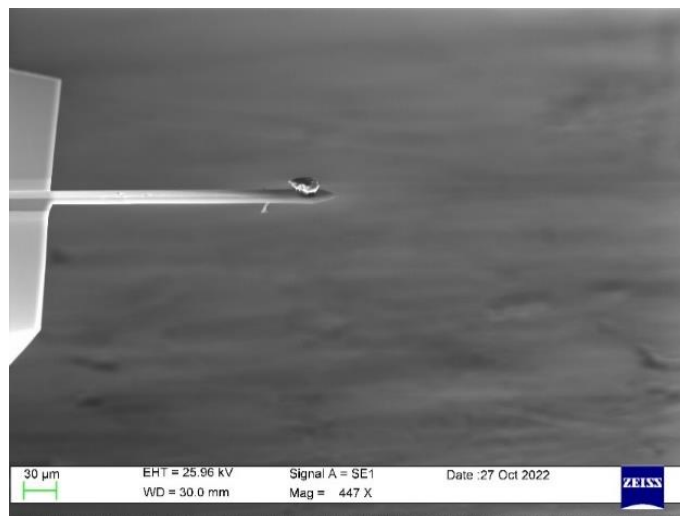


Figura 7: Imagen SEM de muestra Cantilever 03 utilizado para realizar las mediciones en silicio, vidrio FOB y vidrio limpio.

Finalmente, preparamos 3 superficies con las que realizamos mediciones de fuerza con el AFM. La primera muestra es una oblea de silicio, la segunda un portaobjetos de vidrio recién salido de la caja (vidrio “fresh out of the box” FOB por su sigla en inglés) y luego reutilizamos el mismo vidrio, pero una vez que este ha sido cuidadosamente limpiado con un paño mojado con isopropanol.

Resultados

Con el Cantilever 03 logramos realizar mediciones utilizando el modo fuerza del AFM en 400 puntos de cada muestra y obtuvimos los gráficos de fuerza vs frecuencia (Figuras 8, 9 y 10) que nos indican la cantidad de puntos obtenidos con el respectivo valor de la fuerza medida en la superficie.

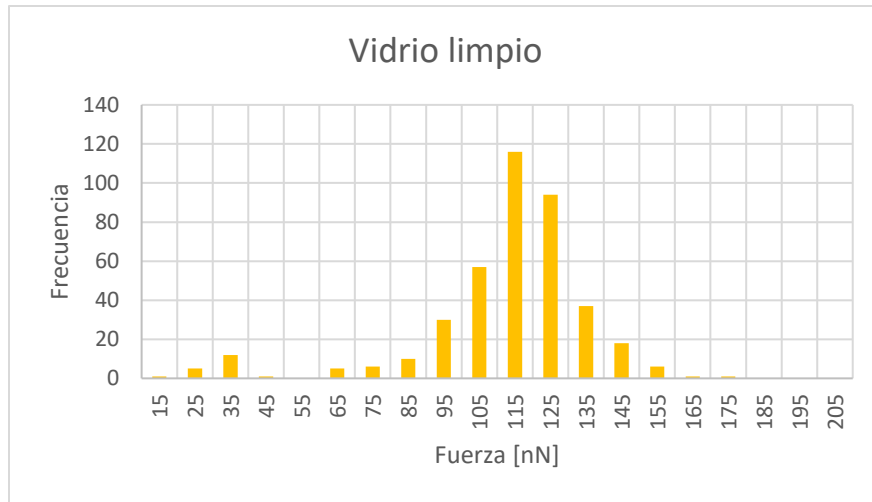


Figura 8: Gráfico de fuerza medida vs frecuencia para la superficie de vidrio limpio

