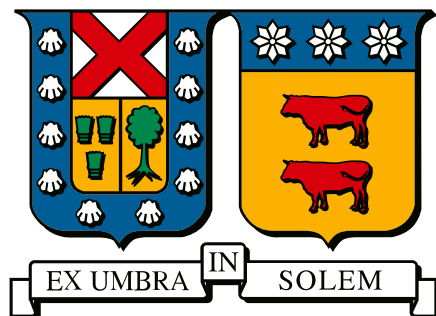


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
VALPARAÍSO – CHILE



**“ESTUDIO DE ADHESIÓN DE GRANOS DE
ARENA SOBRE VIDRIO NANOESTRUCTURADO
A TRAVÉS DE MICROSCOPIA DE FUERZA
ÁTOMICA”**

JUAN FRANCISCO CHIAPPE BARRIENTOS

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS MENCIÓN
FÍSICA.**

**PROFESORA GUÍA:
PROFESOR CO-GUÍA:
COMITÉ DE TESIS:**

**Dra. Valeria del Campo
Dr. Patricio Häberle
Dr. Aitor Marzo
Dr. Tomás Corrales**

Junio – 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Estudio de adhesión de granos de arena sobre vidrio nanoestructurado a través de microscopía de fuerza atómica

Nombre del candidato(a): Juan Francisco Chiappe Barrientos

Carrera / Grado: Magíster en ciencias mención física

Campus: Casa Central Valparaíso ; **Departamento:** Física

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Valeria del Campo, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 04/07/2025 ; Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 02/07/2025 ; Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

El autor de este trabajo agradece el apoyo financiero de los siguientes proyectos:

ANID-Fondecyt 1210490 y ANID-Fondecyt 1251918; ANID-ECOS210038-C21E08; ANID-FONDAP-1523A0006.

ANID - Millennium Science Initiative Program - NNBP # NCN2021_021.

También quisiera agradecer a la Dra. Valeria Del Campo, por brindarme la oportunidad de formar parte de este grupo de trabajo y por su apoyo constante durante todo el proceso de investigación.

Asimismo, agradezco a Benjamín Schleyer, quien me enseñó lo necesario para realizar las mediciones mediante el microscopio de fuerza atómica. Tanto como a Martín Ampuero por fabricar los vidrios usados en esta tesis.

Quiero extender mi agradecimiento a todos los profesores e integrantes del laboratorio, por su colaboración, ayuda y enseñanzas, las cuales han sido fundamentales para la realización de este trabajo.

Finalmente, quisiera agradecer a mis amigos y familiares, especialmente a mis padres, por su incondicional apoyo y compañía durante todo este proceso académico y personal.

Resumen

Los vidrios nanoestructurados han demostrado ser altamente efectivos para aplicaciones en sistemas ópticos y optoelectrónicos, ya que permiten optimizar la transmitancia óptica y conferir propiedades autolimpiantes, especialmente útiles en contextos como la generación de energía solar [1,2]. Este trabajo se centró en el estudio de la adhesión de partículas de arena sobre vidrios con distintas morfologías superficiales, utilizando espectroscopía de fuerza mediante Microscopía de Fuerza Atómica (AFM). Para esto se emplearon sondas coloidales fabricadas en el laboratorio, utilizando granos de arena reales recolectados en la Plataforma Solar del Desierto de Atacama (PSDA), los cuales fueron previamente separados en fracciones solubles e insolubles.

Las sondas fueron caracterizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de rayos X (EDX), confirmando la composición mineralógica reportada en estudios previos [3]. Posteriormente, se realizaron mediciones de fuerza de adhesión, usando la técnica de sonda coloidal, sobre tres tipos de superficie: vidrio liso, vidrio tratado químicamente con KOH y vidrio nanoestructurado, todos fabricados usando la técnica propuesta por Bravo *et al.* [4].

Los resultados muestran una disminución significativa de la fuerza de adhesión para partículas solubles sobre superficies nanoestructuradas en comparación con vidrio liso, lo cual se atribuye a la reducción del área efectiva de contacto provocada por la rugosidad. En cambio, al emplear partículas solubles e insolubles, se observó un aumento de la fuerza de adhesión sobre vidrio tratado con KOH, a pesar de su mayor rugosidad, lo cual sugiere una intensificación de fuerzas capilares asociadas al tratamiento químico.

Este estudio demuestra que la técnica de sonda coloidal con partículas reales permite caracterizar de manera precisa la interacción entre contaminantes y superficies funcionalizadas. Asimismo, valida el método de nanoestructuración propuesto como una estrategia viable para mitigar el fenómeno de soiling.

Abstract

Nanostructured glass has proven to be highly effective for applications in optical and optoelectronic systems, as it enables for the optimization of optical transmittance and imparts self-cleaning properties, which are particularly useful in contexts such as solar energy generation [1,2]. This study focused on investigating the adhesion of sand particles on glass surfaces with different morphologies, using force spectroscopy via Atomic Force Microscopy (AFM). Colloidal probes were fabricated in the laboratory using real sand grains collected from the Atacama Desert Solar Platform (PSDA), which were previously separated into soluble and insoluble fractions.

The probes were characterized using Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX), confirming the mineralogical composition reported in previous studies [3]. Adhesion force measurements were then conducted, using the colloidal probe technique, on three types of surfaces: flat glass, glass chemically treated with KOH, and nanostructured glass, all fabricated using the method proposed by Bravo *et al.* [4]

The results show a significant decrease in adhesion force for soluble particles on nanostructured surfaces compared to flat glass, which is attributed to the reduced effective contact area caused by surface roughness. In contrast, when using both soluble and insoluble particles, an increase in adhesion force was observed on KOH-treated glass, despite its higher roughness, suggesting an enhancement of capillary forces associated with the chemical treatment.

This study demonstrates that the colloidal probe technique using real particles enables accurate characterization of the interaction between contaminants and functionalized surfaces. It also validates the proposed nanostructuring method as a viable strategy to mitigate the soiling phenomenon.

Glosario

Adhesión: Fuerza que mantiene unida una partícula a una superficie debido a interacciones físicas o químicas.

AFM (Microscopía de Fuerza Atómica): Técnica que permite medir fuerzas a escala nanométrica entre una sonda y una superficie.

Ángulo de contacto (AC): Ángulo formado entre la superficie de un líquido y el sólido sobre el que reposa; indica el grado de humectación.

Aspereza / Rugosidad: Irregularidades en la superficie de un material que afectan sus propiedades de adhesión.

Bootstrapping: Método estadístico de remuestreo utilizado para estimar la incertidumbre o variabilidad de una medida, como la moda o la media.

Cantiléver: Brazo flexible del AFM sobre el que se coloca la sonda y cuya deflexión se mide para calcular fuerzas.

Capilaridad: Fenómeno físico donde un líquido sube o baja en un tubo delgado o entre superficies debido a la tensión superficial.

Cementación: Proceso en que partículas solubles se disuelven y precipitan formando un “puente” adhesivo entre partículas y superficie.

Curva de fuerza: Gráfico que representa la interacción fuerza-distancia entre la sonda y la muestra en AFM.

Desprendimiento: Momento en que una partícula deja de estar adherida a la superficie, superando la fuerza de adhesión.

Dewetting térmico: Proceso mediante el cual una película delgada se rompe por efectos térmicos, formando nanopartículas.

DVD (Disco Versátil Digital): Soporte digital usado en esta tesis como molde para transferir patrones de nanoestructuras sobre vidrio.

EDX (Espectroscopía de Rayos X por Energía Dispersiva): Técnica analítica usada para determinar la composición elemental de materiales.

Efecto loto: Propiedad de algunas superficies superhidrofóbicas que permite la autolimpieza por rodado de gotas de agua.

Efecto autolimpiante: Capacidad de una superficie de remover contaminantes sin intervención mecánica, usualmente mediante agua.

Fuerza capilar: Componente de la adhesión producida por el menisco de un líquido entre dos superficies.

Fuerza de Van der Waals: Fuerza de atracción débil entre moléculas o partículas, relevante en la adhesión en seco.

Fuerza de adhesión: Fuerza total necesaria para separar una partícula adherida a una superficie.

Grabado químico: Técnica para modificar una superficie mediante la aplicación de un reactivo que elimina material.

Hidrofílico / Hidrofóbico: Describe la afinidad o rechazo de un material con el agua, lo que influye en la adhesión y autolimpieza.

IQR (Rango Inter cuartil): Medida estadística que representa la dispersión central de un conjunto de datos, constituye el rango desde el primer cuartil hasta el tercer cuartil.

Menisco: Curvatura del líquido en contacto con un sólido, responsable de la fuerza capilar.

Micromanipulador: Dispositivo de precisión utilizado para posicionar objetos microscópicos, como partículas en sondas coloidales.

Nanoestructuración: Modificación controlada de la superficie de un material a escala nanométrica para alterar sus propiedades físicas.

PDMS (Polidimetilsiloxano): Polímero flexible y transparente usado como molde en técnicas de litografía suave.

PSDA (Plataforma Solar del Desierto de Atacama): Instalación experimental ubicada en el norte de Chile usada para estudiar tecnologías solares.

RMS (Root Mean Square): Medida de la rugosidad de una superficie; raíz cuadrada del promedio de las alturas al cuadrado.

Snap-in / Salto: Evento en AFM donde la sonda se atrae bruscamente hacia la superficie debido a fuerzas de adhesión.

Sonda coloidal: Técnica en AFM donde se adhiere una esfera (o partícula) al cantiléver para estudiar interacciones más realistas.

Soiling: Acumulación de polvo y contaminantes sobre superficies, especialmente en paneles solares, que reduce su eficiencia.

Índice

1. Estado del Arte	10
1.1 Soiling.....	10
1.1.1 Acumulación de soiling.....	12
1.1.2 Humedad.....	13
1.1.3 Métodos de mitigación de Soiling.....	15
1.1.4 Plataforma Solar Desierto de Atacama (PSDA).....	17
1.2 Efecto Autolimpiante.....	18
1.2.1 Humectación de superficies.....	18
1.2.2 Modificación de superficies.....	19
1.3 Fuerza de adhesión	20
1.3.2 Curvas de Fuerza	21
1.3.3 Modelos de adhesión en superficies rugosas	23
1.3.4 Aplicación de la técnica de sonda coloidal al estudio del soiling	25
2. Objetivos.....	28
2.1 Objetivo general	28
2.2 Obejtivos especificos.....	28
3. Metodología.....	29
3.1 Modificación de superficie	29
3.2 Fabricación de sonda coloidal	29
3.3 Técnica de sonda coloidal.....	30
4. Resultados.....	32
4.1 Caracterización de arena.....	32
4.2 Sondas.....	33
4.2.1 Sondas Insolubles	33
4.2.2 Sondas solubles.....	35
4.3 Vidrios	36
4.4 Fuerza de adhesión	37
4.4.1 Sonda Insoluble JCB05	37
4.4.2 Sonda soluble JCB06.....	40
4.4.3 JCB11(soluble)	41
4.5 Discusión	44

5. Conclusiones.....	46
6. Trabajo Futuro.....	47
7. Referencias	48

1. Estado del Arte

En este capítulo describiremos el estado del arte sobre ensuciamiento de módulos fotovoltaicos (*soiling*), efecto autolimpiante y fuerza de adhesión entre partícula y superficie. El *soiling* se refiere a la acumulación de tierra, polvo y otros contaminantes sobre paneles fotovoltaicos, causando efectos adversos que dificultan la generación solar [5]. El efecto loto, también conocido como efecto autolimpiante, se observa en superficies con propiedades morfológicas y químicas especiales que permiten que la suciedad sea arrastrada por el agua depositada en su superficie, recibe el nombre de efecto loto debido a la capacidad de auto limpieza de las hojas de loto [6,7]. La fuerza de adhesión corresponde a la fuerza de la interacción entre una partícula y la superficie sobre la que se deposita.

1.1 Soiling

El *soiling* corresponde a la tercera mayor preocupación para el éxito de la energía fotovoltaica, justo después de la irradiancia y la temperatura [8,9]. Como consecuencia del *soiling* la potencia y la eficiencia pueden verse reducidas incluso totalmente [10,11]. Ilse *et al.* [12] estima que de un 4% a un 7% de la producción global se pierde debido al *soiling*, en la literatura se reporta una pérdida diaria de 1% en la potencia y una pérdida de eficiencia mensual de un 80% [13,14]. Estas pérdidas ocurren especialmente en zonas desérticas [9,15,16]. En climas áridos y semi áridos la mayor proporción de *soiling* se debe a partículas en el rango de 2-63 μm , ya que las partículas sobre 63 μm son demasiado pesadas para ser levantadas lo suficiente y depositarse en los módulos [17]. En la Tabla 1 se muestran los tamaños de partículas depositados en distintos lugares del mundo, donde se observa que los tamaños dominantes se encuentran entre 10 y 30 μm [18].

Tabla 1 Rango dominante del tamaño de partículas acumulado en superficies exteriores, d_a =diámetro equivalente aerodinámico, d_{pa} =diámetro equivalente del área proyectada, d_e =diámetro de masa equivalente. Adaptado de Figgis et al [18].

Tamaño de partícula (μm)	Definición de diámetro	Descripción de parámetro	Superficie de Recolección	Ubicación	Referencia
10-30	d_a , convertido desde d_{pa}	Pico de masa de particulado grueso	Película horizontal de Mylar engrasada	USA (Chicago)	[19]
>10	d_a , convertido desde d_{pa}	Tamaño dominante en masa	Película horizontal de Mylar engrasada	USA (Chicago)	[20]
>2	d_a	99% de la masa depositada	Película horizontal de Mylar engrasada	USA (Chicago)	[21]
~32	d_{pa}	Pico de pérdida de transmisión	Colector Solar	Levante meridional	[22]
17	No indicado (se presume d_e)	Pico del promedio del diámetro	Colector de polvo tubular	México (Ciudad de México)	[23]
30	No indicado (se presume d_e)	Mediana del diámetro	Muestra de polvo preparada de loess eólico	Bélgica	[24]
8-16	No indicado (se presume d_{pa})	Tamaño dominante por cantidad	Plano inclinado	Kuwait	[25]
18	d_e	Tamaño promedio por volumen	Módulos PV con inclinación de 22°	Qatar (Doha)	[26]
20-30	d_{pa}	Tamaño dominante por cantidad	Superficie de módulos fotovoltaicos	Desierto de Atacama (PSDA)	[3]

1.1.1 Acumulación de soiling

La acumulación de *soiling* se puede describir principalmente por tres procesos: deposición de partículas, rebote y resuspensión (Figura 1) [17,18,27].

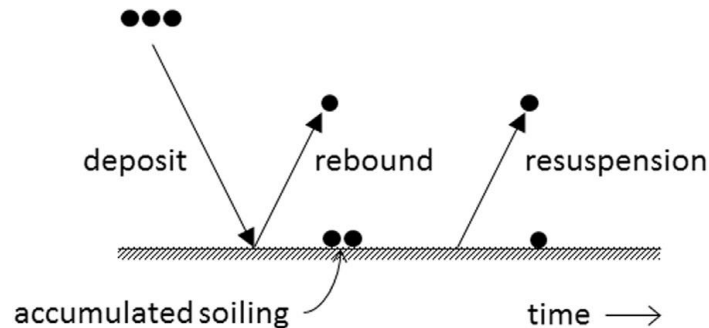


Figura 1 El soiling es el resultado neto de la deposición, el rebote y la resuspensión de partículas. Los mecanismos se pueden modelar y sumar para describir la acumulación de polvo a lo largo del tiempo [18].

1.1.1.1 Deposición de Partículas

Se refiere a deposición de partículas a cuando estas son aerotransportadas a una superficie, sin importar si se adhieren. La deposición puede ocurrir por sedimentación, deposición inercial y movimiento Browniano. Las partículas más pequeñas presentan deposición por movimiento Browniano [28,29]. Las partículas muy grandes (del orden de $\sim 100\mu\text{m}$) son depositadas mediante sedimentación ya que son gobernadas por las fuerzas gravitacionales y rápidamente se depositan en las superficies [21]. La deposición inercial es el mecanismo principal que rige la deposición de partículas medianas (alrededor de $10\mu\text{m}$) [21,30].

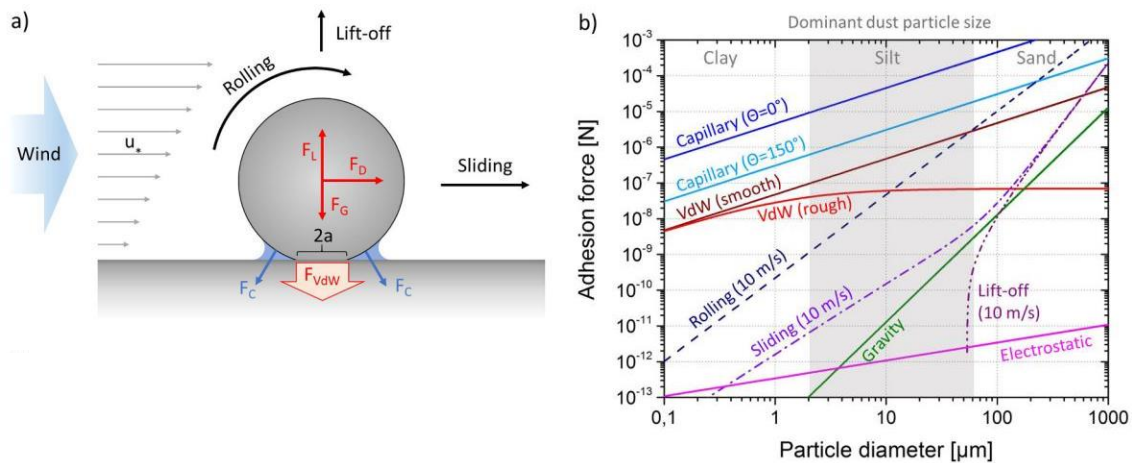


Figura 2 a) Ilustración esquemática y simulación de la adhesión y desprendimiento de partículas para una esfera de SiO_2 sobre vidrio solar. b) Las fuerzas de adhesión y las condiciones umbral para la eliminación de partículas son mostradas en dependencia del diámetro de la partícula: fuerza de van der Waals (VdW) para una superficie lisa y rugosa, fuerza capilar para superficies hidrófilas (0°) e hidrófobas (150°), fuerzas electrostáticas para partículas con carga media según el equilibrio de Boltzmann y máxima densidad de carga superficial, gravedad (FG) debido al peso de la esfera. Las líneas de puntos proporcionan valores umbral de la suma máxima de fuerzas de adhesión que se permite para el desprendimiento de partículas a una velocidad del viento dada de 10 m/s debido al rodamiento, deslizamiento o despegue[17].

1.1.1.2 Rebote

El rebote se refiere a partículas que rebotan inmediatamente después de depositarse. El rebote es favorecido si la energía cinética es mayor que el trabajo de adhesión, es decir la energía necesaria para sobrepasar las fuerzas atractivas y superficiales [29,31–33].

1.1.1.3 Resuspensión

La resuspensión corresponde al proceso en que partículas son desprendidas de la superficie a la que estuvieron adheridas por un tiempo. La resuspensión se puede explicar en términos de fuerza, cuando la fuerza aerodinámica logra superar a la fuerza de adhesión (Figura 2), o en términos de energía, cuando la partícula obtiene suficiente energía, en forma de vibración, para superar el trabajo de adhesión [29,34,35].

1.1.2 Humedad

La presencia de humedad puede promover la adhesión de partículas [17]. La formación de rocío sobre paneles solares ocurre incluso en zonas desérticas, atribuido al alto enfriamiento radiativo dada la alta emisividad infrarroja del vidrio solar, por la noche los vidrios pueden tener temperaturas por debajo del ambiente [36–40].

