

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**



**TÍTULO**

**AFECTACIÓN DE LAS CONDICIONES DE ESTABILIDAD  
ATMOSFÉRICA Y LA DEPOSICIÓN DE PARTÍCULAS DE  
POLVO EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN  
INGENIERÍA, PRESENTA  
ING. EDGAR DANIEL OBLEA ORTEGA**

**DIRECTOR DE TESIS  
DR. DAVID ENRIQUE FLORES JIMÉNEZ**

**CODIRECTOR DE TESIS  
DR. NÉSTOR SANTILLÁN SOTO**

**FECHA  
DICIEMBRE 2023**

Contenido	
Índice de figuras .....	4
Índice de tablas .....	5
Resumen .....	6
Capítulo 1. Preliminares .....	7
1.1 Introducción .....	7
1.2 Planteamiento del problema .....	11
1.3 Justificación .....	14
1.4 Antecedentes .....	15
1.5 Preguntas de investigación .....	18
1.6 Hipótesis .....	18
1.7 Objetivos .....	18
1.7.1 Objetivo general.....	18
1.7.2 Objetivos específicos .....	18
1.8 Alcance y limitaciones .....	18
Capítulo 2. Marco teórico .....	19
2.1 Clima y estabilidad atmosférica.....	19
2.2 Partículas de polvo y atmósfera .....	20
2.3 Sistemas fotovoltaicos .....	22
Capítulo 3. Metodología .....	24
3.1 Sitio de estudio.....	24
3.2 Periodos de estudio .....	25
3.3 Experimento .....	26
3.4 Captación de polvo .....	28
3.5 Adquisición de datos .....	30
3.6 Estabilidad atmosférica .....	33
3.7 Depuración de los datos .....	35
3.8 Modelo de regresión .....	35
Capítulo 4. Resultados .....	35
4.1 Estadística descriptiva aplicada a las variables de: polvo, sistemas fotovoltaicos y meteorológicas .....	35
4.2 Análisis de la relación estadística entre variables .....	44
4.3 Series de tiempo y estabilidad atmosférica.....	50

Capítulo 5. Discusión .....	54
5.1 Relación monótonica y correlación entre variables .....	54
5.2 Regresión lineal múltiple .....	55
5.3 Comparativa entre valores medidos y calculados .....	59
5.4 Comparativa de los resultados de estabilidad entre los métodos de Pasquill-Gifford y Monin-Obukhov .....	61
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.....	66
Referencias .....	69
Apéndice .....	74

## Índice de figuras

Figura 1. Balance de energía en la interfaz atmósfera-superficie terrestre .....	7
Figura 2. Dinámica de la radiación solar al entrar a la atmósfera.....	9
Figura 3. Curvas características del módulo fotovoltaico KC200GT bajo diferentes condiciones atmosféricas .....	10
Figura 4. Principales regiones del mundo generadoras de polvo.....	11
Figura 5. Mexicali, municipio de Baja California Norte y su ubicación en la República Mexicana.....	13
Figura 6. Distribución de las partículas de la atmósfera.....	22
Figura 7. Radiación solar incidente sobre el planeta Tierra .....	23
Figura 8. Instituto de Ingeniería de la UABC .....	25
Figura 9. Estructura y base de sujeción para los paneles fotovoltaicos. ....	27
Figura 10. Placa metálica para portaobjetos .....	28
Figura 11. Carta solar para Mexicali en un día de febrero .....	30
Figura 12. Diagrama de conexiones para el CR-3000 .....	31
Figura 13. Modelo 3D con los equipos instalados en la azotea del Instituto de Ingeniería, .....	32
Figura 15. Interfaz de usuario del programa para determinar la clasificación de la estabilidad atmosférica.....	34
Figura 16. Histogramas correspondientes a los datos de polvo, variables meteorológicas y variables del panel fotovoltaico. ....	39
Figura 17. Gráficas de caja y bigotes correspondientes a los datos de polvo, variables meteorológicas y variables de los paneles fotovoltaicos.....	42
Figura 18. Pruebas de normalidad para los datos de polvo (gráficas Cuantil-Cuantil) tanto para las variables meteorológicas y de los paneles fotovoltaicos. ....	44
Figura 19. Tabla de correlaciones con escala de colores (método de Spearman).45	
Figura 20. Matriz de dispersión (incluye todas las variables involucradas en el proyecto). ....	46
Figura 21. Matriz de correlaciones .....	46
Figura 22. Relaciones monotónicas .....	48
Figura 23. Relaciones monotónicas que incluyen a la potencia.....	49
Figura 24. Serie de tiempo de estabilidad atmosférica con el método de Pasquill-Gifford, potencia (panel sucio y panel limpio) y polvo. ....	50
Figura 25. Series de tiempo para las interacciones de mayor importancia. ....	53
Figura 26. Serie de tiempo: potencia medida vs potencia calculada a partir del modelo propuesto. Ecuación (2).....	59
Figura 27. Serie de tiempo: comparativa entre velocidad de viento de la estación meteorológica y velocidad de fricción.....	63
Figura 28. Serie de tiempo: comparativa entre flujo de calor sensible y radiación solar. ....	64
Figura 29. Serie de tiempo: comparativa entre temperatura y radiación solar. ....	65
Figura 30. Serie de tiempo: estabilidad atmosférica con el método de Monin-Obukhov,.....	66