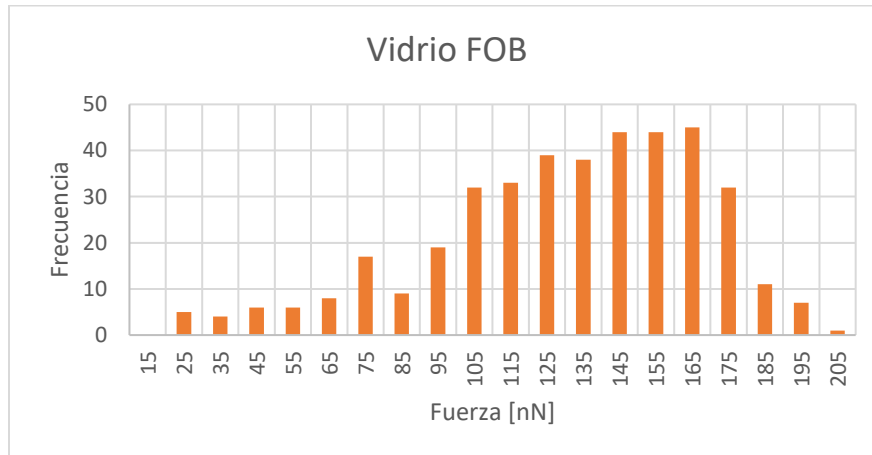


Figura 9: Gráfico de fuerza medida vs frecuencia para la superficie de vidrio FOB

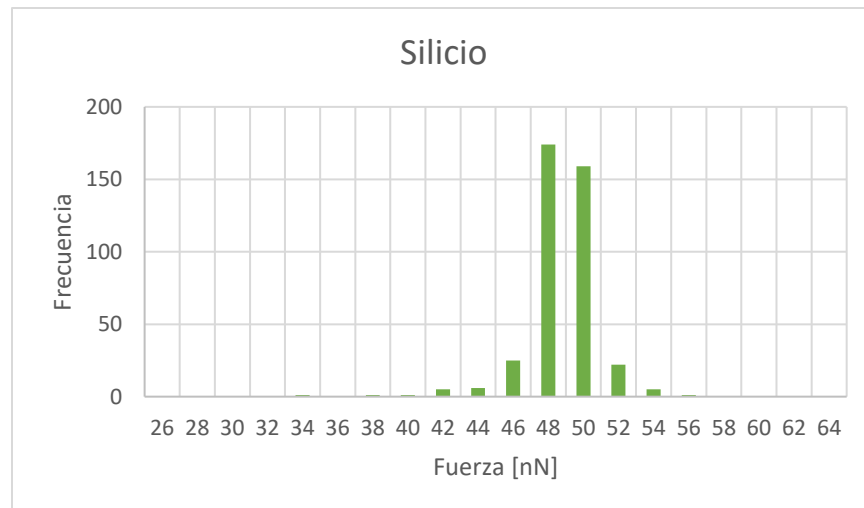


Figura 10: Gráfico de fuerza medida vs frecuencia para la superficie de silicio

En el caso de la interacción entre el grano y el silicio tenemos 11 valores de fuerzas para todos los puntos medidos, 4 de ellos poseen una frecuencia de 1 por lo que no es apreciable en la Figura 10, con la mayor frecuencia en el valor de 48 nN. La fuerza de adhesión medida en esta superficie no varía mucho y se puede considerar bastante uniforme en toda la muestra. Por otro lado, para el vidrio limpio encontramos 16 valores de fuerza de adhesión medidas, pero la mayoría de las mediciones se concentran en 2 de estos valores (115 y 125 nN). Sin embargo, para el caso del vidrio FOB tenemos 19 valores de fuerza, lo que muestra una gran dispersión en los valores de fuerza de adhesión en comparación al vidrio limpio. En este caso las mayores frecuencias están en todo el rango entre 100 y 175 nN.