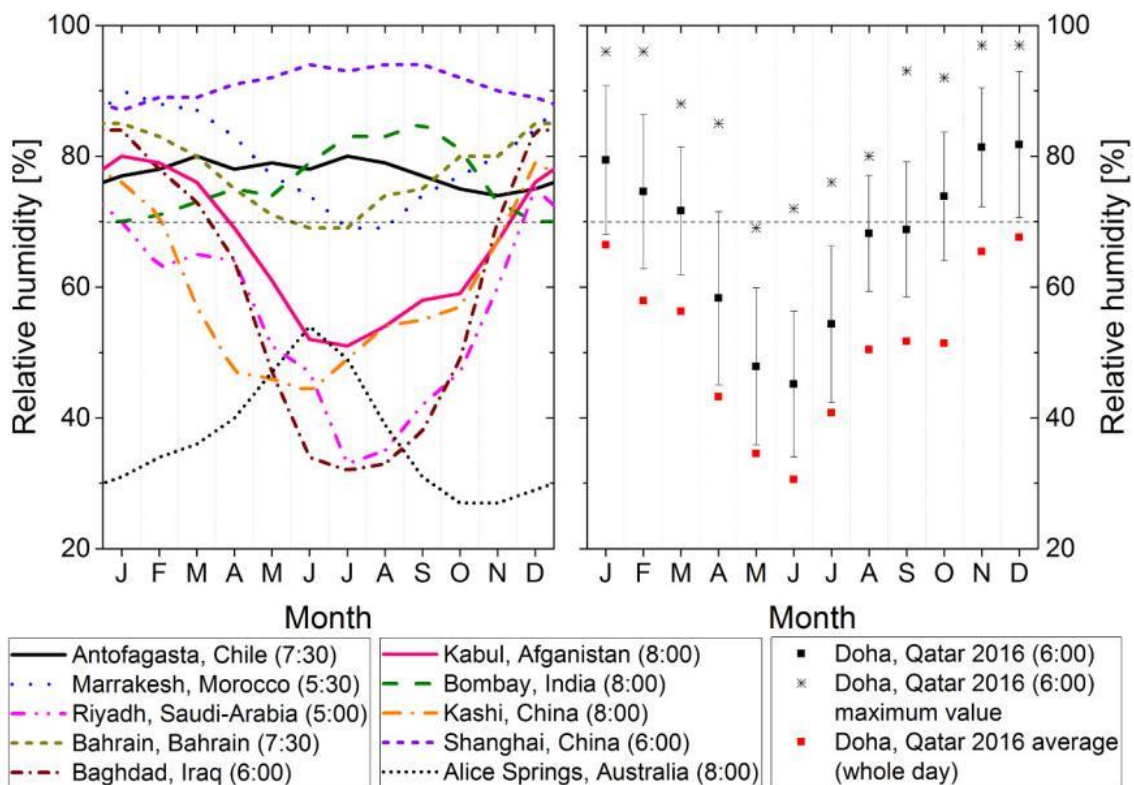


Figura 3 Niveles medios de humedad relativa en las horas de la mañana (4:30–8:00) para diferentes lugares del mundo (recopilados a partir de Hutchinson World Weather Guide [41]). Para Qatar 2016, los valores medios mensuales a las 6:00, los valores máximos mensuales a las 6:00 y los valores promedio totales mensuales se dedujeron de la estación meteorológica del Solar Test Field, Doha [17].

Cuando se presenta rocío en los módulos fotovoltaicos, el agua puede interactuar con las partículas de polvo hasta que este se evapora por el día. La interacción con el agua promueve distintos procesos como la cementación (*cementation*), el apelmazamiento de partículas

(*caking*) y el envejecimiento capilar (*capillary aging*), estos mecanismos son ilustrados en la Figura 4. Estos procesos aumentan permanentemente la fuerza de adhesión, por ejemplo, en Ilse *et al.* [40] se muestra que no existe remoción de partículas bajo fuerzas equivalentes a velocidades de viento de 100 m/s.

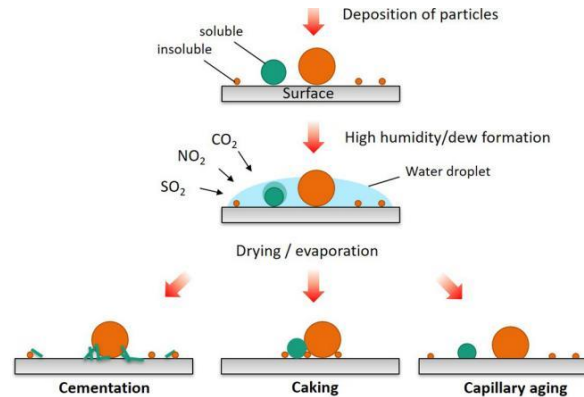


Figura 4 Modelo de mecanismos de suciedad que incrementan la adhesión de partículas: cementación, apelmazamiento y envejecimiento capilar [17].

1.1.2.1 Cementación

El proceso de cementación fue descrito por primera vez por Cuddihy [42]. En condiciones de humedad partes solubles del polvo depositado son parcial o completamente disueltos por el agua presente en la superficie. Durante el posterior proceso de secado las partículas disueltas precipitan, formando puentes entre las partes no disueltas y la superficie del vidrio, aumentando así la fuerza de adhesión [40,42–46]. Cuando el proceso de precipitación y evaporación se repite periódicamente sin ser limpiado, se acumulan varias capas de cementación. Estas capas son difíciles de limpiar manual o naturalmente y tienen el potencial de cambiar permanentemente las propiedades de la superficie del vidrio [43]. Este mecanismo de soiling corresponde al observado en la PSDA [3].

1.1.2.2 Apelmazamiento de partículas

El proceso de apelmazamiento de partículas aumenta la fuerza de adhesión mediante el reordenamiento de estas. Las partículas son suspendidas por el rocío, el agua reduce las fuerzas de Van der Waals, lo que permite que las partículas se levanten de la superficie. Al secarse el rocío las partículas más grandes se asientan primero, y las partículas más pequeñas, al tener mayor movilidad, logran rellenar los espacios que dejan las partículas más grandes y el vidrio, aumentando la superficie de contacto, y así la fuerza de adhesión.

Se ha demostrado que las superficies hidrofóbicas pueden disminuir el apelmazamiento y con ello las pérdidas de eficiencia en módulos fotovoltaicos [47–50]. Esto puede ser explicado por el hecho que, en superficies hidrófobas, las pequeñas gotas que se forman tienden a estar bien separadas entre sí, lo que confina las partículas a áreas reducidas y dispersas. Esto reduce el cubrimiento de las partículas y así las pérdidas de eficiencia. En cambio, en superficies hidrófilas, los bordes de las gotas tienden a quedar fijos, manteniendo amplias las zonas cubiertas por las partículas

1.1.2.3 Envejecimiento Capilar

Cuando se forman puentes líquidos entre las partículas y la superficie, las fuerzas capilares presionan a las partículas hacia la superficie, de esa forma los huecos en la zona de contacto se contraen o las partículas se deforman, resultando en una mayor área de contacto efectiva y así una mayor fuerza de adhesión [42,51,52].

1.1.3 Métodos de mitigación de Soiling

1.1.3.1 Métodos naturales

Lluvia, viento y gravedad sirven como métodos naturales para limpiar el soiling de módulos solares [53]. La lluvia puede limpiar efectivamente los paneles solares en especial en zonas con bajo soiling [53] y usualmente se considera el agente natural más prevalente [12]. Muchos estudios han encontrado umbrales de limpieza (es decir, la caída mínima de lluvia necesaria para lograr un efecto de limpieza) que van desde 1 mm/día a 10 mm/día, incluso en algunos casos pueden llegar hasta 20 mm/día [54,55].

1.1.3.2 Recubrimientos antisoiling

Los recubrimientos anti soiling son un enfoque eficaz para hacer que la superficie del módulo sea altamente hidrofóbica o muy hidrófila [56–58]. Sin embargo, se ha demostrado que este método tiene una vida útil corta y depende del sitio tanto en términos de efectividad como de durabilidad [59,60]. La reaplicación de recubrimientos puede reducir la transmitancia del vidrio fotovoltaico, y la adhesión del polvo depende en gran medida de las características electrostáticas del recubrimiento [61,62].

1.1.3.3 Pantallas electrodinámicas (Electrodynamic Screens)

El uso de EDSs (Electrodynamic Screens) integrados es un avance reciente para los módulos solares autolimpiantes. La técnica EDSs no requiere movimiento mecánico, agua ni mano de obra para su limpieza [63]. En un EDS, se genera un campo electrodinámico para repeler las partículas de la superficie fotovoltaica con un consumo mínimo de energía. Las limitaciones actuales del uso de los EDS consisten en su etapa temprana de desarrollo y las condiciones limitadas en las que pueden operar (es decir, humedad relativa menor a 50%). La durabilidad de esta técnica aún no se ha demostrado y requiere más investigación [64].

1.1.3.4 Tecnologías de limpieza basadas en robótica

La tecnología de limpieza basada en robótica puede automatizar tanto la limpieza como el fregado [15,65]. Los robots están comercialmente disponibles y en uso en las grandes instalaciones de plantas de energía solar en el Medio Oriente [12,66]. Los dispositivos robóticos consumen energía, lo que resulta en altos costos de operación y mantenimiento, que pueden no ser rentables en algunas aplicaciones [67].

1.1.3.5 Chorros de agua de alta presión

Un método comúnmente utilizado para limpiar los módulos solares fotovoltaicos son los chorros de agua a alta presión y los rociadores de agua controlados [68]. En estos procesos, la limpieza se realiza activando de forma automática o manual una bomba bien diseñada. El lavado con agua mejora el rendimiento del módulo de dos maneras: reduce la temperatura de funcionamiento de la célula y elimina la suciedad. Sin embargo, las sales orgánicas pueden

formar recubrimientos pegajosos en la superficie de los módulos fotovoltaicos si no se eliminan. Por lo tanto, el proceso de pulverización de agua no proporciona necesariamente una limpieza uniforme y requiere mano de obra capacitada para evitar arañazos al fregar con un cepillo. Además, la potencia necesaria para accionar las bombas de alta presión también es un factor determinante para la planta de energía fotovoltaica aplicada por estos procesos [69].

Tabla 2 Comparación de diferentes enfoques de mitigación de suciedad para los módulos fotovoltaicos, adaptado de [70,71].

Método de mitigación de soiling	Ventajas	Desventajas
Métodos Naturales	Sin costo	Dependencia de las condiciones geográficas y meteorológicas. Inadecuado para partículas pequeñas
Limpieza Manual	Bajo costo inicial. Cerca del 100% de eficiencia de eliminación	Alto costo laboral Inadecuado para zonas con escasez de agua Daños abrasivos en la superficie
Limpieza mecánica	Eficiencia de eliminación de un 95% (totalmente automatizado) Activación automática mediante controles electromecánicos Costo laboral bajo o no existente Reduce la temperatura de la superficie	Alto costo inicial Alto costo de operación y mantenimiento Daños abrasivos en la superficie
Recubrimientos anti-soiling	Enfoque pasivo de mitigación Sin necesidad de labor externa u otros recursos Ampliando los periodos de limpieza	Reduce la eficiencia de los módulos fotovoltaicos No elimina la necesidad de limpieza Depende de lluvia o rocío
Recubrimientos hidrofóbicos	Mejor efecto anti-soiling con nanoestructuras	Bajo tiempo de vida Durabilidad incierta bajo radiación UV
Recubrimientos hidrofílicos	Altamente durables Más efectivos que recubrimientos hidrofóbicos	Causa mayor acumulación de soiling cuando el recubrimiento se deteriora
EDS	Eficiencia de eliminación de 90% en condiciones ambientales secas Acción de limpieza rápida	Poco eficiente contra cementación y partículas húmedas Menos efectivo en ambientes con humedad relativa alta Fuente de alimentación de alto voltaje Costo inicial alto
Robots	No genera micro-rasguños en los paneles La velocidad de limpieza es mayor que 1m ² por minuto	El costo es muy alto No es adecuado para desiertos Peso del sistema en general

1.1.4 Plataforma Solar Desierto de Atacama (PSDA)

En Olivares *et al.* [3] se analizó el soiling presente en la Plataforma Solar Desierto de Atacama (PSDA), este corresponde a un laboratorio al aire libre dedicado a estudiar y probar diferentes tipos de tecnologías solares, ubicado en la región Antofagasta, Chile. Se tomaron muestras de *soiling* acumulado durante un año sobre módulos fotovoltaicos, recogiendo el polvo de todo el módulo, de arriba hacia abajo, con una brocha capaz de remover el polvo cementado, las muestras fueron guardadas en bolsas plásticas. Para estudiar los compuestos higroscópicos y solubles presentes en las muestras de polvo depositadas en los módulos fotovoltaicos, se realizó una separación de la parte insoluble siguiendo el método indicado por Figgis *et al.* [72].



Figura 5 a) Módulo fotovoltaico sucio tras 12 meses de exposición; b) Colocación de cupones de vidrio en la parte frontal superior de los módulos fotovoltaicos; y c) Los polvos blancos y marrones corresponden a las partes insolubles y solubles del polvo de los módulos fotovoltaicos [3].

Al analizar las muestras de polvo mediante difracción de rayos-X (XRD) se detectaron seis tipos de compuestos: a) albita (NaSi_3O_8), b) anhidrita ($\text{Ca}(\text{SO}_4)$), c) calcita (CaCO_3), d) yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), e) cuarzo (SiO_2) y f) ortoclasa ($\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$). Con una concentración, para la muestra original, de (a) albita (9.1%), (b) anhidrita (10.6%), (c) calcita (10.3%), (d) yeso (54.7%), (e) cuarzo (9.2%), y (f) ortoclasa (6.1%). La parte soluble presentó un 99% de yeso.

Los gráficos de la Figura 6 muestran que las partículas tienen mayormente un tamaño de entre 1 y 40 μm . Las partículas presentan en su mayoría un factor de forma (*Shape Factor*) mucho mayor a 1 por lo que corresponden a partículas poco circulares. Las partículas de arena que utilizaremos en esta tesis provienen de estas mismas muestras obtenidas de los módulos fotovoltaicos.

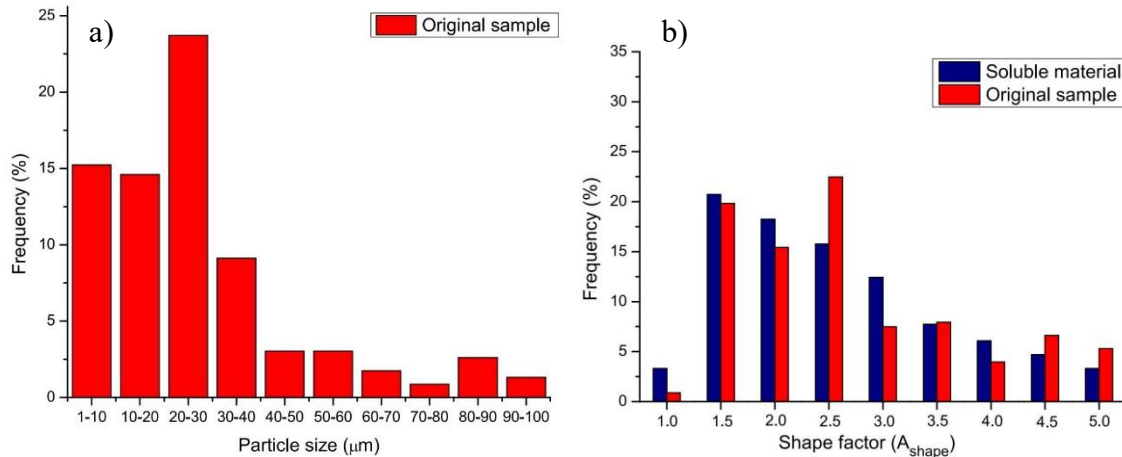


Figura 6 a) Tamaño de partículas de polvo depositadas sobre módulos fotovoltaicos b) Distribución del factor de forma de partículas de polvo depositado (barras rojas) y material salino soluble (barras azules)[3].

1.2 Efecto Autolimpiante

Como se mencionó en la sección anterior, uno de los métodos de limpieza de módulos fotovoltaicos corresponde a aprovechar el agua presente en la naturaleza, ya sea por lluvia o rocío. Esto puede ser potenciado mediante la aplicación de superficies autolimpiantes en donde el agua permita remover la suciedad sin mayor mecánica.

1.2.1 Humectación de superficies

La interacción en una interfaz liquido/sólido/gas puede describirse a través de la ecuación de Young [73].

$$\gamma_{sg} + \gamma_{sl} = \gamma_{lg} \cos(\theta)$$

donde θ corresponde al ángulo de contacto (AC) y γ_{sg} , γ_{sl} y γ_{lg} a la tensión superficial en las interfaces sólido/gas, sólido/líquido y líquido/gas, respectivamente. Si la suma de las tensiones superficiales de las interfaces sólido/líquido y líquido/gas es igual a la tensión en el interfaz sólido/gas, el ángulo de contacto tiende a cero y la gota del líquido se extenderá sobre la superficie para formar una película delgada. Este comportamiento es característico de una superficie de alta energía superficial. En contraste, si la superficie tiene baja energía superficial, el ángulo de contacto se incrementa, teóricamente hasta alcanzar los 180° , lo que indica que la gota apenas se adhiere a la superficie, permaneciendo esférica y resbalando con facilidad.

El límite en que el AC es 0 puede ser alcanzado tras la modificación química de la superficie. Sin embargo, alcanzar el límite donde el AC es 180° es necesario modificar la rugosidad de la superficie [74–79]. La ecuación de Wenzel [80] explica que en presencia de rugosidades el ángulo de contacto disminuye para superficies de hidrofílicas (alta energía superficial) y aumenta para superficies hidrofóbicas (baja energía superficial). En el caso de superficies muy hidrofóbicas con micro o nanoestructuras, se puede asumir que se generarán paquetes de aire en la rugosidad siendo el AC descrito por la ecuación de Cassie-Baxter [81].

Sin embargo, Herminghaus [82] propone un mecanismo en donde el AC efectivo puede aumentar en superficies con cualquier AC al presentarse superficies jerárquicamente rugosas

y considerar el mojado fuera del equilibrio termodinámico, lo que explicaría el comportamiento de mojabilidad de ciertas plantas (Figura 7).

Las superficies superhidrofóbicas (SHS), con un ángulo de contacto con el agua superior a 150° y un ángulo de deslizamiento (SA) inferior a 10° , son capaces de lograr la autolimpieza mediante el llamado efecto loto [83,84]. Para que suceda el efecto autolimpiante se deben cumplir dos condiciones: la recogida de partículas de polvo por gotas, y el rodaje de las gotas de las superficies con pequeñas inclinaciones. La recogida de partículas de polvo se debe a la unión de las partículas a la interfaz agua-aire, la fuerza de adhesión entre la superficie sólida y las partículas, la gravedad y flotabilidad de las partículas [85–87].

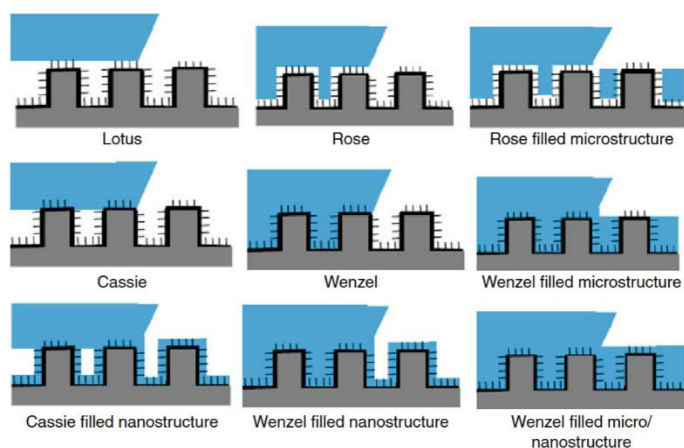


Figura 7 Esquemas de nueve escenarios de humectación para una superficie con rugosidad jerárquica [88].

1.2.2 Modificación de superficies

Una de las técnicas usadas para fabricar vidrios nanoestructurados consiste en utilizar máscaras formadas de nanopartículas metálicas. Leem *et al.*[2] fabricaron nanoestructuras en vidrios usando máscaras de nanopartículas de oro obtenidas mediante *dewetting* térmico, seguidas de un grabado en seco usando plasma. Estas nanoestructuras modificaron el ángulo de contacto efectivo del vidrio con agua de 65° (vidrio plano) a 31 , 41 y 46° , al utilizar películas de oro de 5 , 10 y 15 nm de espesor, respectivamente. Esto demuestra que el AC del vidrio puede ser ajustado controlando el espesor de la película metálica.

Por otro lado, Son *et al.* [1] fabricaron nanoestructuras de nanopilares y nanoagujeros usando nanopartículas de níquel (Ni) y máscaras de óxido de aluminio anódico (AAO), respectivamente. Estas nanoestructuras presentaron propiedades superhidrofílicas con un AC menor a 5° . Al agregar un recubrimiento de PFTS (1H, 1H, 2H, 2H-perfluorodeciltrióxido de silano), lograron transformar estas superficies en superhidrofóbicas, con ángulos de contacto superiores a 150° .

Un enfoque alternativo y de bajo costo fue propuesto por Bravo *et al.*[4], quienes usaron litografía suave y grabado químico con hidróxido de potasio (KOH) para transferir patrones unidimensionales derivados de discos digitales versátiles (DVD). Dependiendo del tiempo de grabado y la concentración del agente de grabado, se obtuvieron superficies con AC

variables, desde $9.3 \pm 2^\circ$ hasta 61° . Los vidrios caracterizados en esta tesis fueron fabricados mediante este último método.

1.3 Fuerza de adhesión

Como se mencionó en las secciones anteriores, la fuerza de adhesión desempeña un papel importante en los mecanismos que favorecen el *soiling* de los paneles solares. Uno de los métodos utilizados para caracterizar esta fuerza es la espectroscopía de fuerza mediante microscopía de fuerza atómica (AFM, por sus siglas en inglés).

1.3.1.1 Espectroscopía de fuerza mediante Microscopía de Fuerza Atómica

En un montaje típico de AFM, un actuador piezoeléctrico controla el acercamiento entre ambas superficies, ya sea moviendo el cantiléver o la muestra. La deflexión del cantiléver (Z_c) se mide mediante la técnica de palanca óptica [89,90], la cual emplea un rayo láser que se refleja en la parte posterior del cantiléver. La posición del rayo reflejado se detecta con un fotodetector sensible a la posición (PSD, por sus siglas en inglés), permitiendo así registrar con alta precisión la deflexión del cantiléver durante la interacción.