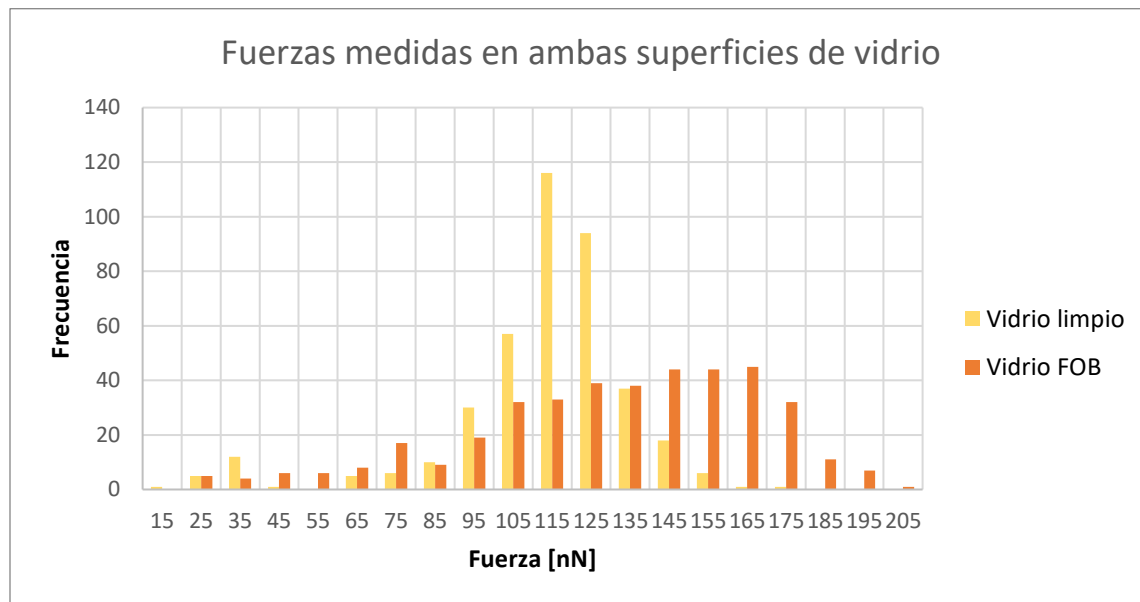


Figura 11: Gráfico de fuerza medida vs frecuencia de ambas superficies de vidrio

De los gráficos obtenidos para las tres superficies con la misma sonda podemos notar que no sólo la magnitud de la fuerza varía con cada superficie, si no que la distribución de la fuerza de adhesión también lo hace. En cuanto al valor obtenido para las fuerzas medidas podemos calcular la fuerza media en cada muestra. Para el caso de la oblea de silicio un valor de $48,8 \pm 2,1$ nN, para el vidrio FOB un valor de $130,6 \pm 37,1$ nN y para el vidrio limpio $112,6 \pm 24,2$ nN (Figura 14).

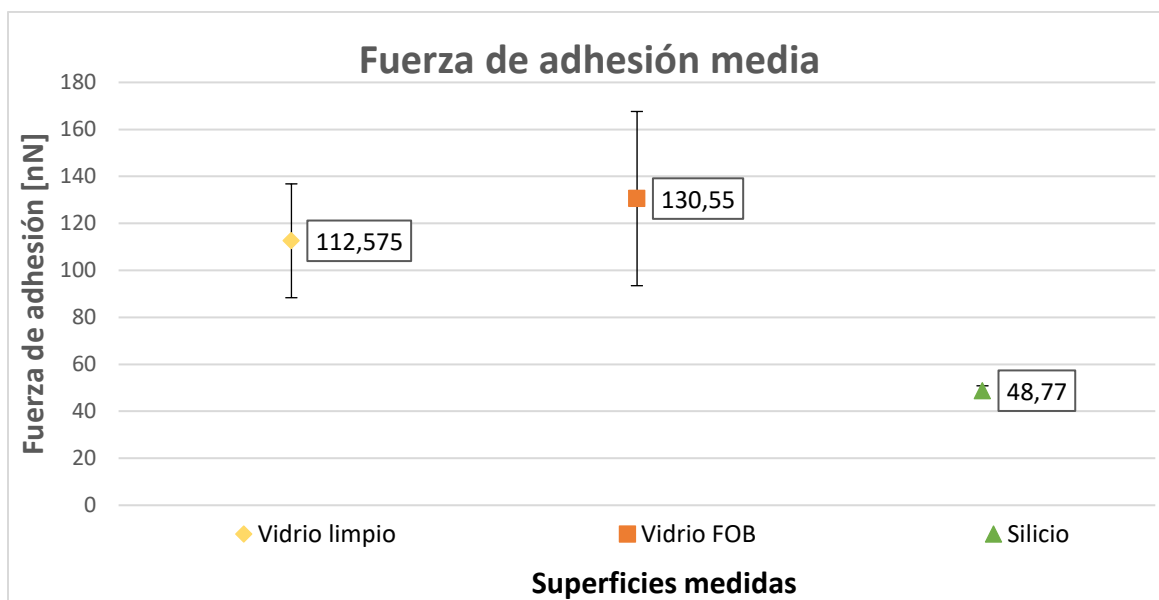


Figura 12: Fuerzas medias entre Cantilever 03 y cada superficie obtenida con AFM.

Esta diferencia entre el vidrio FOB y las otras muestras puede deberse al desecante que utilizan los proveedores de portaobjetos para mantenerlos secos y sin que se adhieran entre ellos en su embalaje. Esta sustancia sigue presente en el portaobjetos cuando lo retiramos de la caja si no lo limpiamos, por lo que habrá pequeñas partículas en todo el vidrio que interferirán con las mediciones con el AFM generando grandes fluctuaciones en las magnitudes de las fuerzas medidas en esta muestra. Esto se refleja además en la gran diferencia en el valor y la dispersión de las fuerzas medidas entre el portaobjetos FOB y el portaobjetos limpio. Con el desecante, la fuerza de adhesión medida es mayor en comparación a la del vidrio limpio, sin embargo, debido al tamaño de las barras de error no se puede apreciar la magnitud de la diferencia. Además, cabe destacar que la fuerza de adhesión del vidrio es bastante uniforme cuando éste está limpio. Con eso notamos que es posible obtener una aproximación acertada de la fuerza de adhesión a lo largo de la muestra completa para el vidrio limpio considerando la alta concentración en ciertos valores de la fuerza de adhesión medida.

Los valores obtenidos en estas mediciones nos indican que existe una relación entre lo que compone la superficie y el valor de la fuerza de adhesión, pues tomando en cuenta la oblea de silicio y el portaobjetos de vidrio limpio, ambas muestras consistían en superficies relativamente parejas y limpias, sin embargo, existe una clara diferencia en sus fuerzas de adhesión medidas a pesar de que el vidrio está compuesto en parte por silicio.

Finalmente, luego de obtener estas mediciones le realizamos un EDS al Cantilever 03 para conocer los elementos que componen la partícula y poder comparar los resultados obtenidos con otras investigaciones.

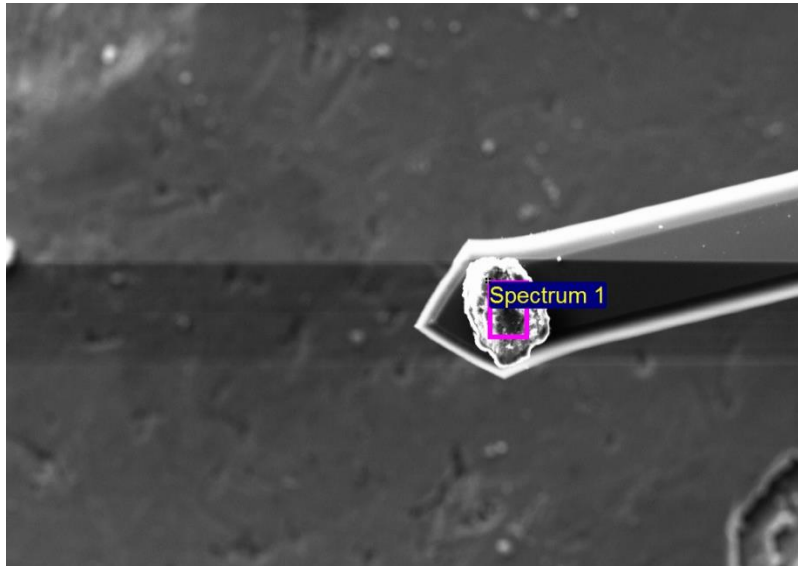


Figura 13: Imagen SEM de la muestra Cantilever 03 luego de haber realizado las mediciones en las 3 superficies. Se realizó un estudio EDS de esta muestra cuyos resultados se muestran en la figura 9.