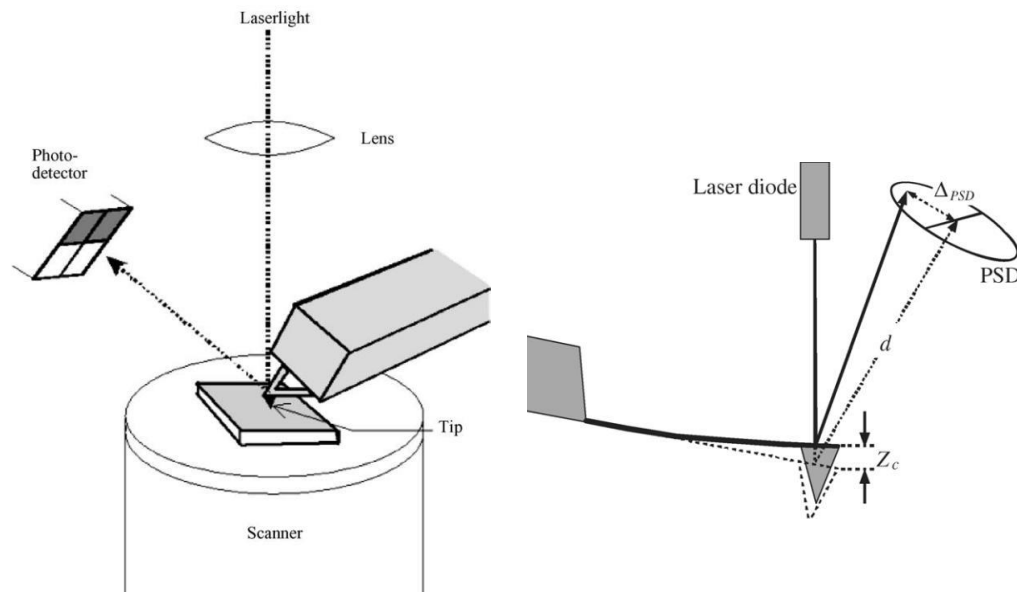


Figura 8 a) Esquema de un Microscopio de Fuerza Atómica b) Esquema de palanca de luz para detectar la deflexión de un cantiléver. El detector sensible a la posición (PSD) es representado por un fotodiodo dividido en dos. Δ_{PSD} es la distancia que se mueve el punto láser en el PSD, d es la distancia entre el cantiléver y el detector. Z_c es la deflexión del cantiléver [91].

El método de espectroscopía de fuerza consiste en acercar un cantiléver del AFM a la superficie de la muestra y luego retirarlo, mientras se registra su deflexión, al conocer la constante elástica del cantiléver es posible calcular la fuerza de la interacción. Cuando la punta del cantiléver se comienza a retirar de la superficie de la muestra, las superficies se mantienen en contacto hasta que la fuerza elástica de la deflexión del cantiléver logra superar a la fuerza de adhesión de la interacción entre la punta y la superficie de la muestra. En el caso general la fuerza de adhesión (F_{ad}) es la combinación de distintas fuerzas como, la fuerza electrostática F_{el} , fuerzas de van der Waals F_{vdW} , la fuerza de menisco o capilar F_{cap} , y fuerzas debidas a enlaces químicos o interacciones acido-base F_{chem} [91]

$$F_{ad} = F_{el} + F_{vdW} + F_{cap} + F_{chem}$$

Para estudios de adhesión entre partículas y superficies es común emplear la técnica de sonda coloidal introducida en 1991 por Ducker *et al.* [92] en la cual se fijan esferas de sílice a cantiléver. El uso de partículas esféricas lisas con un radio definido permite analizar la fuerza de adhesión de manera más cuantitativa, aumenta la magnitud de la fuerza medida y, por ende, la sensibilidad del experimento. Además, ofrece la posibilidad de fabricar sondas con partículas de distintas composiciones químicas y permite realizar mediciones de fuerzas hidrodinámicas.

1.3.2 Curvas de Fuerza

Butt *et al.* [91] indican que el resultado directo de una medición de fuerza es la corriente del fotodiodo (I_{PSD}) versus la posición del actuador piezoeléctrico (Z_p), para obtener la curva de fuerza versus distancia de la punta y la superficie es necesario convertir I_{PSD} y Z_p a fuerza y distancia. Para esto es necesario conocer dos parámetros, la sensibilidad y la distancia cero. Estos parámetros deben inferirse a partir de la propia curva de fuerza, ya que no es posible medirlos directamente mediante un método externo. En la mayoría de los casos, se asume que el régimen lineal de la curva de fuerza durante el contacto corresponde al régimen de deformación elástica lineal, y por tanto su pendiente define la sensibilidad $\frac{dI_{PSD}}{dZ_p}$, mientras que la intersección de los regímenes de contacto y no contacto se toman como la posición de contacto o contacto cero. La Figura 9 ilustra cómo interpretar gráficamente estas regiones y extraer los parámetros requeridos para distintos casos.

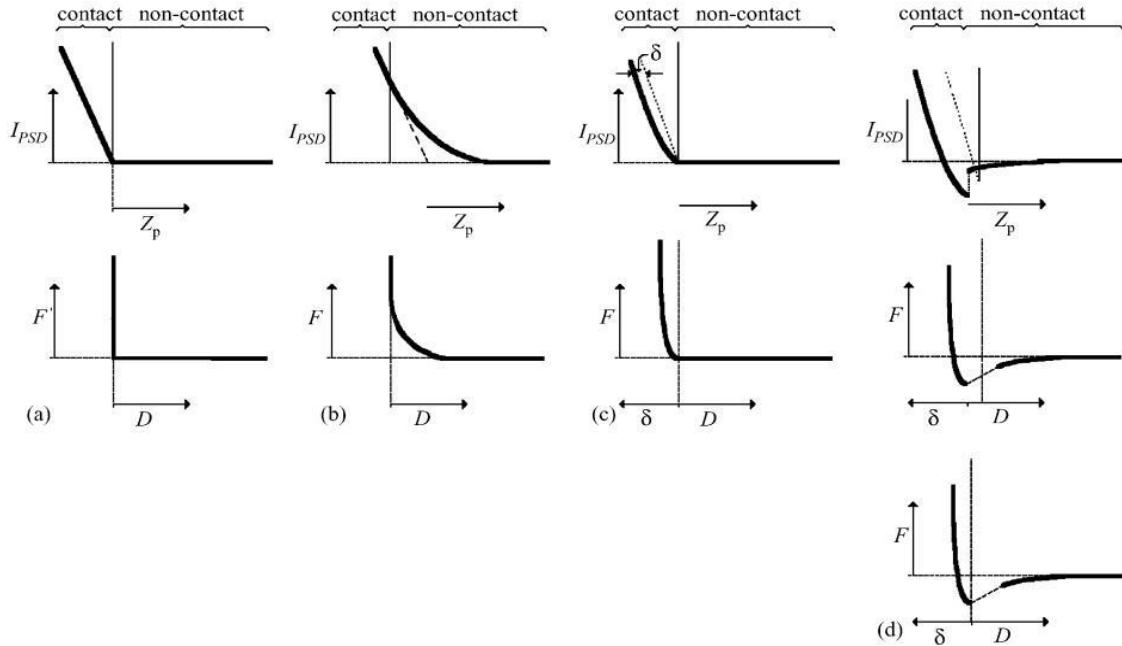


Figura 9 Las curvas I_{PSD} -vs- Z_p (Señal de corriente del detector sensible a la posición vs. posición piezoeléctrica) son convertidas a curvas de fuerza-vs-distancia (F -vs- D), donde D es dado por la suma de la deflexión del cantiléver Z_c y la posición del piezoeléctrico Z_p . (a) Punta y muestra infinitamente duras sin fuerzas superficiales. (b) Materiales infinitamente duros, pero con una repulsión de largo alcance. (c) Materiales deformables sin fuerzas superficiales. En este caso, sugerimos interpretar el eje de distancia negativa como una indentación δ . (d) Materiales deformables con fuerza de atracción y adhesión. La figura inferior adicional muestra la interpretación errónea habitual, en la que se coloca una distancia cero hasta el final del salto. Para (a) y (b), las partes que se acercan y se retraen de las curvas de fuerza son idénticas. Para (c) las partes que se acercan y se retraen son idénticas si la deformación es elástica. Para (d) la retracción muestra una fuerza de adhesión. La figura inferior adicional muestra la interpretación errónea habitual, en la que se coloca una distancia cero hasta el final del salto. Para (a) y (b), las partes que se acercan y se retraen de las curvas de fuerza son idénticas. Para (c) las partes que se acercan y se retraen son idénticas si la deformación es elástica. Para (d) la retracción muestra una fuerza de adhesión. [91]

Una vez conocida la sensibilidad, se puede convertir el valor de I_{PSD} en deflexión del cantiléver (Z_c) mediante la relación $Z_c = \frac{I_{PSD}}{dI_{PSD}/dZ_p}$. Conociendo la constante elástica del cantiléver (k_c), la fuerza se calcula como $F = k_c Z_c$, y la distancia real entre la punta y la muestra se determina como $D = Z_p + Z_c$, asumiendo que $Z_p = 0$ en el punto de contacto. Sin embargo, esta aproximación puede generar errores en situaciones donde las superficies son altamente deformables o presentan interacciones de largo alcance, como fuerzas adhesivas o estructuras en capas. En estos casos, la definición de distancia cero se vuelve ambigua y puede inducir a interpretaciones erróneas. Por ejemplo, en materiales deformables, la región de contacto ya no es lineal, y una parte significativa del desplazamiento puede deberse a indentación. En tales casos, es más apropiado describir la interacción en términos de indentación que de distancia absoluta [91].

Las curvas obtenidas durante el acercamiento y retracción de la sonda no suelen ser idénticas. Esta histéresis puede atribuirse distintos fenómenos físicos (Figura 10). En medios líquidos el arrastre hidrodinámico sobre el cantiléver produce un desplazamiento en la línea de fuerza cero (región A en la Figura 10), la histéresis es proporcional a la velocidad de acercamiento/retracción. Otro fenómeno relevante ocurre cuando al acercarse la sonda a la

superficie las fuerzas atractivas a distancia logran superar la fuerza elástica generada por la deflexión del cantiléver, en este punto se pierde el equilibrio y la punta “salta” repentinamente hacia la superficie, lo que genera una pérdida de información de la curva de fuerza vs distancia.

En el régimen de contacto (región B de la Figura 10), la histéresis se asocia generalmente a una deformación plástica o viscoelástica de la muestra. Una deformación elástica no generaría histéresis.

Cuando se retrae la punta, usualmente la adhesión superficial la mantiene en contacto con la superficie hasta que la fuerza elástica de la deflexión del cantiléver es suficiente para superar la fuerza de desprendimiento (también conocida como fuerza de adhesión F_{ad}), perdiéndose el equilibrio en este punto, lo que causa que la sonda “salte” a una posición superior (línea punteada región C de la Figura 10).

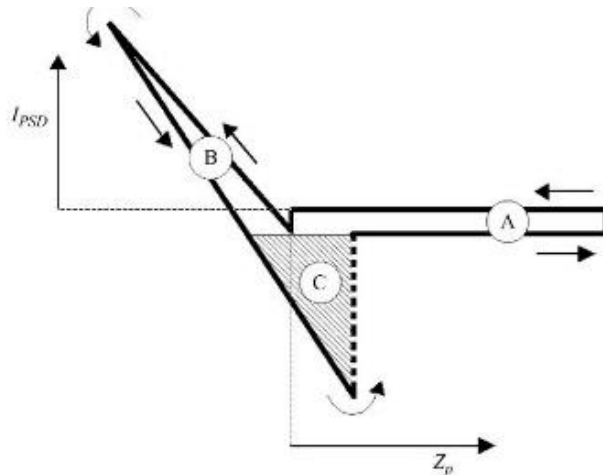


Figura 10 Señal de corriente del detector sensible a la posición (I_{PSD}) esquemática frente a la curva de posición piezoeléctrica (Z_p), incluidas las partes de acercamiento y de retracción. Pueden producirse tres tipos de histéresis: en la línea de fuerza cero (A), en la parte de contacto (B) y en la adherencia (C).

1.3.3 Modelos de adhesión en superficies rugosas

La rugosidad de tanto la superficie como de la punta del *cantilever* influirá en la fuerza de adhesión entre ellas. Para describir estas interacciones se han propuesto diversos modelos, algunos de los cuales son ilustrados en la Figura 11.

El modelo de Rumpf [93] describe el contacto entre una única asperidad hemisférica, centrada sobre una superficie, y una esfera de mucho mayor tamaño alineada a lo largo de la normal que conecta sus centros, con la siguiente ecuación

$$F_{ad} = \frac{A_H R}{6D_0} \left[\frac{r}{r + R} + \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{D_0}\right)^2} \right]$$

Donde A_H es la constante de Hamaker, R y r son los radios de la partícula adherente y de la asperidad, respectivamente, y D_0 es la distancia mínima entre la esfera y la asperidad (espacio interatómico)

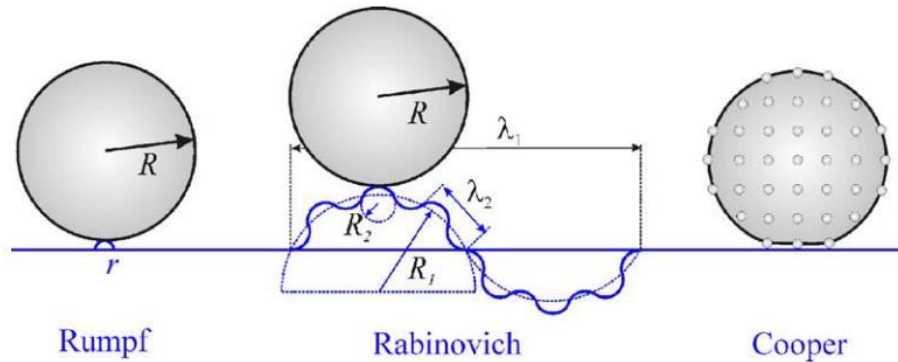


Figura 11 Esquemas de modelos que consideran la influencia de la rugosidad en la adhesión. Izquierda: modelo de Rumpf [93] con una única asperidad de radio r . Centro: modelo de Rabinovich et al. [94], que considera diferentes escalas de longitud λ_1 y λ_2 de la rugosidad superficial, con radios R_1 y R_2 . Derecha: modelo de Cooper et al., que asume una distribución uniforme de las asperidades.

Rabinovich *et al.* [94,95] propusieron una modificación al modelo desarrollado Rumpf donde introducen una forma de calcular la fuerza de adhesión en función de la rugosidad rms de la superficie en dos escalas, denominadas como rms_1 y rms_2 , ubicando además el centro de la asperidad por debajo la superficie, obteniendo la siguiente expresión

$$F_{ad} = \frac{A_H R}{6D_0^2} \left[\frac{1}{1 + (58R \text{rms}_2/\lambda_2^2)} + \frac{1}{(1 + (58R \text{rms}_1/\lambda_1^2))(1 + 1.82 \text{rms}_2/D_0)^2} + \frac{D_0}{(1 + 1.82(\text{rms}_1 + \text{rms}_2))^2} \right]$$

Donde rms_1 y rms_2 son los valores de rugosidad en las escalas de longitud λ_1 y λ_2 , respectivamente. Pruebas experimentales de este modelo [94,96] encontraron que el modelo representaba correctamente la disminución de adhesión al aumentar la rugosidad, sin embargo, la fuerza fue subestimada por alrededor de un orden de magnitud, esto se atribuyó a contribución de fuerzas polares como a deformación de las partículas usadas. Rabinovich *et al.* además consideraron un modelo basado en energía superficial, concluyendo que independientemente del modelo usado, un valor preciso de las constantes de Hamaker o el trabajo de adhesión entre partículas, el factor más influyente es una representación realista del radio de las asperidades.

El modelo de Cooper [97] asume una distribución homogénea de asperidades hemisféricas sobre una partícula esférica. La fuerza total de adhesión se calculó como la suma de la fuerza de una asperidad multiplicada por el número de asperidades en contacto, más la fuerza entre la esfera y la superficie a la distancia $r + D_0$, obteniendo la ecuación.

$$F_{ad} = \left[1 + \sum_{i=1}^{i < a/x} \frac{360}{\arccos\left(1 - \frac{1}{2i^2}\right)} \right] \left[\frac{A_H r^4}{6D_0^2(D_0 + r)^3} \left(1 + \frac{2D_0}{r}\right) \right] + \frac{A_H R}{6(r + D_0)^2}$$

Donde a es el radio de contacto (que debe ser calculado usando un modelo de mecánicas de contacto), r el radio de la asperidad, y x la distancia entre ellas. Se presentaron tres casos para calcular a , caso I donde se considera que la partícula se deforma elásticamente, aplicando el modelo de contacto de JKR [98], caso II donde se asume que la partícula se deforma plásticamente de acorde con el modelo de Maugis-Pollock [99], y el caso III donde se obtiene experimentalmente una relación entre el área de contacto y el radio de partícula. Este modelo fue validado experimentalmente, concluyendo que los casos II y III acotan correctamente las fuerzas de remoción medidas, con el caso II subestimando ligeramente la fuerza y el caso III sobreestimándola. El modelo predice correctamente la dependencia lineal entre la fuerza de remoción y el radio de la partícula para los casos de deformación plástica, coincidiendo con los datos experimentales, y destaca el rol crítico de la rugosidad superficial en la interacción adhesiva. En estudios posteriores Cooper *et al.* [100,101], basándose en el modelo anterior, generaron representaciones computarizadas de topografías de superficie obtenidas por AFM y modelos de superficies rugosas modeladas por fractales y un algoritmo de transformada rápida de Fourier, obteniendo resultados teóricos acordes con los resultados experimentales. Todo esto sustenta la conclusión de Rabinovich *et al.*, de que lo más significativo es una representación realista del radio de las asperidades.

1.3.4 Aplicación de la técnica de sonda coloidal al estudio del soiling

Ma *et al.* [102] realizaron mediciones de fuerza de adhesión entre partículas de suelo marino profundo y distintas superficies metálicas con diferente rugosidad, mediante espectroscopía de fuerza atómica usando la técnica de sonda coloidal. Para preparar la sonda coloidal, dispersaron partículas de suelo marino en agua desionizada y las depositaron sobre un portaobjetos de vidrio. Luego, mediante un micromanipulador y observación mediante microscopía óptica, transfirieron una gota de pegamento ultravioleta desde otro portaobjetos al extremo de un cantiléver sin punta. Con esta gota de adhesivo, lograron adherir una partícula individual de suelo marino al cantiléver, generando así la sonda modificada.

Con esta configuración, caracterizaron la fuerza de adhesión entre las partículas y cuatro tipos de metales: aleación de aluminio (5052), aleación de titanio (STi80, TC4) y titanio puro (TA2). Observaron que, dentro de cierto rango, la fuerza de adhesión disminuye al aumentar la rugosidad superficial. Este comportamiento se explicó mediante el modelo JKR, que relaciona la adhesión con la energía superficial y el área de contacto. En particular, cuando el radio de las asperezas es menor que el tamaño de la partícula, el área de contacto efectiva disminuye, reduciendo la fuerza adhesiva (Figura 12).

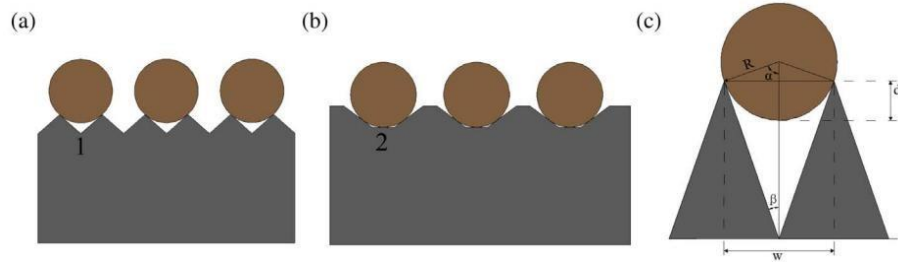


Figura 12 Efecto de la rugosidad superficial en el radio de contacto [102].

Isaifan et al. [103] realizaron un estudio experimental en el que recubrieron portaobjetos de vidrio con películas delgadas de dióxido de titanio (TiO_2) mediante un método de autoensamblaje adsorptivo utilizando dos tipos de nano coloides: TC-1 y TC-2. Estos recubrimientos diferían principalmente en el tamaño de partícula, siendo TC-1 el que presentaba nanopartículas más pequeñas (2.6 nm) y, como consecuencia, una mayor rugosidad superficial [104]. A través de microscopía de fuerza atómica (AFM), se midieron las fuerzas de adhesión entre partículas de polvo y las superficies recubiertas, observándose que TC-1 presentaba una menor fuerza de adhesión en comparación tanto con TC-2 como con el vidrio sin recubrimiento. Además, luego de siete días de exposición al ambiente desértico, el recubrimiento TC-1 mostró una notable reducción en la tasa de deposición de polvo (un 56% menos que el vidrio sin recubrimiento), atribuida principalmente a su mayor rugosidad superficial, acompañado de un menor índice de refracción y mayores propiedades hidrofílica, apropiadas para regiones desérticas húmedas. Estas características favorecen tanto la reducción de las fuerzas de Van der Waals como de las fuerzas capilares responsables de la adhesión del polvo, consolidando a TC-1 como una superficie efectiva para aplicaciones autolimpiantes y de mitigación del soiling en contextos áridos.

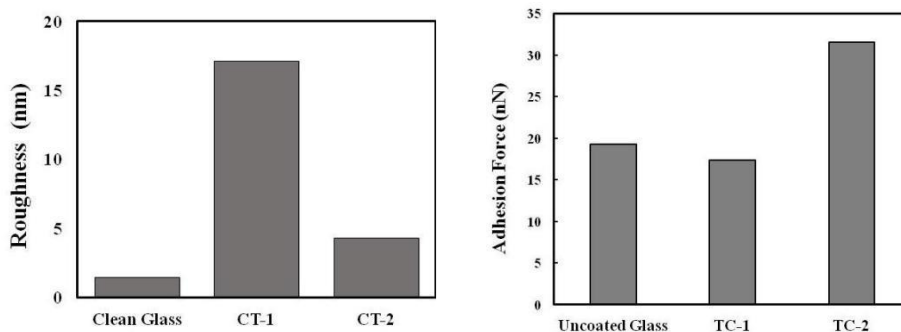


Figura 13 a) Rugosidad superficial de sustratos de vidrio limpios, recubiertos y sin recubrimiento (TC-1 y TC-2) b) Fuerzas de adhesión promedio medidas entre partículas de polvo y sustratos recubiertos (TC-1 y TC-2) y sin recubrimiento [103].

Varga y Wiesner [105], compararon la fuerza de adhesión entre partículas aerotransportadas modelo y superficies de vidrio, con el objetivo de evaluar cómo la composición del polvo influye en el fenómeno de ensuciamiento (*soiling*) de paneles solares. Para ello, seleccionaron ocho tipos de partículas (Figura 14) representativas de los principales componentes del polvo atmosférico, procurando minimizar el efecto del tamaño y la forma mediante el uso de partículas esféricas de entre 10 y $30\mu\text{m}$ de diámetro. Las partículas

estudiadas fueron: microesferas de dióxido de silicio (SiO_2) y microesferas de borosilicato (representando componentes minerales de silicio), partículas esféricas de grafito (representando el componente basado en carbono), microesferas cerámicas (*Solospheres*) y cenizas volantes (materiales inorgánicos comúnmente presentes en zonas de construcción o actividad industrial), así como polen de cenizo (*Chenopodium album*) y de alfalfa (*Medicago sativa*), junto con microesferas de yeso como representante de materiales higroscópicos (Figura 14).

Para cuantificar la fuerza de adhesión, emplearon la técnica de sonda coloidal (*colloidal probe technique*), utilizando un microscopio de fuerza atómica (AFM). En este enfoque, cada partícula fue adherida individualmente a un cantiléver, y la fuerza de adhesión se midió en función de la deflexión del cantiléver al ser separado de una superficie de vidrio borosilicato. Los resultados mostraron que las partículas basadas en carbono (grafito y polen) presentaron fuerzas de adhesión significativamente mayores que las partículas inorgánicas, lo que se atribuye tanto a sus propiedades químicas como a su morfología superficial. En particular, el polen de alfalfa exhibió la mayor fuerza de adhesión promedio (302 nN), seguido por el grafito (197 nN) y el polen de cenizo (204 nN), mientras que partículas como las de sílice o *solospheres* presentaron fuerzas mucho menores (79 y 100 nN, respectivamente)

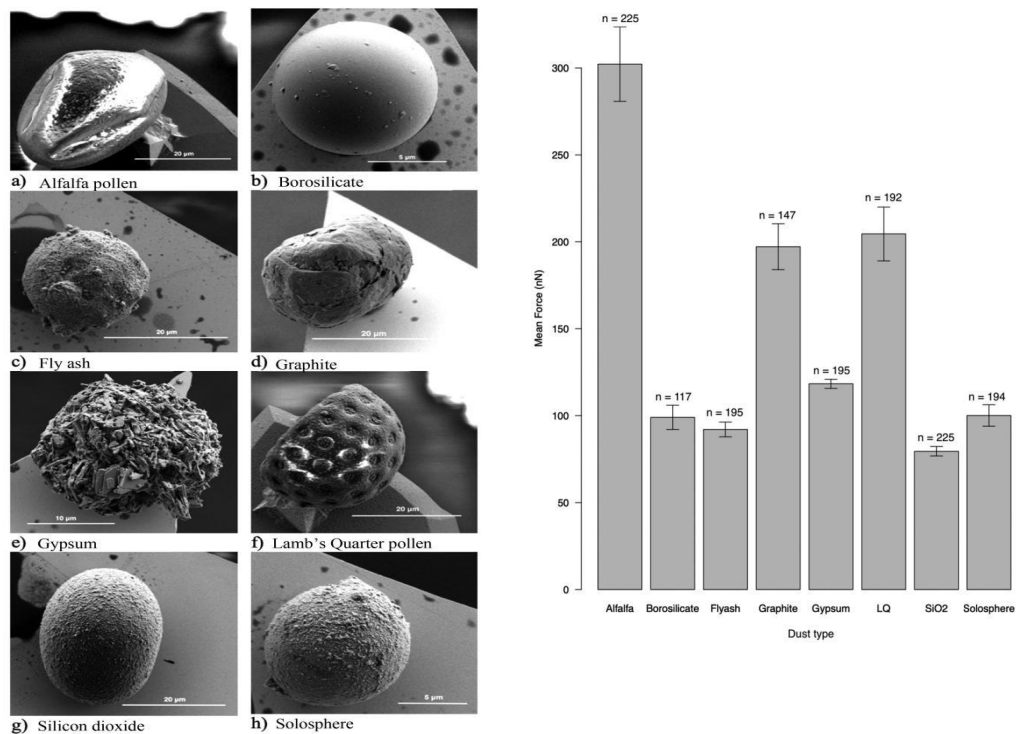


Figura 14 A la derecha Imágenes de microscopio electrónico de barrido de una partícula de ejemplo de cada tipo de contaminante, a) polen de alfalfa (*medicago sativa*), b) borosilicato, c) cenizas volantes, d) grafito, e) yeso, f) polen de cenizo (*Chenopodium album*), g) dióxido de silicio (SiO_2), h) microesfera cerámica (*solosphere*). A la izquierda Diagrama de barras de las fuerzas de adhesión medidas con AFM para cada tipo de partícula modelo. Las barras de error representan el error estándar y n denota el tamaño de la muestra [105].

En un estudio posterior [106], los mismos autores compararon los resultados obtenidos con la técnica de sonda coloidal con los obtenidos mediante un método de centrifugación, ampliamente usado en la industria farmacéutica. Para ello, las partículas fueron depositadas sobre superficies de vidrio y sometidas a velocidades de entre 1000 y 10000 rpm, cuantificándose su remoción a través de imágenes de microscopía óptica. Se observó que el patrón de remoción seguía una tendencia similar a las mediciones de adhesión por AFM, es decir las partículas con mayores fuerzas de adhesión requerían mayores velocidades para ser desprendidas. Específicamente, las partículas orgánicas y basadas en carbono mostraron una mayor retención, confirmando su fuerte interacción con la superficie. Asimismo, se estableció una correlación cuantitativa entre ambas metodologías, lo que sugiere que la técnica centrífuga puede ser calibrada con datos de AFM para predecir de manera más eficiente la tendencia al ensuciamiento y la dificultad de limpieza según la composición del polvo.

Tabla 3 Fuerzas de adhesión obtenidas de partículas modelo a través de AFM en comparación a fuerzas centrífugas necesarias para desprendimiento de partículas, adaptado de [106].

<i>Tipo de partícula</i>	<i>Promedio estimado de diámetro (μm)</i>	<i>Fuerza de adhesión por AFM (nN)</i>	<i>Fuerza centrífuga al 50% de desprendimiento de partículas (nN)</i>	<i>Fuerza centrífuga al 90% de desprendimiento de partículas (nN)</i>
Alfalfa	24.6-32.8	302±21.4	65.9-183	183-359
Cenizo	25.6-29	204±15.5	61.8-172	336-686
Grafito	17.8-27.8	197±13.2	52-103	209-301
Yeso	14.1-19.1	118±2.60	2.84-25.6	139-284
Ceniza	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	0-2.84	23.7-65.9

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar a nivel microscópico la adhesión de partículas de arena, solubles e insolubles, del desierto de Atacama en vidrios con distinto rugosidad superficial.

2.2 Obejtivos específicos

Fabricar y caracterizar composicionalmente las sondas de arena solubles e insolubles, del desierto de Atacama.

Aplicar la técnica de espectroscopía de fuerza mediante microscopía de fuerza atómica (AFM) usando las sondas coloidales fabricadas con granitos de arenas provenientes del desierto de Atacama.

Analizar el efecto de la rugosidad del vidrio y composición química de la arena en la fuerza de adhesión, para evaluar estrategias de mitigación del soiling en vidrios utilizados en sistemas solares.

3. Metodología

En esta tesis se caracterizó la fuerza de adhesión entre partículas de arena y vidrio nanoestructurado, fabricado con el método de Bravo *et al.* [4], a través de espectroscopía de fuerza, usando sondas coloidales fabricadas con granitos de arena de la PSDA.

3.1 Modificación de superficie

Para modificar la superficie de los vidrios, se emplearon portamuestras de vidrio soda-lima, previamente limpiados en un sonicador con agua destilada, isopropanol y finalmente etanol, los vidrios lisos usados para las mediciones de fuerza fueron limpiados de la misma forma. Primero, se transfirió el patrón de un DVD a una estampa fabricada con elastómero de PDMS (SYLGARD™ 184). Sobre el portamuestras se depositó una solución de PMMA para, a continuación, transferirle el patrón usando la estampa. Una vez curado el PMMA, se grabó el patrón utilizando una solución de KOH al 30%. Finalmente, se retiró la máscara de PMMA mediante acetona, la Figura 15 muestra un esquema de este proceso. Además, como control, se aplicó el tratamiento con KOH al 30% a vidrios sin máscara.

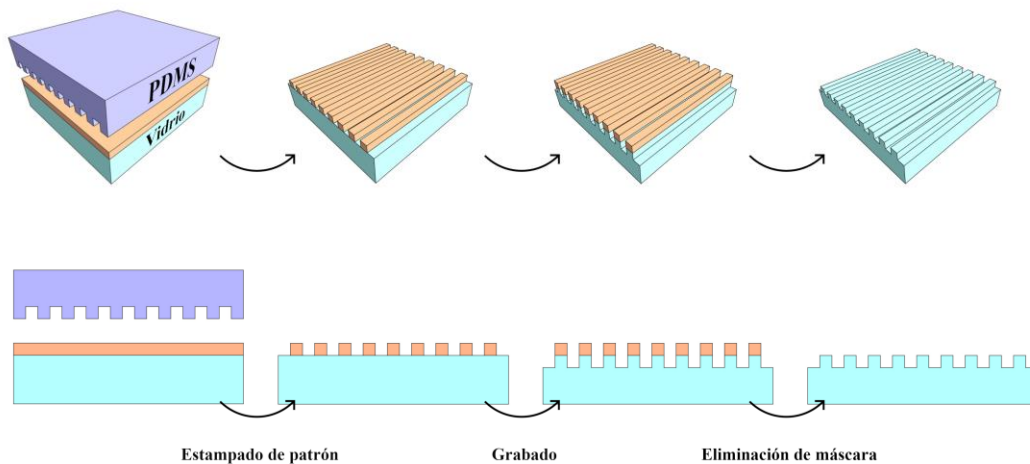


Figura 15 Proceso de modificación de superficie de vidrio, mediante estampa de PDMS y máscara de PMMA.

3.2 Fabricación de sonda coloidal

La fabricación de sondas coloidales con granito de arena se llevó a cabo utilizando un micro manipulador y un microscopio óptico (ZEISS Primotech), este montaje se puede observar en la Figura 16. El proceso comenzó con la dispersión de arena sobre un trozo de silicio, creando una capa de partículas sobre la superficie. A continuación, se preparó una sonda de AFM sin punta, que se colocó en el portaherramientas del micro manipulador. Para adherir el granito, se preparó una mezcla de adhesivo epóxico, que se depositó con una jeringa para insulina en una esquina del silicio, generando una pequeña gota de adhesivo. Usando el microscopio, se localizó la gota de adhesivo, y se presionó el *cantilever* de la sonda AFM sobre ella. Para eliminar el exceso de adhesivo, se presionó el *cantilever* contra el silicio. Finalmente, un granito de arena fue localizado y se presionó la punta de la sonda sobre este. De esta manera, se obtuvo una sonda coloidal con un granito de arena en su extremo. El proceso completo se registró a través de las imágenes de microscopía óptica mostradas en la Figura 17



Figura 16 Microscopio óptico junto a montaje de micromanipulador hidráulico.

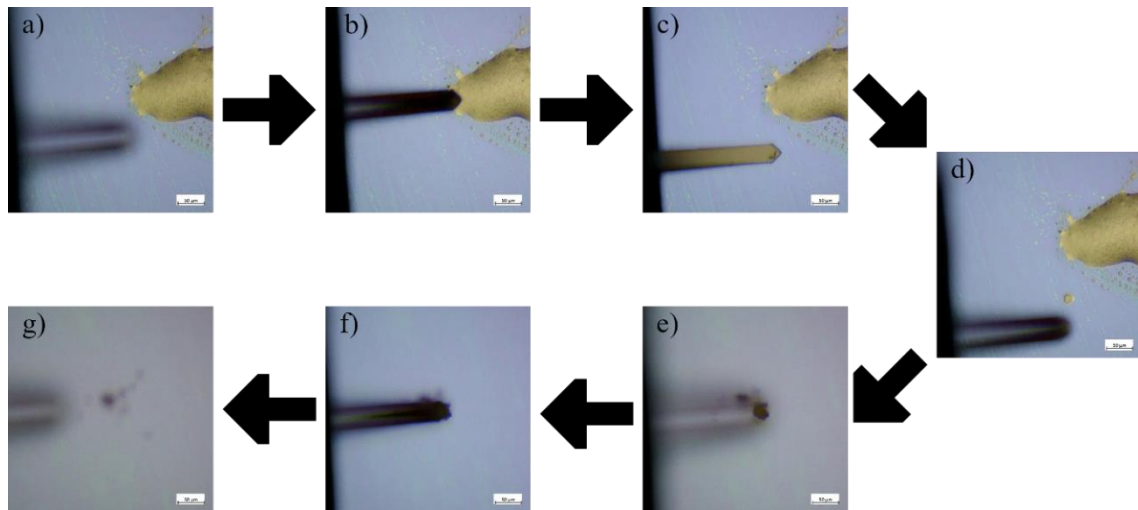


Figura 17 Imágenes de microscopía óptica del proceso de fabricación de sondas coloidales con granito de arena: a) se ubica la gotita de adhesivo epóxico, b) se presiona el cantilever sobre el adhesivo; c) se presiona el cantilever sobre el silicio, d) Se levanta el cantilever eliminando el exceso de adhesivo, e) Se ubica un granito de arena, f) Se presiona el cantilever sobre el granito de arena, g) Se levanta el cantilever adhiriéndose el granito a este.

3.3 Técnica de sonda coloidal

Se utilizó un AFM (Nanosurf FlexAFM), para realizar mediciones de espectroscopía de fuerza usando la técnica de sonda coloidal. Se colocó una de las sondas fabricadas en el equipo, para luego calibrar la sensibilidad presionando la sonda sobre un vidrio liso y calculando la pendiente de la curva de fuerza en el régimen de contacto. Luego se calibra la constante elástica del *cantilever* mediante su ruido térmico. Todo esto lo realiza el software del equipo de manera automatizada. Luego se realizan mediciones de curva de fuerza en una grilla.



Figura 18 A la izquierda caja acústica para FlexAFM, a la derecha equipo FlexAFM

Las curvas medidas fueron exportadas a archivos csv con ayuda del programa AtomicJ [107], para luego ser procesadas a través de Python. Como parte del preprocesamiento, se utilizó la función `find_peaks` del submódulo `scipy.signal` de la librería SciPy para identificar los eventos de desprendimiento en la curva de retracción, descartando las curvas que presentaran múltiples desprendimientos, lo cual no permite determinar con seguridad la fuerza de adhesión (Figura 19). Debido a la morfología de los granos de arena usados, determinar el punto de contacto (punto de distancia cero) no es posible, por lo tanto, el eje x de los gráficos mostrados corresponde al desplazamiento del actuador piezoeléctrico (Z_c), esto dificulta la obtención de otras características como el trabajo de adhesión o características elásticas de los granos de arena.

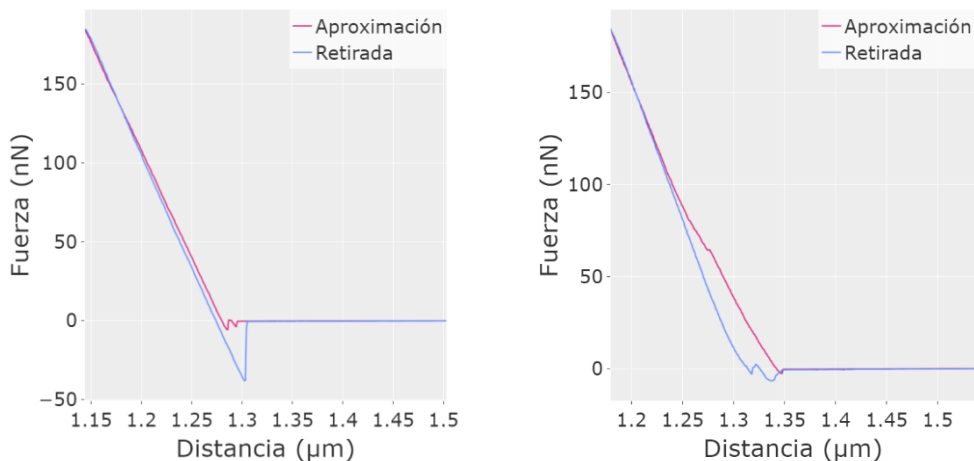


Figura 19 A la izquierda curva de fuerza con un valle de fuerza de adhesión bien definido, a la derecha curva de fuerza con múltiples desprendimientos que no permiten determinar la fuerza de adhesión. En ambas curvas la interacción de “salto” (snap in) hacia la superficie no está bien definida lo que imposibilita el determinar el punto de contacto (o punto de distancia cero), por lo que el eje x representa el desplazamiento del actuador piezoeléctrico.

4. Resultados

4.1 Caracterización de arena

Para caracterizar la arena obtenida de la PSDA, se depositaron muestras de su fracción soluble e insoluble sobre una cinta de carbono colocada en el portaobjetos de un SEM, donde se realizó espectroscopía de rayos X (EDX). Como se observa en la Figura 20 ambas fracciones tienen una alta presencia de oxígeno.

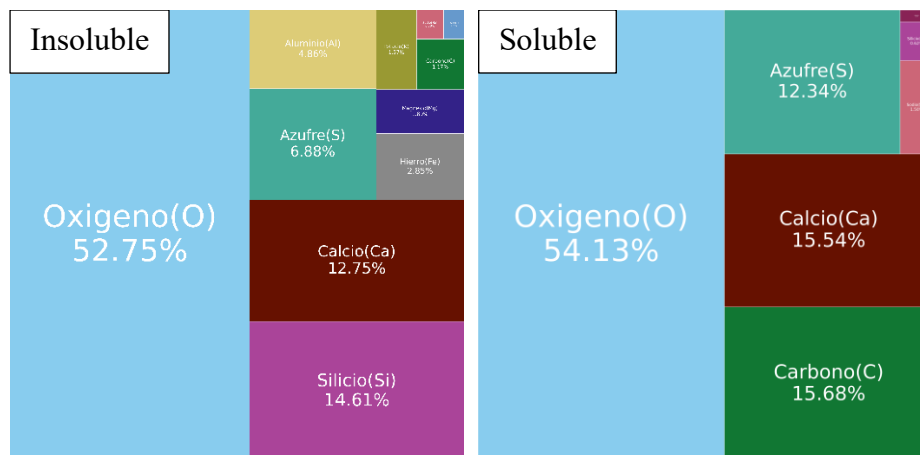


Figura 20 Análisis EDX de la arena obtenida de la PSDA, a la izquierda se encuentra la fracción insoluble de la muestra y en la parte derecha la fracción soluble.