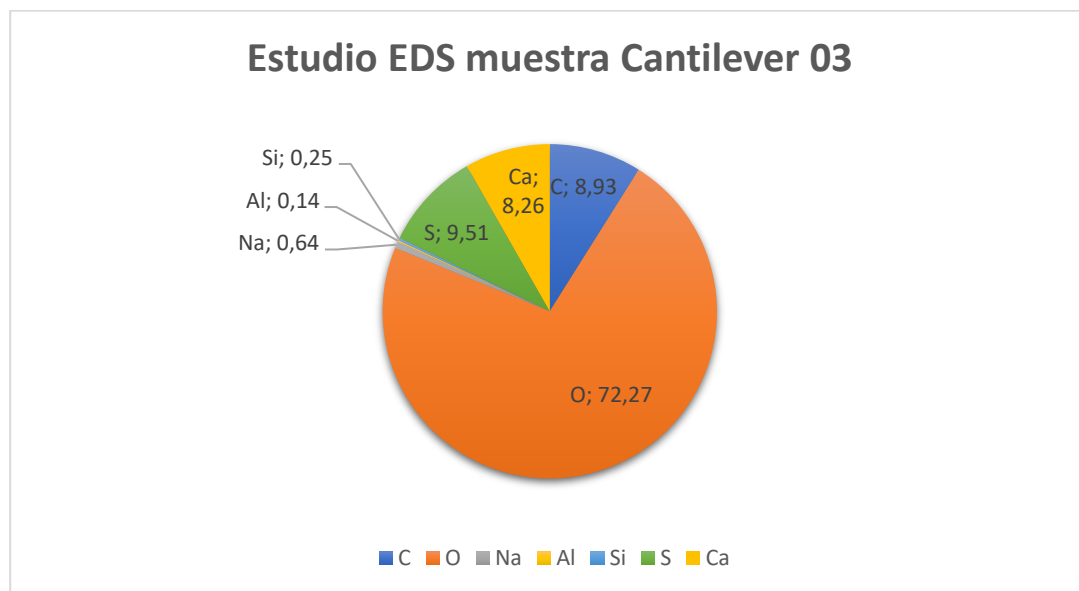


Figura 14: Gráfico de EDS de la muestra Cantilever 03.

En la Figura 13 se puede observar la partícula sobre el *cantilever* y en la Figura 14 los elementos detectados. Basados en el estudio de Olivares, *et al* [1] creemos que es un grano de *gypsum*.

Ahora para comparar los resultados obtenidos con el estado del arte debemos seleccionar entre las 8 partículas control del estudio de Varga [5] aquella que sea la más parecida a nuestra partícula de *soiling*. Basándonos en la investigación de Olivares. Et al.[1] notamos que el *soiling* del Desierto de Atacama está compuesto principalmente por un componente soluble en agua, *gypsum* (yeso) y una parte insoluble compuesta principalmente por diferentes sales. Al utilizar la parte soluble del *soiling* del desierto, la partícula que utilizamos

corresponde a yeso. Esta información fue corroborada buscando los componentes del yeso y verificando con el estudio EDS realizado sobre la muestra.

Luego, la comparamos con la Tabla 1 y notamos que en el estudio realizado por Varga [5] poseen una medición con una partícula de *gypsum* que corresponde con nuestra partícula de yeso. Con esto podemos comparar los resultados obtenidos de manera directa. Comparando los valores obtenidos por Varga [5] con los obtenidos en nuestro experimento en el caso del vidrio limpio ($118 \pm 2,6$ nN y $112,6 \pm 24,2$ nN respectivamente) podemos ver que obtuvimos valores muy cercanos con una diferencia que cae dentro del error de nuestra medición. Por lo tanto, podemos considerar los resultados que obtuvimos como válidos y correctos.

Conclusiones preliminares

Logramos hacer la sonda con una metodología confiable y replicable. Se destaca que la sonda sirvió para el objetivo que se buscaba, que era medir la fuerza de adhesión entre partículas de *soiling* del Desierto de Atacama y la superficie de los paneles solares, que en nuestro caso corresponde a un portaobjetos de vidrio. Además, este trabajo es un precedente para la creación de sondas coloidales en la USM, abriendo las puertas para la fabricación de sondas con otro tipo de partículas generando mayor investigación en el área.