Para comparar la composición de los granitos de arena con la arena entera se omitirá el oxígeno debido a la gran presencia de óxidos en los compuestos de la arena, la Figura 21 presenta la composición de la arena sin mostrar el oxígeno, junto con las concentraciones de los compuestos reportados por Olivares *et al.* [3]. Se encontró que la fracción insoluble de la arena está compuesta principalmente por calcio (Ca), silicio (Si), azufre (S), aluminio (Al), potasio (K), magnesio (Mg) y sodio (Na), estos elementos son los esperados para los

compuestos albíta (NaSi_3O_8), anhidrita ($\text{Ca}(\text{SO}_4)$), calcita (CaCO_3), cuarzo (SiO_2) y ortoclasa ($\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$). En contraste, la fracción soluble presentó predominantemente oxígeno, calcio y azufre, lo que corresponde a yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

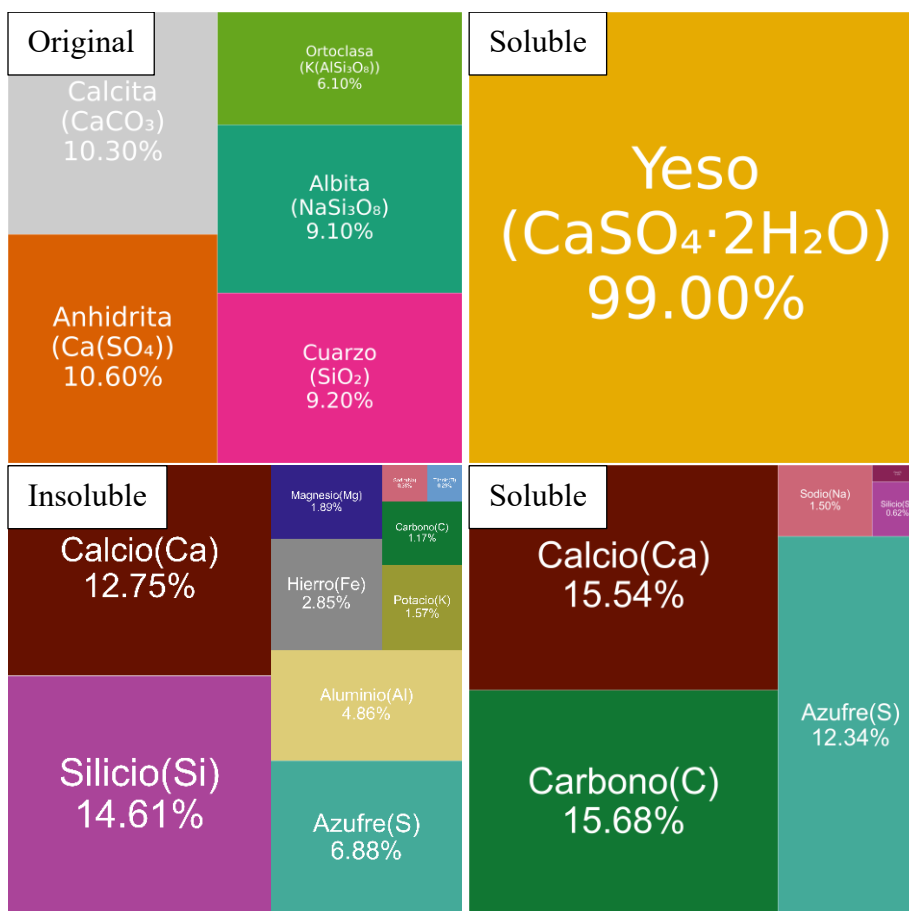


Figura 21 Arriba: Análisis XRD de la arena obtenida de la PSDA, a la izquierda muestra original sin mostrar el yeso, en la derecha fracción soluble de la muestra [3]. Abajo: Análisis EDX de la arena obtenida de la PSDA sin mostrar oxígeno, en la izquierda se encuentra la fracción insoluble de la muestra y en la parte derecha la fracción soluble, el carbono es un contaminante común en mediciones de EDX.

4.2 Sondas

Para caracterizar las sondas fabricadas, se obtuvieron imágenes ópticas y SEM de estas. Además, se realizó un análisis EDX para conocer su composición química individual.

4.2.1 Sondas Insolubles

Se fabricaron dos sondas con la fracción insoluble de la arena obtenida de la PSDA (JCB05 y JCB10). En la Figura 22 se observa que los granitos de arena no tienen una forma bien definida y en la Figura 22(JCB10 c) se observa una gran rugosidad que se puede atribuir a ser un granito formado de múltiples compuestos.

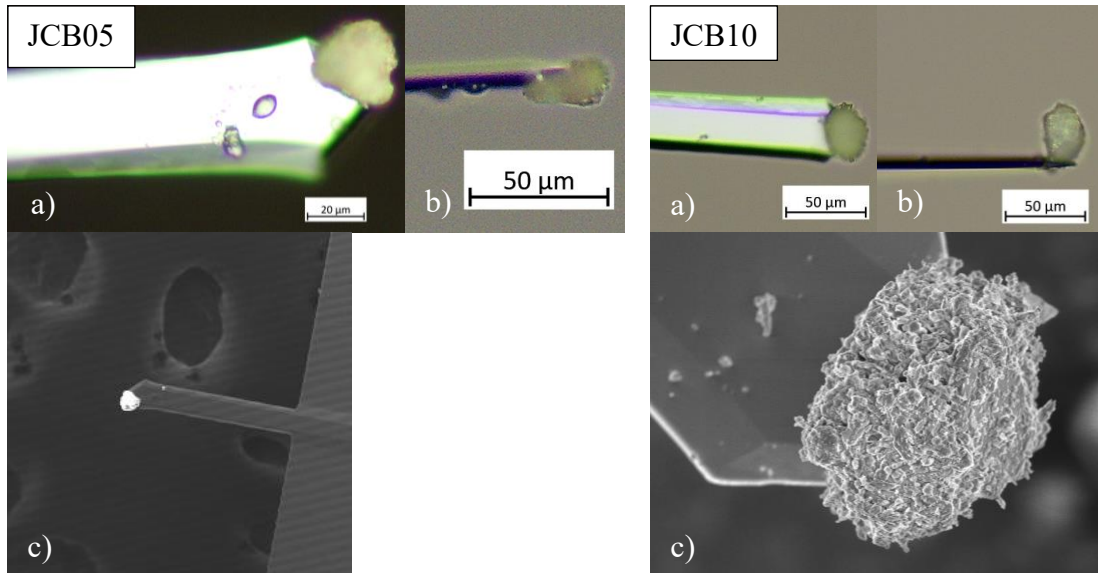


Figura 22 Imágenes de granitos de la fracción insoluble de la arena extraída de la PSDA, adheridos a cantilever. JCB05 corresponde a un granito observado a través de microscopía óptica y SEM. JCB10 corresponde a otro granito observado a través de microscopía óptica y SEM.

La Figura 23 muestra los resultados de EDX, que indican en ambos granitos una alta presencia de silicio la cual puede estar presente como cuarzo (SiO_2), albita (NaSi_3O_8) u ortoclasa (KAlSi_3O_8), junto con variaciones en la concentración de los demás elementos esperados [3]. La sonda JCB05 presenta una mayor concentración de aluminio y potasio, lo que sugiere una mayor presencia de ortoclasa (KAlSi_3O_8) y cuarzo (SiO_2). En contraste, la sonda JCB10 muestra un alto contenido de carbono. Dado que no se observa una alta concentración de calcio (Ca), se descarta elevada concentración de calcita (CaCO_3), atribuyéndose el carbono detectado a contaminación. Esto sugiere que la sonda JCB10 está compuesta principalmente por cuarzo (SiO_2). Para ambas sondas la presencia de otros elementos como sodio y aluminio nos indican que estos granitos no están compuestos solo por uno de los compuestos presentes en la arena, si no que por múltiples de estos.

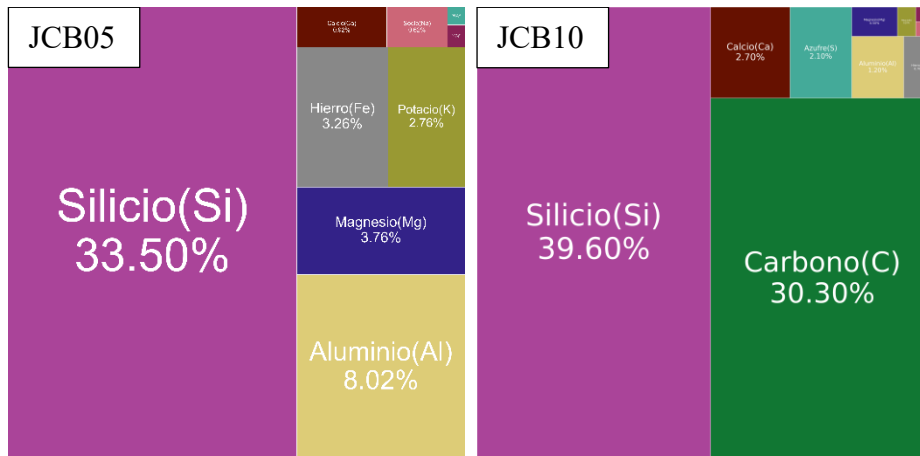


Figura 23 Análisis EDX de granitos de la fracción insoluble de la arena.

4.2.2 Sondas solubles

Se fabricaron dos sondas con la parte soluble de la arena (JCB06 y JCB11), la Figura 24 muestra al igual que en la parte insoluble una morfología poco definida para los granitos de arena, pero en la Figura 24 JCB11 presenta se observa una menor rugosidad con respecto a la parte insoluble, y una estructura prismática como descrito en Olivares *et al*[3]. La caracterización EDX (Figura 25) indica una alta concentración de calcio y azufre para ambas sondas, lo que es correspondiente con yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

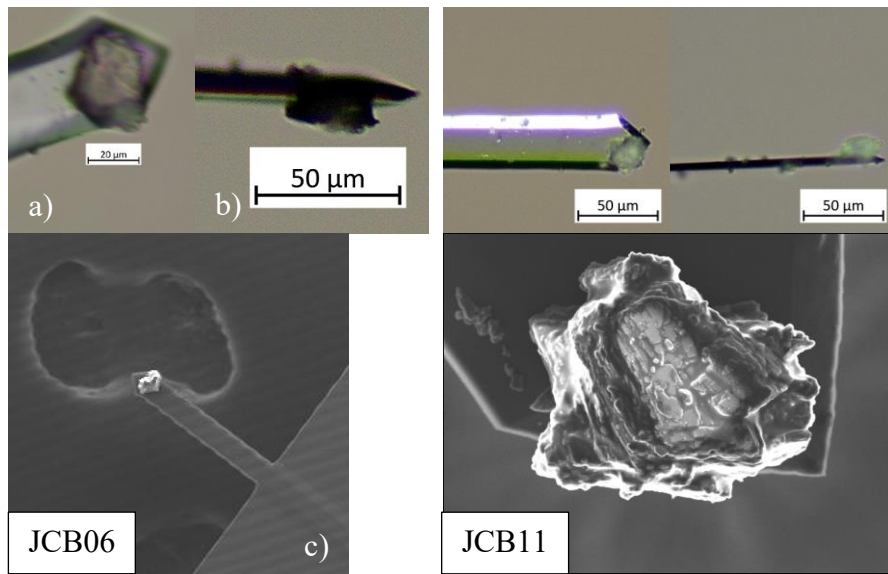


Figura 24 Imágenes de granitos de la fracción soluble de la arena extraída de la PSDA, adheridos a cantilevers, a) corresponde a un granito observado a través de microscopía óptica y SEM. b) corresponde a otro granito observado a través de microscopía óptica y SEM.

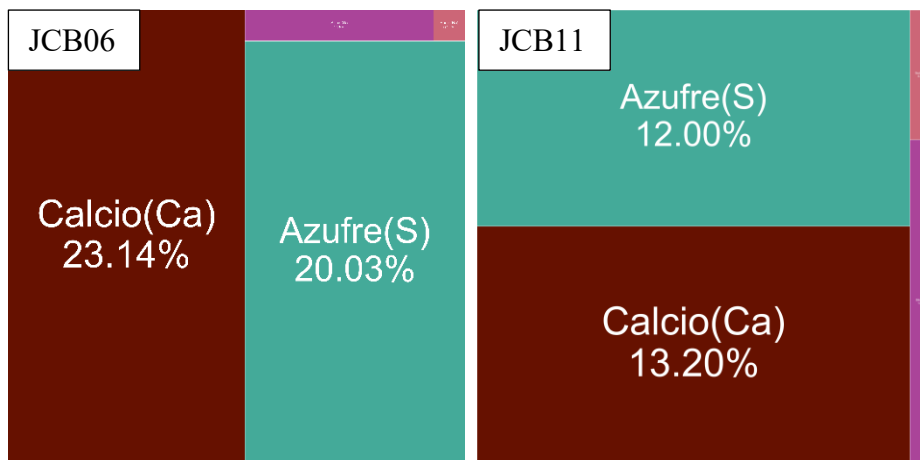


Figura 25 Análisis EDX de granitos de la fracción soluble de la arena.

4.3 Vidrios

Se caracterizó la adhesión con tres tipos de vidrio diferentes, vidrio liso, vidrio tratado con KOH y vidrio nanoestructurado. La Figura 26 muestra imágenes SEM de un vidrio tratado con KOH y un vidrio nanoestructurado, la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar una diferencia en la rugosidad de la muestra de vidrio liso, vidrio tratado con KOH y la muestra de vidrio nanoestructurado, la rugosidad para el vidrio liso es de 2 nm rms, para vidrio tratado con KOH es 13,6 nm rms y para vidrio nanoestructurado es 9,4 nm rms.

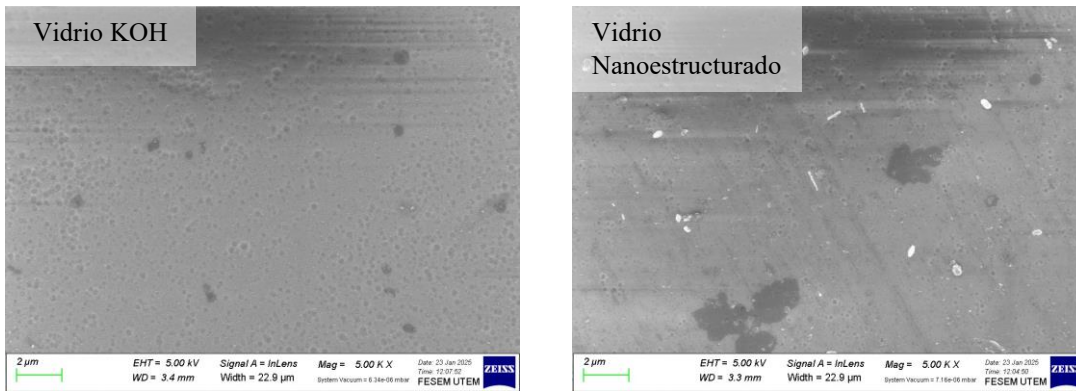


Figura 26 Comparación imágenes SEM de superficies de vidrio tratado con KOH y vidrio nanoestructurado.

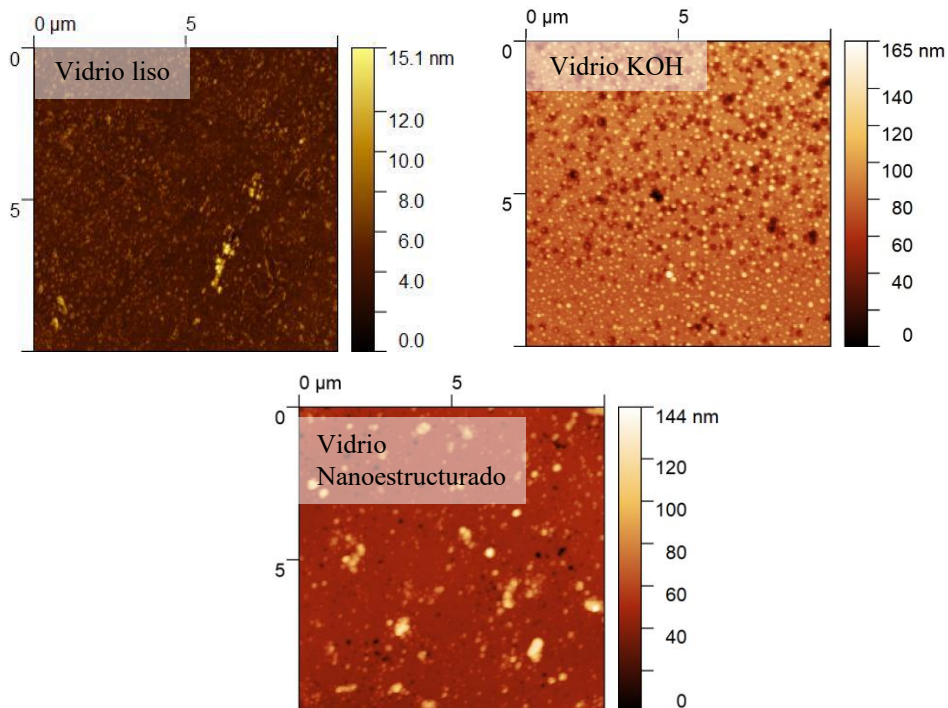


Figura 27 Comparación imágenes AFM de superficies de vidrio liso, vidrio tratado con KOH y vidrio nanoestructurado.

4.4 Fuerza de adhesión

4.4.1 Sonda Insoluble JCB05

4.4.1.1 Vidrio Liso

Se realizaron dos sesiones de mediciones usando la sonda insoluble (JCB05) con vidrio liso. En la primera sesión se realizaron dos mediciones, en distintas zonas del vidrio, usando una grilla de 10x10 puntos sobre un área de 10x10 μm . Los resultados de estas mediciones se presentan en la Figura 28, donde se muestra una de las curvas de fuerza medidas (a) y el histograma de la fuerza de adhesión (b).

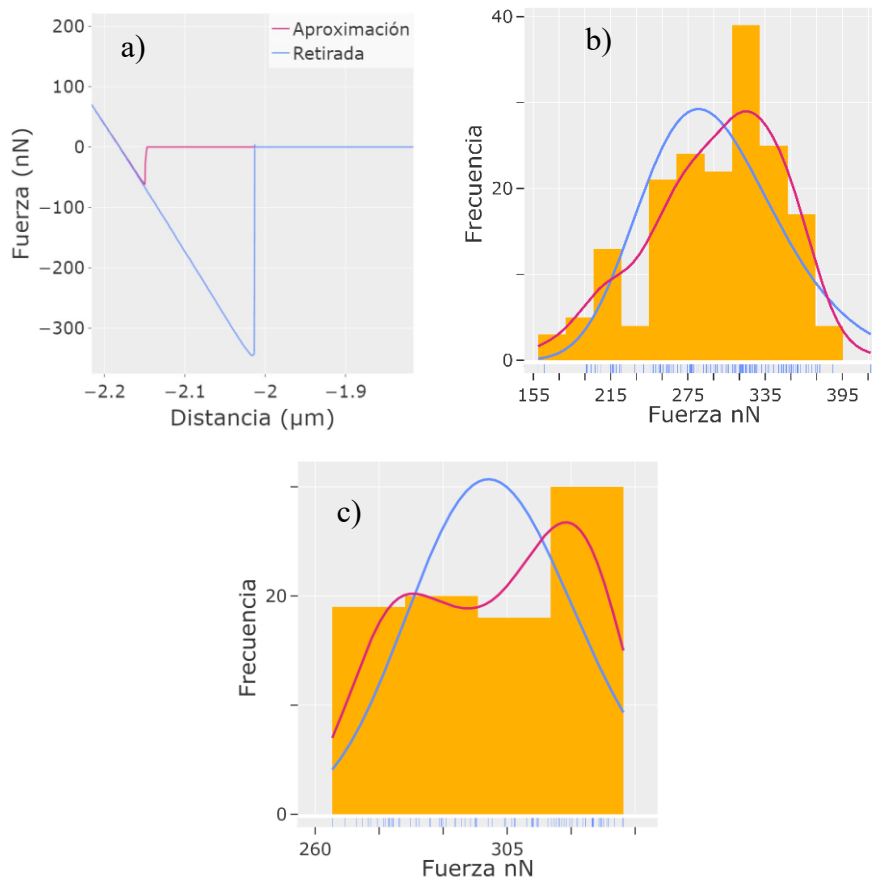


Figura 28 Datos correspondientes a primera sesión de medición: a) Curva de fuerza de la sonda JCB05 sobre vidrio liso. b) Histograma de las fuerzas medidas, con un ajuste de distribución lognormal (línea azul) y una estimación de densidad de kernel (KDE) (línea roja). En la parte inferior, se muestra un gráfico de alfombra. c) Histograma de las fuerzas medidas considerando únicamente IQR el que se concentra el 50% de las mediciones, con un ajuste de distribución lognormal y estimación de densidad de kernel. También se incluye un gráfico de alfombra en la parte inferior.

El rango de fuerzas con mayor frecuencia se encuentra entre 309 y 331 nN con un 22 % de los datos. En el gráfico de estimación de densidad de kernel (KDE, curva roja), se observa que la moda de fuerza es de 319 ± 11 nN. Esta moda fue calculada mediante *bootstrapping* con 1000 remuestreos, el error corresponde a la desviación estándar de estos remuestreos. A partir de este punto, todas las modas obtenidas por KDE se reportarán de esta manera. Por otro

lado, el ajuste lognormal presenta una moda de 283 nN lo que se atribuye a la heterogeneidad de las mediciones

La mediana (IQR) de los datos es 306(263-334) nN (IQR es el rango inter cuartil, el rango entre el primer (Q1) y tercer cuartil (Q3)). La Figura 28(c) muestra el histograma considerando solo el rango inter cuartil (IQR), en este rango notamos que la moda ajustada (lognormal) en este caso corresponde a 300 nN y la moda del gráfico KDE es 314±11 nN.

Durante la segunda sesión se realizaron ocho mediciones, en distintas zonas del vidrio, mediante un barrido en una grilla de 10x10 puntos sobre un área de 10x10µm. Los resultados se resumen en la Figura 29 donde se muestra una de las curvas de fuerza medidas (a) y el histograma de la fuerza de adhesión (b). El rango de fuerzas con mayor frecuencia es de 160 a 172 nN con un 9% de los datos. La estimación de densidad de kernel (KDE) muestra un máximo en 166±3 nN, mientras que el ajuste lognormal muestra una moda en 159 nN, La mediana (IQR) es de 154(81-198) nN.

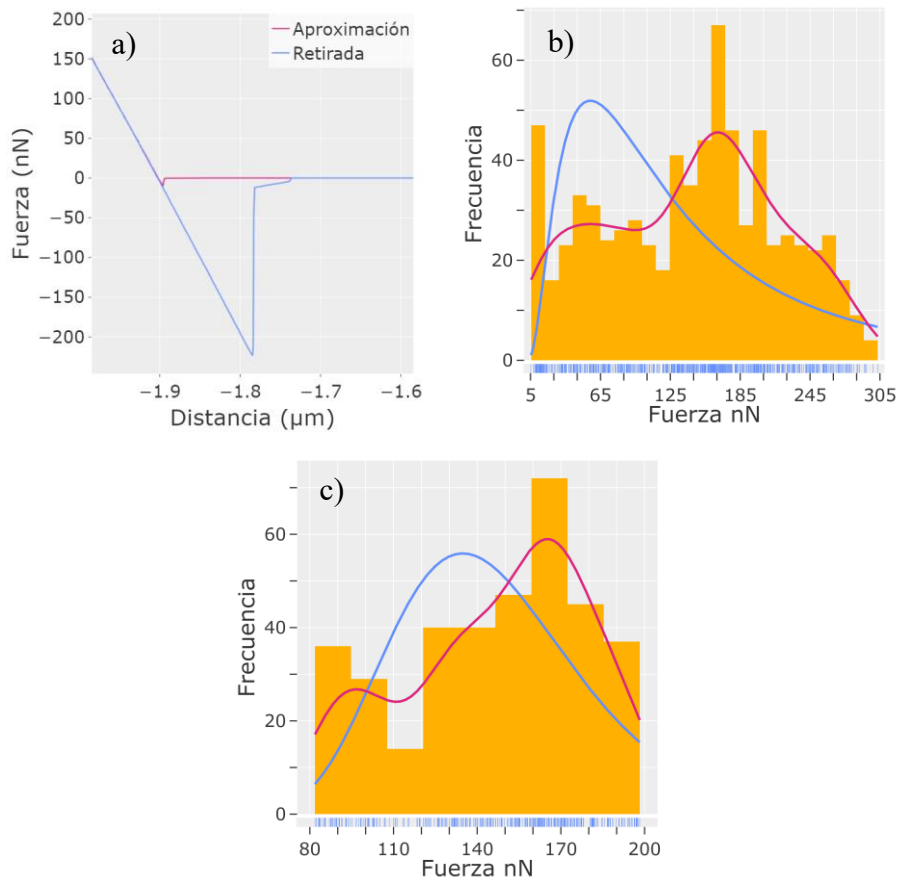


Figura 29 Datos correspondientes a segunda sesión de medición: a) Curva de fuerza de la sonda JCB05 sobre vidrio liso. b) Histograma de las fuerzas medidas, con un ajuste de distribución lognormal (línea azul) y una estimación de densidad de kernel (KDE) (línea roja). En la parte inferior, se muestra un gráfico de alfombra. c) Histograma de las fuerzas medidas considerando únicamente IQR el que se concentra el 50% de las mediciones, con un ajuste de distribución lognormal y estimación de densidad de kernel. También se incluye un gráfico de alfombra en la parte inferior.

Podemos notar que el ajuste lognormal no representa adecuadamente la distribución debido a una cantidad considerable de datos entre los 5 y 120 nN. En Figura 29(c) se aprecia con mayor claridad un aumento en la concentración de datos bajo los 110 nN, lo que impide un ajuste lognormal.

La Figura 30 presenta diagramas de caja y bigotes que comparan ambas sesiones de medición. Se observa una disminución significativa de la mediana, de 306 a 154 nN, y un el IQR pasa de cubrir un 28 a un 39% del rango de datos, lo que indica una mayor dispersión de los datos en la segunda sesión. Debido a estas diferencias solo se considerará la primera sesión de mediciones para comparar con las mediciones realizadas con vidrio tratado con KOH, ya que estas últimas fueron realizadas durante la misma sesión experimental.

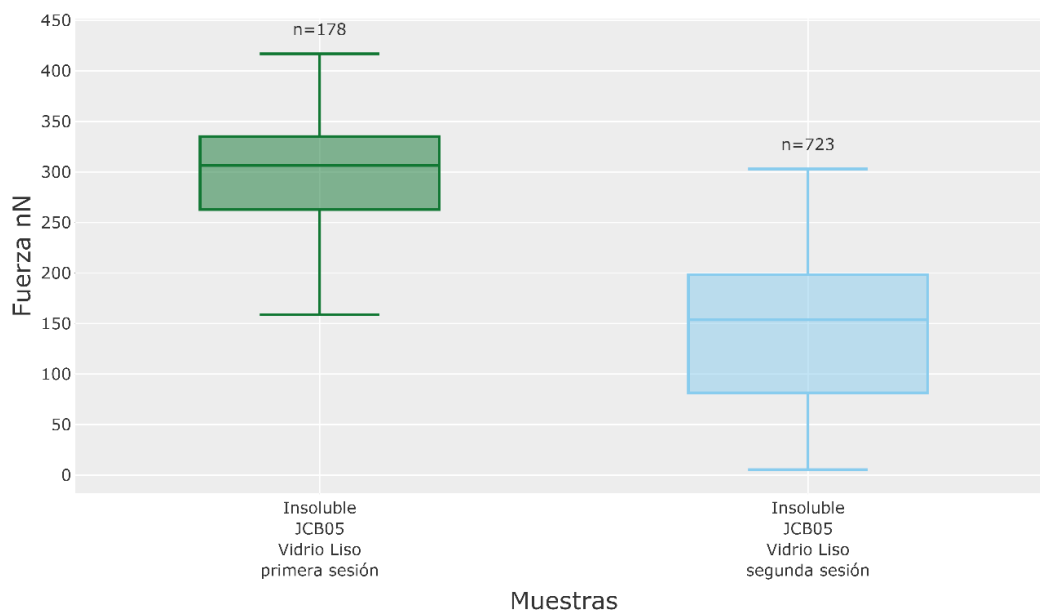


Figura 30 Diagrama de cajas y bigotes de las dos sesiones de medición realizadas con la sonda insoluble JCB05 sobre vidrio liso, la caja cubre el IQR (rango inter cuartil) y los bigotes el rango de todos los datos, la línea dentro de las cajas corresponde a la mediana. Sobre los gráficos se muestra el número de datos usados para el análisis.

4.4.1.2 Vidrio tratado con KOH

Se realizó una sesión de mediciones para la sonda insoluble (JCB05) con el vidrio tratado con KOH, donde se llevaron a cabo dos mediciones, en distintas zonas del vidrio, en una grilla de 10x10 puntos sobre un área de 10x10 μ m. Esta sesión corresponde a la misma en la que se obtuvieron los datos presentados en Figura 28. Los resultados se muestran en la Figura 31, donde se presenta una de las curvas de fuerza medidas junto con el histograma de la fuerza de adhesión. El rango de fuerzas con mayor concentración de datos se encuentra entre 308 y 350 nN, abarcando el 22% de los datos. El gráfico KDE (curva roja) indica que la muestra un máximo en 338 \pm 19 nN. Sin embargo, la moda de la distribución lognormal ajustada se encuentra en 264 nN, lo que podría atribuirse a la presencia de fuerzas bajo los 100 nN. La mediana (IQR) es de 351 (298-414) nN.

Para mejorar el análisis de los datos, se descartaron los contenedores con una frecuencia menor o igual a 5. Como resultado, en la Figura 31c se observa que la mayor concentración de mediciones se encuentra en el rango de 314 a 357 nN con el 30% de los datos. En este caso, el máximo del gráfico KDE es de 336 ± 25 nN, mientras que la moda de la distribución ajustada alcanza los 340 nN. La mediana (IQR) corresponde a 354(310-417) nN.

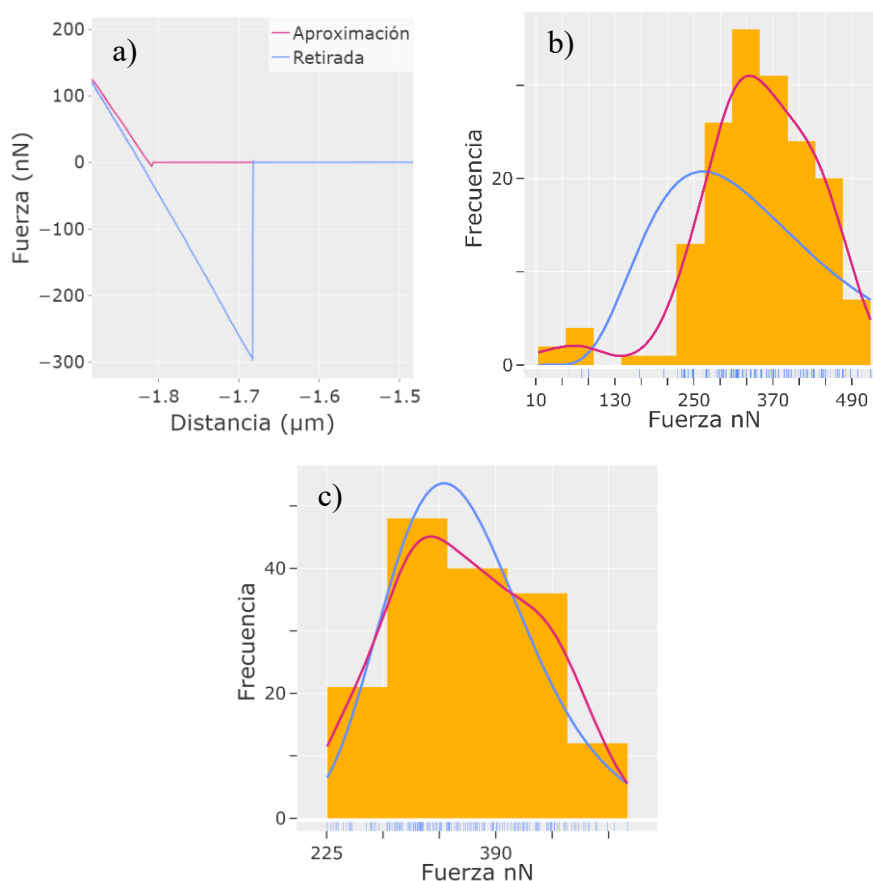


Figura 31 a) Curva de fuerza de la sonda JCB05 sobre vidrio tratado con KOH. b) Histograma de las fuerzas medidas, con un ajuste de distribución lognormal (línea azul) y una estimación de densidad de kernel (KDE) (línea roja). En la parte inferior, se muestra un gráfico de alfombra. c) Histograma de las fuerzas medidas descartando los rangos con una frecuencia menor o igual a 5 en b), con el mismo ajuste de distribución lognormal y estimación de densidad de kernel. También se incluye un gráfico de alfombra en la parte inferior.

4.4.2 Sonda soluble JCB06

4.4.2.1 Vidrio Liso

Se realizó una sesión experimental para la sonda soluble JCB06 con vidrio liso, en la cual se efectuaron cinco mediciones en distintas zonas del vidrio, utilizando una grilla de 10×10 puntos sobre un área de $10 \times 10 \mu\text{m}$. Los resultados se presentan en la Figura 32, donde se muestra una de las curvas de fuerza medidas (a) junto con el histograma de la fuerza de adhesión (b). El rango de fuerzas con mayor concentración de datos se encuentra entre 8.9 y 9.9 nN, abarcando el 11% de las mediciones. El gráfico KDE (curva roja) muestra un máximo

en 10.3 ± 0.3 nN, mientras que el ajuste lognormal sitúa la moda en 11.1 nN. La mediana (IQR) corresponde a 12.2 (9.6-16.4)

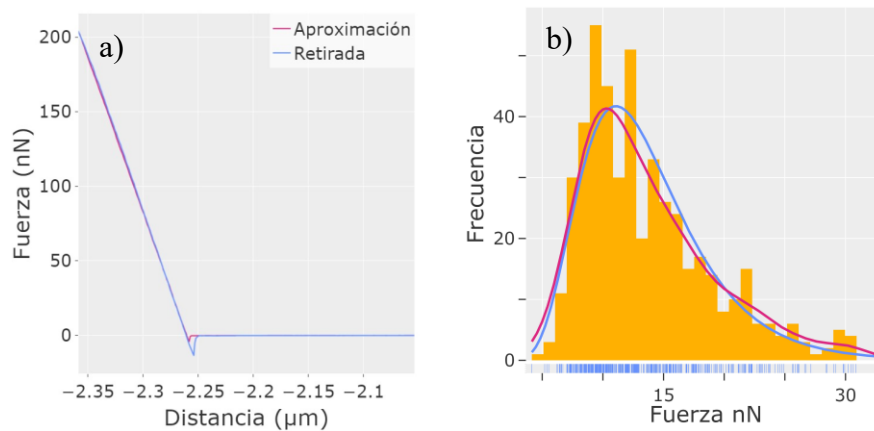


Figura 32 a) Curva de fuerza de la sonda JCB06 sobre vidrio tratado con KOH. b) Histograma de las fuerzas medidas, con un ajuste de distribución lognormal (línea azul) y una estimación de densidad de kernel (KDE) (línea roja). En la parte inferior, se muestra un gráfico de alfombra.

4.4.3 JCB11(soluble)

Se realizó una sesión experimental usando la sonda soluble JCB11 donde se realizó una medición sobre cada vidrio (vidrio liso, vidrio tratado con KOH y vidrio nanoestructurado), mediante una grilla de 30x30 puntos sobre un área de 50x50 μm .

4.4.3.1 Vidrio Liso

Las mediciones de fuerza de la sonda soluble JCB11 con vidrio liso son presentadas en la Figura 33, se muestra una de las curvas de fuerza medidas (a) y el histograma de la fuerza de adhesión (b). El rango de fuerzas donde se encuentra el mayor número de mediciones es entre 103 a 114 nN con un 9% de los datos. El máximo del gráfico KDE se encuentra en 102 ± 21 nN con una amplia meseta entre los 5 y 75 nN, mientras que la moda de la distribución lognormal ajustada se encuentra en 49 nN. Esto se atribuye a la distribución heterogénea de las fuerzas medidas.

Como se observa en el mapa de fuerzas (Figura 34), la fuerza disminuyó a medida que avanzaba el barrido, comenzando desde la esquina inferior izquierda. Esto podría explicar la distribución heterogénea de fuerzas observada en la Figura 33 y estar asociado a una deformación o rotura del grano de arena.

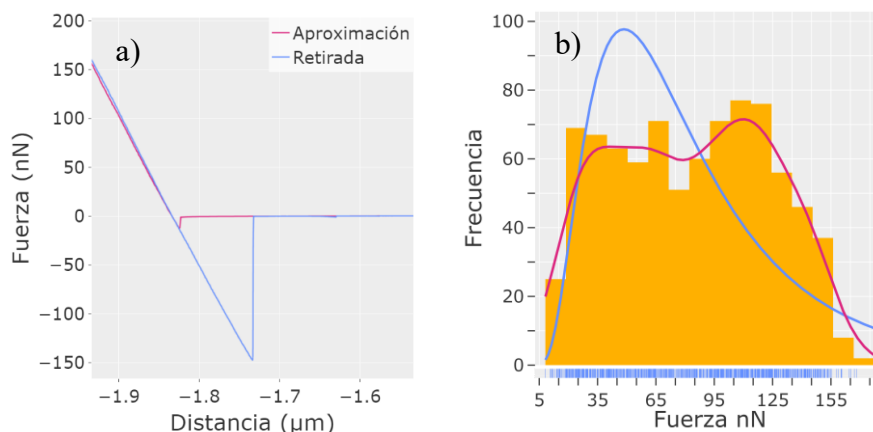


Figura 33 a) Curva de fuerza de la sonda JCB11 sobre vidrio liso. b) Histograma de las fuerzas medidas, con un ajuste de distribución lognormal (línea azul) y una estimación de densidad de kernel (KDE) (línea roja). En la parte inferior, se muestra un gráfico de alfombra.

En la Figura 35 se presentan los histogramas correspondientes a la primera y segunda mitad del barrido. En la primera mitad, el gráfico KDE muestra un máximo de 127 ± 4 nN, mientras que el ajuste lognormal muestra una moda de 64 nN y no es adecuado en este caso. En la segunda mitad, el máximo en el gráfico KDE es de 40 ± 10 nN, con un rango de mayor frecuencia entre 21 y 31 nN, mientras que la moda de la distribución lognormal ajustada corresponde a 41 nN. La mediana (IQR) corresponde a 12(10-16). Estos resultados muestran que tras la modificación de la sonda (ocurrida durante la medición) la fuerza de adhesión disminuyó. Cabe destacar que esta fue la primera medición realizada con esta sonda, y este comportamiento no se observó en las mediciones posteriores.

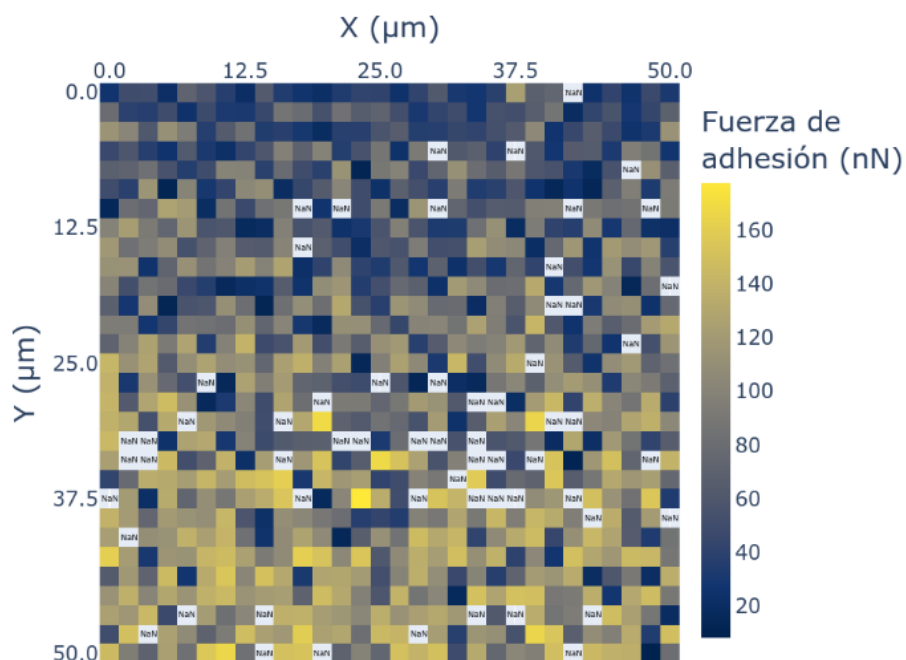


Figura 34 Mapa de fuerzas obtenidas con la sonda JCB11 sobre vidrio liso. El barrido comienza en la esquina inferior izquierda y avanza en un patrón de zigzag hacia la parte superior

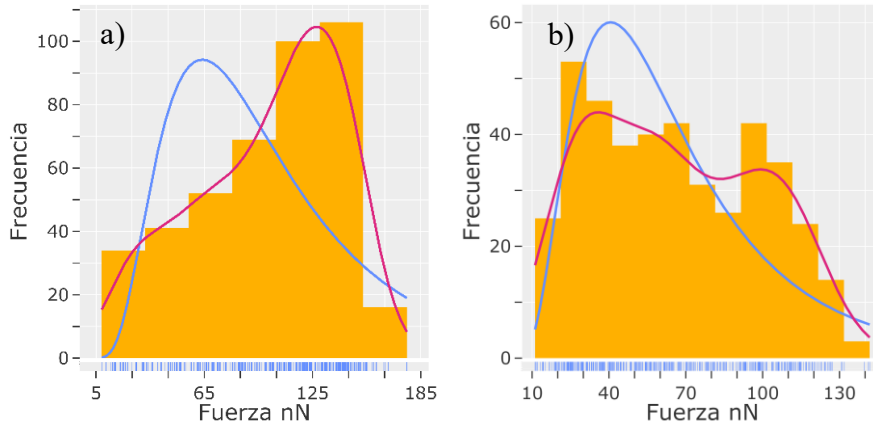


Figura 35 a) Histograma de las fuerzas medidas durante la primera mitad del barrido, con un ajuste a una distribución lognormal (línea azul) y una estimación de densidad de kernel (KDE) (línea roja). En la parte inferior se incluye un gráfico de alfombra. b) Histograma de las fuerzas medidas durante la segunda mitad del barrido, con un ajuste a una distribución lognormal (línea azul) y una estimación de densidad de kernel (KDE) (línea roja). En la parte inferior se incluye un gráfico de alfombra.