Como se mencionó anteriormente, la obtención de la fuerza de adhesión fue un éxito considerando que se logró en 3 superficies distintas utilizando microscopía de fuerza atómica. La mayor fuerza de adhesión obtenida corresponde a $130,6 \pm 37,1$ nN sobre el vidrio FOB, y la menor fuerza obtenida es de $48,8 \pm 2,1$ nN sobre la oblea de silicio. Además, podemos decir que fue un éxito porque al contrastar el resultado con experimentos hechos anteriormente, los valores de fuerza obtenidos para el caso del vidrio limpio, y de la partícula de *gypsum* en la investigación anterior, concuerdan en su valor con una diferencia de 6 nN en la magnitud.

En conjunto con las conclusiones anteriores, y añadiendo el análisis de las fuerzas obtenidas en las 3 superficies, podemos concluir que el colocar una capa protectora, hidrofóbica o anti-*soiling* sobre la superficie protectora de un panel solar, generará un cambio en el comportamiento del panel con el *soiling* que deberá ser estudiado para cada caso. Cada tipo de capa protectora en contacto con las partículas de polvo generará distintos tipos de fuerzas e interacciones entre la partícula y la superficie que llevarán a variaciones en el ensuciamiento de los módulos fotovoltaicos. Además, la diferencia entre los valores de fuerza puede deberse a la distinta composición de las superficies que entran en contacto con la partícula de *soiling*.

Proyecciones

Antes de realizar experimentos con otras partículas de distinta composición u otras superficies debemos corroborar los resultados obtenidos con las mismas superficies y partículas provenientes del mismo *soiling* para descartar una posible alteración en las

mediciones de fuerza producto de una deformación de la partícula sujeta al *cantilever* al haber tenido contacto con la superficie.

Utilizando la metodología implementada en esta investigación podemos estudiar las interacciones entre partículas de *soiling* del Desierto de Atacama y muestras tanto hidrofílicas como hidrofóbicas para analizar las posibles diferencias producto de las diferentes superficies de los vidrios.

Se podría estudiar el cambio de la fuerza de adhesión para el *soiling* del desierto, cuando se utiliza un recubrimiento especial sobre el vidrio del módulo que modifica dicha superficie.

Referencias

- [1] D. Olivares *et al.*, “Microstructural analysis of the PV module cementation process at the Solar Platform of the Atacama Desert,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 227, no. March 2020, p. 111109, 2021, doi: 10.1016/j.solmat.2021.111109.
- [2] IREA, *Renewable Power Generation Costs in 2020*. 2020. [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jan/IRENA_2017_Power_Costs_2018.pdf
- [3] K. K. Ilse, B. W. Figgis, V. Naumann, C. Hagendorf, and J. Bagdahn, “Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 98, no. January, pp. 239–254, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.09.015.
- [4] H. F. Varga and M. R. Wiesner, “Effect of Dust Composition on the Reversibility of Photovoltaic Panel Soiling,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 55, no. 3, pp. 1984–1991, 2021, doi: 10.1021/acs.est.0c06196.
- [5] H. F. Varga and M. R. Wiesner, “Relationship between Atomic Force Microscopy and Centrifugation Measurements for Dust Fractions Implicated in Solar Panel Soiling,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 56, no. 13, pp. 9604–9612, 2022, doi: 10.1021/acs.est.2c00164.
- [6] M. Indrieri, A. Podestà, G. Bongiorno, D. Marchesi, and P. Milani, “Adhesive-free colloidal probes for nanoscale force measurements: Production and characterization,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 82, no. 2, 2011, doi: 10.1063/1.3553499.
- [7] H. J. Butt, B. Cappella, and M. Kappl, “Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications,” *Surf. Sci. Rep.*, vol. 59, no. 1–6, pp. 1–152, 2005, doi: 10.1016/j.surfrep.2005.08.003.
- [8] M. Zakerin, “The effect of elastic modulus and equilibrium vapor adsorption on capillary forces Dissertation,” 2013.