4.4.3.2 Vidrio tratado con KOH

Las mediciones de fuerza de la sonda soluble JCB11 con vidrio tratado con KOH son presentadas en la Figura 36. Podemos observar que este grafico muestra un máximo bien definido, con una ligera asimetría positiva. El rango de fuerzas donde se encuentra el mayor número de mediciones es entre 66 y 80 nN con un 19% de los datos. El máximo del grafico KDE se encuentra en 73 ± 4 , mientras que la moda de la distribución lognormal ajustada corresponde a 66 nN. La mediana (IQR) corresponde a 80(61-103) nN.

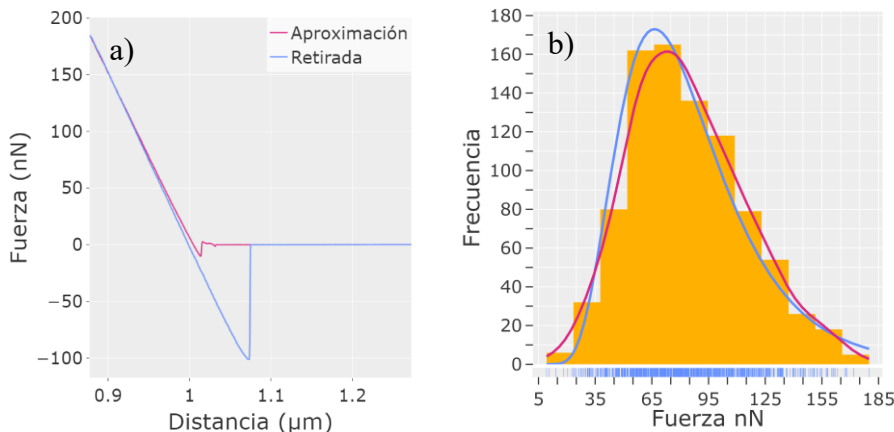


Figura 36 a) Curva de fuerza de la sonda JCB11 sobre vidrio tratado con KOH. b) Histograma de las fuerzas medidas, con un ajuste de distribución lognormal (línea azul) y una estimación de densidad de kernel (KDE) (línea roja). En la parte inferior, se muestra un gráfico de alfombra.

4.4.3.3 Vidrio Nanoestructurado

Las mediciones de fuerza de la sonda soluble JCB11 con vidrio nanoestructurado son presentadas en la Figura 35, donde se muestra una de las curvas de fuerza medidas (a) y el histograma de la fuerza de adhesión (b). Este gráfico un máximo con una gran asimetría hacia

la positiva, junto con una segunda concentración significativa de datos hacia la derecha. El rango de fuerzas donde se encuentra el mayor número de mediciones es entre 10 y 15 nN con un 18% de los datos. El máximo del gráfico KDE se encuentra en 14.4 ± 0.3 nN, mientras que la moda de la distribución lognormal ajustada corresponde a 11 nN. La mediana (IQR) corresponde a 20(12-75) La cantidad no despreciable para fuerzas sobre 100 nN puede deberse a estructuras formadas en el vidrio después de la nanoestructuración (Figura 27).

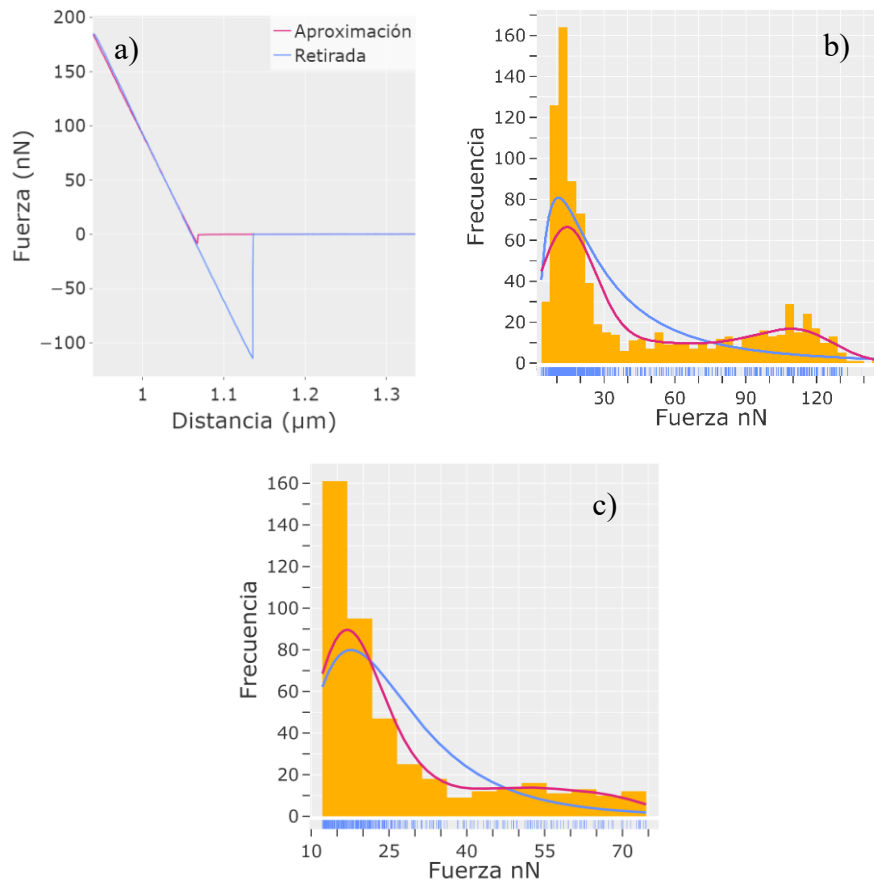


Figura 37 a) Curva de fuerza de la sonda JCB11 sobre vidrio nanoestructurado. b) Histograma de las fuerzas medidas, con un ajuste de distribución lognormal (línea azul) y una estimación de densidad de kernel (KDE) (línea roja). En la parte inferior, se muestra un gráfico de alfombra. c) Histograma de las fuerzas medidas considerando únicamente el IQR de las mediciones, con el mismo ajuste de distribución lognormal y estimación de densidad de kernel. También se incluye un gráfico de alfombra en la parte inferior.

4.5 Discusión

En la Tabla 4 se presenta un resumen de las fuerzas medidas y en la Figura 38 un diagrama de cajas y bigotes para estos datos, donde la caja representa el IQR y las colas el rango de los datos (considerando los datos fuera del rango $Q1-1.5IQR$ a $Q3+1.5IQR$ como valores atípicos).

Para la sonda JCB05 se observa un aumento en la fuerza de adhesión acompañado de una mayor dispersión de los datos, evidenciado por un incremento del IQR de un 27.6% hasta un 36.5% del rango de fuerzas. En el caso de la sonda JCB06, se mantiene un rango de fuerzas

similar en las tres mediciones, aunque se observa una disminución en la dispersión para la medición realizada sobre vidrio tratado con KOH. En esta condición, el valor de fuerza donde se concentran los datos aumenta ligeramente y el IQR se reduce a un 24.6 %, en comparación con el 44.4 % observado en la medición sobre vidrio liso.

Por otro lado, la medición de la sonda JCB11 con vidrio nanoestructurado muestra una mediana considerablemente menor (20 nN) a las otras mediciones, pero con una alta dispersión asociada a la larga cola que se puede observar en la Figura 37. La media de esta fuerza de adhesión es de 42.5 ± 1.8 nN en comparación a la media de 118 ± 2.6 nN reportada en Varga *et al.* para el yeso con vidrio de borosilicato [105], esta diferencia podría ser atribuida tanto a la diferente rugosidad de la superficie como a la morfología de la sonda.

El incremento en la fuerza de adhesión en el vidrio tratado con KOH, a pesar del aumento en la rugosidad, podría estar relacionado con un mayor efecto de las fuerzas capilares inducido por este tratamiento. Bravo *et al.* reportaron que dicho tratamiento reduce el ángulo de contacto con agua, lo que favorecería este mecanismo [4]. Finalmente, se observa que las fuerzas de adhesión obtenidas con sondas solubles son significativamente menores que aquellas medidas con la sonda insoluble, lo cual podría atribuirse tanto a diferencias morfológicas como a propiedades químicas de las sondas.

Tabla 4 Resultados de fuerza de adhesión en las distintas superficies y sondas. Para la sonda JCB05 sobre vidrio liso solo se consideró la primera sesión experimental. Para la sonda JCB05 se consideraron solo los rangos de fuerza con una frecuencia mayor a 5. Para la sonda JCB11 sobre vidrio liso se consideró la fuerza medida en la segunda mitad del barrido.

Sonda	Vidrio	Mediana (IQR) (nN)	Máximo de KDE (nN)	Rugosidad rms (nm)
JCB05(Insoluble)	Vidrio Liso	306(263-334)	319±11	0.6
	Vidrio tratado con KOH	354(310-417)	336±24	13.6
JCB06(Soluble)	Vidrio Liso	12(10-16)	10.3±0.3	0.6
	Vidrio Liso	62(37-95)	40±10	2.1
JCB11(Soluble)	Vidrio tratado con KOH	80(61-103)	73±4	13.6
	Vidrio Nanoestructurado	20(12-75)	14.4±0.3	9.4

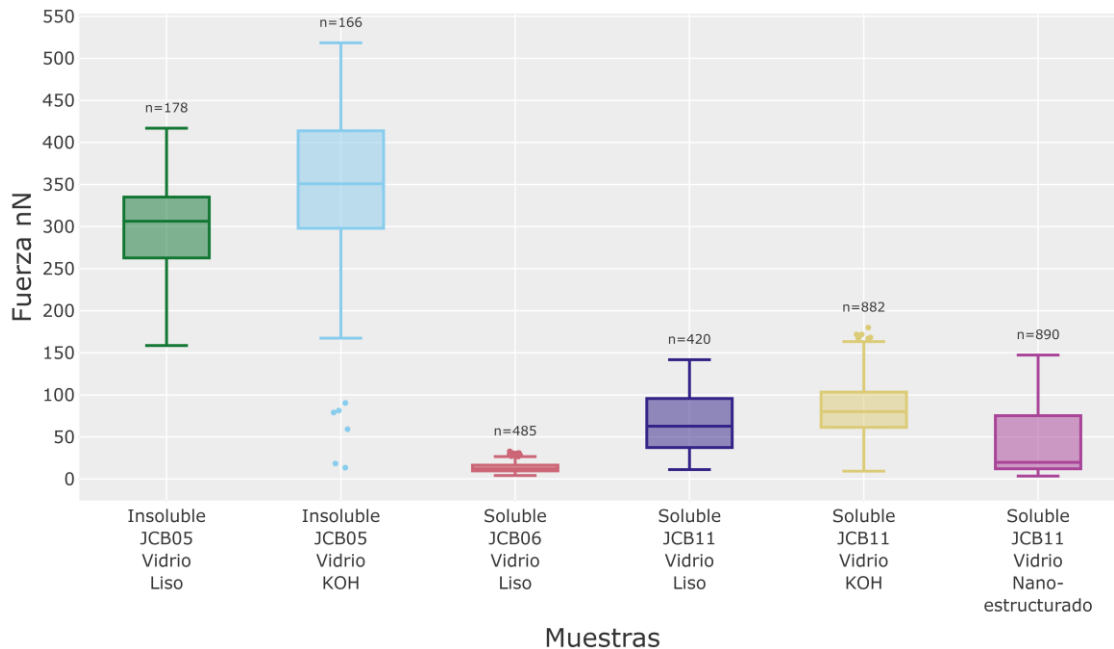


Figura 38 Diagrama de cajas y bigotes de las fuerzas medidas en con distintas sondas, la caja muestra el IQR de los datos y los bigotes el rango de los datos, considerando los mayores a $Q3+1.5IQR$ o menores a $Q1-1.5IQR$ como valores atípicos, los cuales son graficados como puntos.

5. Conclusiones

En este trabajo se investigó la adhesión de partículas de arena sobre vidrios con distintas morfologías superficiales, utilizando espectroscopía de fuerza mediante AFM con sondas coloidales fabricadas a partir de granos de arena reales recolectados en la PSDA. Se logró la fabricación de sondas utilizando tanto la fracción soluble como la insoluble de la arena, y se verificó su composición mediante espectroscopía de rayos X (EDX), corroborando los resultados reportados por Olivares *et al.* [3].

Los experimentos revelaron una disminución significativa de la fuerza de adhesión cuando se empleó una sonda de partícula soluble sobre una superficie de vidrio nanoestructurado, en comparación con vidrio liso. Esta reducción es coherente con lo reportado en la literatura, dado que la mayor rugosidad del vidrio nanoestructurado reduce el área efectiva de contacto. Sin embargo, los resultados obtenidos con la sonda insoluble, y en menor grado la sonda soluble, mostraron un comportamiento distinto: al interactuar con el vidrio tratado con KOH, la fuerza de adhesión aumentó a pesar de que esta superficie también presentaba una mayor rugosidad. Este incremento sugiere una posible intensificación de las fuerzas capilares provocadas por el tratamiento químico, un efecto que podría ser verificado realizando mediciones en condiciones controladas de humedad o directamente en un ambiente líquido, donde dichas fuerzas se eliminan.

En conjunto, los resultados obtenidos respaldan la viabilidad del método de nanoestructuración propuesto por Bravo *et al.* [4] como una estrategia efectiva para reducir

la adhesión de partículas y, por ende, mitigar el fenómeno de *soiling* en superficies de vidrio. Esto ofrece un camino prometedor hacia el desarrollo de recubrimientos pasivos y resistentes que podrían aplicarse en contextos como la protección de módulos fotovoltaicos en entornos áridos y polvorientos, especialmente para reducir la cementación causada por la deposición de partículas solubles.

6. Trabajo Futuro

Para consolidar los resultados obtenidos en esta tesis, es necesario profundizar en la caracterización de la adhesión de partículas mediante un conjunto más amplio de mediciones. En este sentido, se propone aumentar la cantidad de sondas utilizadas para ambas fracciones, tanto solubles como insolubles, así como incrementar el número de muestras de vidrio analizadas, con el objetivo de mejorar la robustez estadística y la representatividad de los datos. Además, se sugiere el uso de partículas modelo como esferas de silicio y esferas de yeso, como las usadas en Vargas *et al.* [105], que permitirían tener un estándar con el que comparar los demás resultados. Por otra parte, resulta relevante el determinar el rol de las fuerzas capilares en la fuerza de adhesión, para lo que se plantea realizar mediciones en medios líquidos, lo que eliminaría su influencia de las fuerzas, y también en ambientes con humedad ambiental controlada, lo que permitiría cuantificar su efecto. Finalmente, estas mediciones pueden ser complementadas con caracterizaciones macroscópicas de la adhesión o del ensuciamiento mediante el uso de cámaras ambientales [108], ensayos al aire libre [109] o pruebas mediante centrifugación [106].

7. Referencias

- [1] J. Son, S. Kundu, L.K. Verma, M. Sakhuja, A.J. Danner, C.S. Bhatia, H. Yang, A practical superhydrophilic self cleaning and antireflective surface for outdoor photovoltaic applications, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 98 (2012) 46–51. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.10.011>.
- [2] J.W. Leem, Y. Yeh, J.S. Yu, Enhanced transmittance and hydrophilicity of nanostructured glass substrates with antireflective properties using disordered gold nanopatterns, *Opt Express* 20 (2012) 4056. <https://doi.org/10.1364/OE.20.004056>.
- [3] D. Olivares, P. Ferrada, A. Marzo, J. Llanos, C. Miranda-Ostojic, V. del Campo, S. Bravo, E. Fuentealba, Microstructural analysis of the PV module cementation process at the Solar Platform of the Atacama Desert, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 227 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111109>.
- [4] L. Bravo, M. Ampuero, J. Correa-Puerta, T.P. Corrales, S. Flores, B. Schleyer, N. Hassan, P. Häberle, R. Henríquez, V. del Campo, Glass Surface Nanostructuring by Soft Lithography and Chemical Etching, *Nanomaterials* 14 (2024). <https://doi.org/10.3390/nano14211714>.
- [5] M.J. Alshareef, A Comprehensive Review of the Soiling Effects on PV Module Performance, *IEEE Access* 11 (2023) 134623–134651. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3337204>.
- [6] M. Yu, S. Chen, B. Zhang, D. Qiu, S. Cui, Why a Lotus-like Superhydrophobic Surface Is Self-Cleaning? An Explanation from Surface Force Measurements and Analysis, *Langmuir* 30 (2014) 13615–13621. <https://doi.org/10.1021/la5041272>.
- [7] R. Blossey, Self-cleaning surfaces — virtual realities, *Nat Mater* 2 (2003) 301–306. <https://doi.org/10.1038/nmat856>.
- [8] S. Comello, S. Reichelstein, A. Sahoo, The road ahead for solar PV power, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 92 (2018) 744–756. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.098>.
- [9] T. Sarver, A. Al-Qaraghuli, L.L. Kazmerski, A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22 (2013) 698–733. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065>.
- [10] J. Zhang, C. Zhou, Y. Tang, F. Zheng, M. Meng, C. Miao, Criteria for particles to be levitated and to move continuously on traveling-wave electric curtain for dust mitigation on solar panels, *Renew Energy* 119 (2018) 410–420. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.12.009>.
- [11] S. Toth, M. Muller, D.C. Miller, H. Moutinho, B. To, L. Micheli, J. Linger, C. Engtrakul, A. Einhorn, L. Simpson, Soiling and cleaning: Initial observations from 5-

- year photovoltaic glass coating durability study, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 185 (2018) 375–384. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.05.039>.
- [12] K. Ilse, L. Micheli, B.W. Figgis, K. Lange, D. Daßler, H. Hanifi, F. Wolfertstetter, V. Naumann, C. Hagendorf, R. Gottschalg, J. Bagdahn, Techno-Economic Assessment of Soiling Losses and Mitigation Strategies for Solar Power Generation, *Joule* 3 (2019) 2303–2321. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.08.019>.
- [13] R. Shenouda, M.S. Abd-Elhady, H.A. Kandil, A review of dust accumulation on PV panels in the MENA and the Far East regions, *Journal of Engineering and Applied Science* 69 (2022). <https://doi.org/10.1186/s44147-021-00052-6>.
- [14] A. Sayyah, M.N. Horenstein, M.K. Mazumder, Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels, *Solar Energy* 107 (2014) 576–604. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.030>.
- [15] S.C.S. Costa, A.S.A.C. Diniz, L.L. Kazmerski, Dust and soiling issues and impacts relating to solar energy systems: Literature review update for 2012-2015, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 63 (2016) 33–61. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.059>.
- [16] M. Mani, R. Pillai, Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>.
- [17] K.K. Ilse, B.W. Figgis, V. Naumann, C. Hagendorf, J. Bagdahn, Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 98 (2018) 239–254. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.015>.
- [18] B. Figgis, A. Ennaoui, S. Ahzi, Y. Rémond, Review of PV soiling particle mechanics in desert environments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76 (2017) 872–881. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.100>.
- [19] K.E. Noll, K.Y.P. Fang, Development of a dry deposition model for atmospheric coarse particles, *Atmospheric Environment* (1967) 23 (1989) 585–594. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(89\)90007-3](https://doi.org/10.1016/0004-6981(89)90007-3).
- [20] J.J. Lin, K.E. Noll, T.M. Holsen, Dry deposition velocities as a function of particle size in the ambient atmosphere, *Aerosol Science and Technology* 20 (1994) 239–252. <https://doi.org/10.1080/02786829408959680>.
- [21] O. Aluko, K.E. Noll, Deposition and suspension of large, airborne particles, *Aerosol Science and Technology* 40 (2006) 503–513. <https://doi.org/10.1080/02786820600664152>.
- [22] S.A. Biryukov, Degradation of optical properties of solar collectors due to the ambient dust deposition as a function of particle size, *J Aerosol Sci* 27 (1996). [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(96\)00091-2](https://doi.org/10.1016/0021-8502(96)00091-2).

- [23] B. Weber, A. Quiñones, R. Almanza, M.D. Duran, Performance reduction of PV systems by dust deposition, in: *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2014: pp. 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.013>.
- [24] D. Goossens, E. Van Kerschaever, AEOLIAN DUST DEPOSITION ON PHOTOVOLTAIC SOLAR CELLS: THE EFFECTS OF WIND VELOCITY AND AIRBORNE DUST CONCENTRATION ON CELL PERFORMANCE, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00028-6).
- [25] H. Qasem, T.R. Betts, H. Müllejans, H. Albusairi, R. Gottschalg, Dust-induced shading on photovoltaic modules, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 22 (2014) 218–226. <https://doi.org/10.1002/pip.2230>.
- [26] W. Javed, B. Guo, Y. Wubulikasimu, B.W. Figgis, Photovoltaic performance degradation due to soiling and characterization of the accumulated dust, in: *2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, IEEE, 2016: pp. 580–584. <https://doi.org/10.1109/ICPRE.2016.7871142>.
- [27] D. Olivares, M. Trigo-González, A. Marzo, P. Ferrada, J. Llanos, F. Araya, G. López, J. Polo, J. Alonso-Montesinos, C. Gueymard, Analysis of the local factors that influence the cementation of soil and effects on PV generation at the plataforma solar del desierto de atacama, Chile, in: *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2019*, International Solar Energy Society, 2020: pp. 1051–1060. <https://doi.org/10.18086/swc.2019.19.08>.
- [28] H. Lu, L. Lu, Y. Wang, Numerical investigation of dust pollution on a solar photovoltaic (PV) system mounted on an isolated building, *Appl Energy* 180 (2016) 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.030>.
- [29] C. Henry, J.-P. Minier, Progress in particle resuspension from rough surfaces by turbulent flows, *Prog Energy Combust Sci* 45 (2014) 1–53. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2014.06.001>.
- [30] E. Kim, Dry deposition of large, airborne particles onto a surrogate surface, *Atmos Environ* 34 (2000) 2387–2397. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00444-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00444-6).
- [31] B. Dahneke, The capture of aerosol particles by surfaces, *J Colloid Interface Sci* 37 (1971) 342–353. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(71\)90302-X](https://doi.org/10.1016/0021-9797(71)90302-X).
- [32] K. Tha Paw U, D.A. Braaten, New perspectives on rebound and reentrainment processes, *Aerosol Science and Technology* 23 (1995) 72–79. <https://doi.org/10.1080/02786829508965295>.
- [33] Y.L. Wu, A.G. Russell, Controlled wind tunnel experiments for particle bounceoff and resuspension, *Aerosol Science and Technology* 17 (1992) 245–262. <https://doi.org/10.1080/02786829208959574>.

- [34] G. Ziskind, M. Fichman, C. Gutfinger, Resuspension of particulates from surfaces to turbulent flows—Review and analysis, *J Aerosol Sci* 26 (1995) 613–644. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(94\)00139-P](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)00139-P).
- [35] C. Habchi, K. Ghali, N. Ghaddar, Coupling CFD and analytical modeling for investigation of monolayer particle resuspension by transient flows, *Build Environ* 105 (2016) 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.025>.
- [36] P. Winkler, Relative humidity and the adhesion of atmospheric particles to the plates of impactors, *J Aerosol Sci* 5 (1974) 235–240. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(74\)90058-5](https://doi.org/10.1016/0021-8502(74)90058-5).
- [37] W. Javed, Y. Wubulikasimu, B. Figgis, B. Guo, Characterization of dust accumulated on photovoltaic panels in Doha, Qatar, *Solar Energy* 142 (2017) 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.053>.
- [38] T. Lombardo, A. Ionescu, A. Chabas, R.A. Lefèvre, P. Ausset, Y. Candau, Dose-response function for the soiling of silica-soda-lime glass due to dry deposition, *Science of the Total Environment* 408 (2010) 976–984. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.040>.
- [39] P. Hülsmann, M. Heck, M. Köhl, Simulation of Water Vapor Ingress into PV-Modules under Different Climatic Conditions, *J Mater* 2013 (2013) 1–7. <https://doi.org/10.1155/2013/102691>.
- [40] K. Ilse, B. Figgis, M.Z. Khan, V. Naumann, C. Hagendorf, Dew as a Detrimental Influencing Factor for Soiling of PV Modules, *IEEE J Photovolt* 9 (2019) 287–294. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2882649>.
- [41] The Hutchinson World Weather Guide, 2006. www.helicon.co.uk.
- [42] E.F. Cuddihy, Theoretical considerations of soil retention, *Solar Energy Materials* 3 (1980) 21–33. [https://doi.org/10.1016/0165-1633\(80\)90047-7](https://doi.org/10.1016/0165-1633(80)90047-7).
- [43] K.K. Ilse, B.W. Figgis, M. Werner, V. Naumann, C. Hagendorf, H. Pöllmann, J. Bagdahn, Comprehensive analysis of soiling and cementation processes on PV modules in Qatar, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 186 (2018) 309–323. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.06.051>.
- [44] K. Ilse, M. Werner, V. Naumann, B.W. Figgis, C. Hagendorf, J. Bagdahn, Microstructural analysis of the cementation process during soiling on glass surfaces in arid and semi-arid climates, *Physica Status Solidi - Rapid Research Letters* 10 (2016) 525–529. <https://doi.org/10.1002/pssr.201600152>.
- [45] C.L. Perkins, M. Muller, L. Simpson, Laboratory Studies of Particle Cementation and PV module Soiling, in: 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), IEEE, 2017: pp. 2294–2297. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2017.8366622>.

- [46] M.C. Leaper, D.C. Prime, P.M. Taylor, V. Leach, Solid Bridge Formation Between Spray-Dried Sodium Carbonate Particles, *Drying Technology* 30 (2012) 1008–1013. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.682287>.
- [47] K.K. Ilse, J. Rabanal, L. Schönleber, M.Z. Khan, V. Naumann, C. Hagendorf, J. Bagdahn, Comparing indoor and outdoor soiling experiments for different glass coatings and microstructural analysis of particle caking processes, *IEEE J Photovolt* 8 (2018) 203–209. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2775439>.
- [48] I. Nayshevsky, Q. Xu, G. Barahman, A. Lyons, Anti-reflective and anti-soiling properties of a KleanBoost™, a superhydrophobic nano-textured coating for solar glass, in: 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), IEEE, 2017: pp. 2285–2290. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2017.8366777>.
- [49] J.G. Detry, M. Sindic, M.J. Servais, Y. Adriaensen, S. Derclaye, C. Deroanne, P.G. Rouxhet, Physico-chemical mechanisms governing the adherence of starch granules on materials with different hydrophobicities, *J Colloid Interface Sci* 355 (2011) 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.11.052>.
- [50] Z.R. Abrams, P. Gonsalves, B. Brophy, J. Posbic, Field and Lab Verification of Hydrophobic Anti-Reflective and Anti-Soiling Coatings on Photovoltaic Glass, in: European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. EU PVSEC, 2014: pp. 2759–2764. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20142014-5BV.1.50>.
- [51] J.N. D'Amour, J.J.R. Stålgren, K.K. Kanazawa, C.W. Frank, M. Rodahl, D. Johannsmann, Capillary aging of the contacts between glass spheres and a quartz resonator surface, *Phys Rev Lett* 96 (2006). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.058301>.
- [52] R. Kohli, K.L. Mittal, *Developments in Surface Contamination and Cleaning Particle Deposition, Control and Removal*, 2010.
- [53] Y.N. Chanchangi, A. Ghosh, S. Sundaram, T.K. Mallick, Dust and PV Performance in Nigeria: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 121 (2020) 109704. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109704>.
- [54] M.R. Maghami, H. Hizam, C. Gomes, M.A. Radzi, M.I. Rezaadad, S. Hajighorbani, Power loss due to soiling on solar panel: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59 (2016) 1307–1316. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.044>.
- [55] D. Beysens, Estimating dew yield worldwide from a few meteo data, *Atmos Res* 167 (2016) 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.018>.
- [56] I. Arabatzis, N. Todorova, I. Fasaki, C. Tsesmeli, A. Peppas, W.X. Li, Z. Zhao, Photocatalytic, self-cleaning, antireflective coating for photovoltaic panels: Characterization and monitoring in real conditions, *Solar Energy* 159 (2018) 251–259. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.088>.

- [57] A. Bake, N. Merah, A. Matin, M. Gondal, T. Qahtan, N. Abu-Dheir, Preparation of transparent and robust superhydrophobic surfaces for self-cleaning applications, *Prog Org Coat* 122 (2018) 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.05.018>.
- [58] D. Adak, S. Ghosh, P. Chakrabarty, A. Mondal, H. Saha, R. Mukherjee, R. Bhattacharyya, Self-cleaning V-TiO₂:SiO₂ thin-film coatings with enhanced transmission for solar glass cover and related applications, *Solar Energy* 155 (2017) 410–418. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.014>.
- [59] S. Bhaduri, M. Farkade, R. Bajhal, S. Mallick, N. Shiradkar, A. Kottantharayil, Abrasion resistance of spray coated anti-soiling coatings during waterless cleaning of PV modules, *Mater Today Commun* 35 (2023) 106168. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106168>.
- [60] M.Z. Khan, A. Ghaffar, M.A. Bahattab, M. Mirza, K. Lange, I.M.S. Abaalkheel, M.H.M. Alqahtani, A.A.A. Aldhuwaile, S.H. Alqahtani, H. Qasem, V. Naumann, C. Hagendorf, R. Gottschalg, K. Ilse, Outdoor performance of anti-soiling coatings in various climates of Saudi Arabia, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 235 (2022) 111470. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111470>.
- [61] M.I. Hossain, A. Ali, V. Bermudez Benito, B. Figgis, B. Aïssa, Anti-Soiling Coatings for Enhancement of PV Panel Performance in Desert Environment: A Critical Review and Market Overview, *Materials* 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15207139>.
- [62] J. Wang, K. Li, J. Zhang, J. Feng, Transparent and superhydrophobic FHA/SiO₂ coatings with obvious anti-soiling performance for photovoltaic modules, *Prog Org Coat* 183 (2023) 107679. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107679>.
- [63] A. Sayyah, D.R. Crowell, A. Raychowdhury, M.N. Horenstein, M.K. Mazumder, An experimental study on the characterization of electric charge in electrostatic dust removal, 2017. <http://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>.
- [64] B. Guo, W. Javed, C. Pett, C.-Y. Wu, J.R. Scheffe, Electrodynamics dust shield performance under simulated operating conditions for solar energy applications, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 185 (2018) 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.05.021>.
- [65] N.M. Kumar, K. Sudhakar, M. Samykano, S. Sukumaran, Dust cleaning robots (DCR) for BIPV and BAPV solar power plants-A conceptual framework and research challenges, *Procedia Comput Sci* 133 (2018) 746–754. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.123>.
- [66] N. Zainuddin, M.N. Abdullah, Development of Solar Panel Cleaning Robot for Residential Sector, *Evolution in Electrical and Electronic Engineering* 4 (2023) 606–614. <https://doi.org/10.30880/eeee.2023.04.01.073>.
- [67] B. Figgis, V. Bermudez, J. Lopez Garcia, PV module vibration by robotic cleaning, *Solar Energy* 250 (2023) 168–172. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.049>.

- [68] S.C.S. Costa, A.S.A.C. Diniz, L.L. Kazmerski, Solar energy dust and soiling R&D progress: Literature review update for 2016, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018) 2504–2536. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.015>.
- [69] K.A. Moharram, M.S. Abd-Elhady, H.A. Kandil, H. El-Sherif, Influence of cleaning using water and surfactants on the performance of photovoltaic panels, *Energy Convers Manag* 68 (2013) 266–272. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.01.022>.
- [70] Z. Song, J. Liu, H. Yang, Air pollution and soiling implications for solar photovoltaic power generation: A comprehensive review, *Appl Energy* 298 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117247>.
- [71] P. Borah, L. Micheli, N. Sarmah, Analysis of Soiling Loss in Photovoltaic Modules: A Review of the Impact of Atmospheric Parameters, Soil Properties, and Mitigation Approaches, *Sustainability* (Switzerland) 15 (2023). <https://doi.org/10.3390/su152416669>.
- [72] B. Figgis, A. Nouviaire, Y. Wubulikasimu, W. Javed, B. Guo, A. Ait-Mokhtar, R. Belarbi, S. Ahzi, Y. Rémond, A. Ennaoui, Investigation of factors affecting condensation on soiled PV modules, *Solar Energy* 159 (2018) 488–500. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.089>.
- [73] B. Thomas Young, M.D. For Sec, An essay on the cohesion of fluids, *Abstracts of the Papers Printed in the Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 1 (1832) 171–172. <https://doi.org/10.1098/rspl.1800.0095>.
- [74] X. Zhang, F. Shi, J. Niu, Y. Jiang, Z. Wang, Superhydrophobic surfaces: from structural control to functional application, *J. Mater. Chem.* 18 (2008) 621–633. <https://doi.org/10.1039/B711226B>.
- [75] X. Kang, Y. Li, X. Ma, H. Sun, Fabrication and characterization of high performance superhydrophobic organosilane-coated fly ash composites with novel micro–nano-hierarchy roughness, *J Mater Sci* 57 (2022) 13914–13927. <https://doi.org/10.1007/S10853-022-07473-5/FIGURES/7>.
- [76] T.P. Rasitha, C. Thinaharan, S.C. Vanithakumari, J. Philip, A simple approach for fabrication of superhydrophobic titanium surface with self-cleaning and bouncing properties, *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp* 636 (2022) 128110. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.128110>.
- [77] Z. Sun, T. Liao, K. Liu, L. Jiang, J.H. Kim, S.X. Dou, Robust superhydrophobicity of hierarchical ZnO hollow microspheres fabricated by two-step self-assembly, *Nano Res* 6 (2013) 726–735. <https://doi.org/10.1007/S12274-013-0350-6/METRICS>.
- [78] R. Blossey, Self-cleaning surfaces — virtual realities, *Nat Mater* 2 (2003) 301–306. <https://doi.org/10.1038/nmat856>.

- [79] H. Gao, Y. Jian, Y. Yan, The effects of bio-inspired micro/nano scale structures on anti-icing properties, *Soft Matter* 17 (2021) 447–466. <https://doi.org/10.1039/D0SM01683G>.
- [80] R.N. Wenzel, RESISTANCE OF SOLID SURFACES TO WETTING BY WATER, *Ind Eng Chem* 28 (1936) 988–994. <https://doi.org/10.1021/ie50320a024>.
- [81] A.B.D. Cassie, S. Baxter, Wettability of porous surfaces, *Transactions of the Faraday Society* 40 (1944) 546–551. <https://doi.org/10.1039/TF9444000546>.
- [82] S. Herminghaus, Roughness-induced non-wetting, *Europhysics Letters (EPL)* 52 (2000) 165–170. <https://doi.org/10.1209/epl/i2000-00418-8>.
- [83] W. Barthlott, C. Neinhuis, Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces, *Planta* 202 (1997) 1–8. <https://doi.org/10.1007/s004250050096>.
- [84] S.K. Sethi, G. Manik, Recent Progress in Super Hydrophobic/Hydrophilic Self-Cleaning Surfaces for Various Industrial Applications: A Review, *Polymer - Plastics Technology and Engineering* 57 (2018) 1932–1952. <https://doi.org/10.1080/03602559.2018.1447128>.
- [85] C. NEINHUIS, Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces, *Ann Bot* 79 (1997) 667–677. <https://doi.org/10.1006/anbo.1997.0400>.
- [86] S. Aramrak, M. Flury, J.B. Harsh, Detachment of Deposited Colloids by Advancing and Receding Air–Water Interfaces, *Langmuir* 27 (2011) 9985–9993. <https://doi.org/10.1021/la201840q>.
- [87] G.M. Burdick, N.S. Berman, S.P. Beaudoin, Hydrodynamic particle removal from surfaces, *Thin Solid Films* 488 (2005) 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.04.112>.
- [88] J.-S. Kwon, R. Thakur, S.T. Wereley, J.D. Schall, P.T. Mikulski, K.E. Ryan, P.L. Keating, M.T. Knippenberg, J.A. Harrison, T. Alan, G. Hwang, S. Régnier, M. Riesen, N. Vergara-Irigaray, S. Fatikow, D. Jasper, C. Dahmen, F. Krohs, V. Eichhorn, M. Weigel-Jech, B. Bhushan, M. Nosonovsky, Rose Petal Effect, *Encyclopedia of Nanotechnology* (2012) 2265–2272. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9751-4_157.
- [89] G. Meyer, N.M. Amer, Novel optical approach to atomic force microscopy, *Appl Phys Lett* 53 (1988) 1045–1047. <https://doi.org/10.1063/1.100061>.
- [90] S. Alexander, L. Hellemans, O. Marti, J. Schneir, V. Elings, P.K. Hansma, M. Longmire, J. Gurley, An atomic-resolution atomic-force microscope implemented using an optical lever, *J Appl Phys* 65 (1989) 164–167. <https://doi.org/10.1063/1.342563>.
- [91] H.J. Butt, B. Cappella, M. Kappl, Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications, *Surf Sci Rep* 59 (2005) 1–152. <https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2005.08.003>.

- [92] W.A. Ducker, T.J. Senden, R.M. Pashley, Direct measurement of colloidal forces using an atomic force microscope, *Nature* 1991 353:6341 353 (1991) 239–241. <https://doi.org/10.1038/353239a0>.
- [93] H. Rumpf, *Particle Technology*, (1990). <https://doi.org/10.1007/978-94-011-7944-7>.
- [94] Y.I. Rabinovich, J.J. Adler, A. Ata, R.K. Singh, B.M. Moudgil, Adhesion between nanoscale rough surfaces: II. Measurement and comparison with theory, *J Colloid Interface Sci* 232 (2000) 17–24. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.7168>.
- [95] Y.I. Rabinovich, J.J. Adler, A. Ata, R.K. Singh, B.M. Moudgil, Adhesion between nanoscale rough surfaces. I. Role of asperity geometry, *J Colloid Interface Sci* 232 (2000) 10–16. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.7167>.
- [96] E.R. Beach, G.W. Tormoen, J. Drelich, R. Han, Pull-off force measurements between rough surfaces by atomic force microscopy, *J Colloid Interface Sci* 247 (2002) 84–99. <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.8126>.
- [97] K. Cooper, N. Ohler, A. Gupta, S. Beaudoin, Analysis of Contact Interactions between a Rough Deformable Colloid and a Smooth Substrate, *J Colloid Interface Sci* 222 (2000) 63–74. <https://doi.org/10.1006/jcis.1999.6561>.
- [98] Langstreth Johnson. Kenneth, K. Kendall, A.D. Roberts, Surface energy and the contact of elastic solids, *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences* 324 (1971) 301–313. <https://doi.org/10.1098/rspa.1971.0141>.
- [99] D. Maugis, H.M. Pollock, Surface forces, deformation and adherence at metal microcontacts, *Acta Metallurgica* 32 (1984) 1323–1334. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(84\)90078-6](https://doi.org/10.1016/0001-6160(84)90078-6).
- [100] K. Cooper, A. Gupta, S. Beaudoin, Simulation of Particle Adhesion: Implications in Chemical Mechanical Polishing and Post Chemical Mechanical Polishing Cleaning, *J Electrochem Soc* 148 (2001) G662. <https://doi.org/10.1149/1.1409975>.
- [101] K. Cooper, A. Gupta, S. Beaudoin, Simulation of the Adhesion of Particles to Surfaces, *J Colloid Interface Sci* 234 (2001) 284–292. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.7276>.
- [102] W.B. Ma, C.L. Qi, Q. Liu, Y.H. Ding, W. Zhu, Adhesion force measurements between deep-sea soil particles and metals by in situ AFM, *Appl Clay Sci* 148 (2017) 118–122. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.08.011>.
- [103] R.J. Isaifan, D. Johnson, S. Mansour, A. Samara, W. Suwaileh, K. Kakosimos, Theoretical and Experimental Characterization of Efficient Anti-Dust Coatings under Desert Conditions, *Journal of Thin Films Research* 2 (2018) 25–29. <https://doi.org/10.30799/jtfr.013.18020101>.
- [104] M.G. Salvaggio, R. Passalacqua, S. Abate, S. Perathoner, G. Centi, Transparent Nanostructured Titania Coatings with Self-cleaning and Antireflective Properties for

Photovoltaic Glass Surfaces, *Chem Eng Trans* 43 (2015) 745–750.
<https://doi.org/10.3303/CET1543125>.

- [105] H.F. Varga, M.R. Wiesner, Effect of Dust Composition on the Reversibility of Photovoltaic Panel Soiling, *Environ Sci Technol* 55 (2021) 1984–1991.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06196>.
- [106] H.F. Varga, M.R. Wiesner, Relationship between Atomic Force Microscopy and Centrifugation Measurements for Dust Fractions Implicated in Solar Panel Soiling, *Environ Sci Technol* 56 (2022) 9604–9612. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00164>.
- [107] P. Hermanowicz, M. Sarna, K. Burda, H. Gabryś, AtomicJ: An open source software for analysis of force curves, *Review of Scientific Instruments* 85 (2014).
<https://doi.org/10.1063/1.4881683/355980>.
- [108] M.-Á. Muñoz-García, T. Fouris, E. Pilat, Analysis of the soiling effect under different conditions on different photovoltaic glasses and cells using an indoor soiling chamber, *Renew Energy* 163 (2021) 1560–1568. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.027>.
- [109] S. Arbaretaz, E. Pilat, H. Colin, E. Urrejola, Quantifying the Energy Impact of Soiling—Thanks to the Tool SoilRatio, *Solar RRL* 7 (2023).
<https://doi.org/10.1002/solr.202200601>.