## Índice de tablas

Tabla 1. Valores límite de las concentraciones de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en el aire .....	21
Tabla 2. Clasificación de Pasquill-Gifford para el periodo diurno .....	34
Tabla 3. Estadística básica por variable (periodo agosto-octubre y febrero).....	36
Tabla 4. Estadística básica por variable (incluye datos descartados). .....	37
Tabla 5. Coeficientes de correlación de Spearman.....	55
Tabla 6. Propuestas de modelos de regresión .....	57
Tabla 7. Comparativa entre ecuaciones de regresión múltiple.....	60
Tabla 8. Relación entre la clasificación de Pasquill-Gifford y los rangos de la inversa de la longitud de Monin-Obukhov.....	62
Tabla 9. Coeficientes de correlación (método de Pearson).....	62

## Resumen

Se sabe que una de las principales afectaciones en la generación de energía mediante paneles fotovoltaicos es el polvo, especialmente en lugares de clima árido debido a la escasez de precipitaciones. Esta acumulación de partículas afecta negativamente el rendimiento de los equipos, reduciendo su eficiencia y disminuyendo la generación de energía. Además de la falta de lluvia, se han identificado otras variables meteorológicas que también influyen en la acumulación de material particulado sobre los paneles, como la velocidad del viento, la radiación solar y la temperatura.

Conscientes de esta problemática, se llevó a cabo una investigación con el propósito de abordar estos desafíos. El objetivo principal fue analizar la disminución de la potencia eléctrica en paneles fotovoltaicos debido a la deposición de partículas de polvo y cómo se relaciona con los parámetros meteorológicos del sitio de estudio.

Hasta el momento, la literatura carece de estudios en el estado de Baja California que relacionen parámetros meteorológicos, especialmente aquellos vinculados a la estabilidad atmosférica, con los efectos de la acumulación de polvo en los paneles solares. Afortunadamente, se dispone de información de investigaciones previas en otros países sobre la contaminación y el potencial solar en zonas urbanas, lo que sirvió como marco teórico de referencia para este proyecto.

La metodología propuesta involucra la recopilación de datos provenientes de estaciones meteorológicas, paneles fotovoltaicos y material particulado. Posteriormente, se aplica el análisis de regresión lineal mediante software especializado para analizar relaciones entre estas variables. Los resultados primordiales documentan las variaciones en parámetros fotovoltaicos influenciados por las condiciones meteorológicas, la radiación de onda corta reflejada y la deposición de polvo a lo largo del estudio. Además, la herramienta que se elaboró para determinar la estabilidad atmosférica tiene potencial de registro ante INDAUTOR, respaldando la originalidad y relevancia del trabajo.

Entre los resultados obtenidos a partir de los modelos de regresión lineal, se identificó que, entre las variables de mayor influencia sobre la potencia del panel fotovoltaico se encuentran: la temperatura, el voltaje y la radiación de onda corta reflejada.

## Capítulo 1. Preliminares

### 1.1 Introducción

En el estudio de la radiación solar que incide sobre la capa de la atmósfera más cercana a la superficie terrestre (tropósfera), sólo una parte de su cantidad total logra incidir sobre ésta y atravesarla, esto es gracias a la atenuación entre las capas terrestre y la más externa de la atmósfera (exósfera) (Figura 1). En este proceso, una parte de la radiación se refleja directamente al espacio exterior, otra parte es absorbida por los gases presentes antes de alcanzar el suelo, parte de la radiación ultravioleta se absorbe en la atmósfera (estratósfera) y otra fracción se dispersa gracias a las nubes (Hersch et al., 1982) (Flohn & Penndorf, 1950).

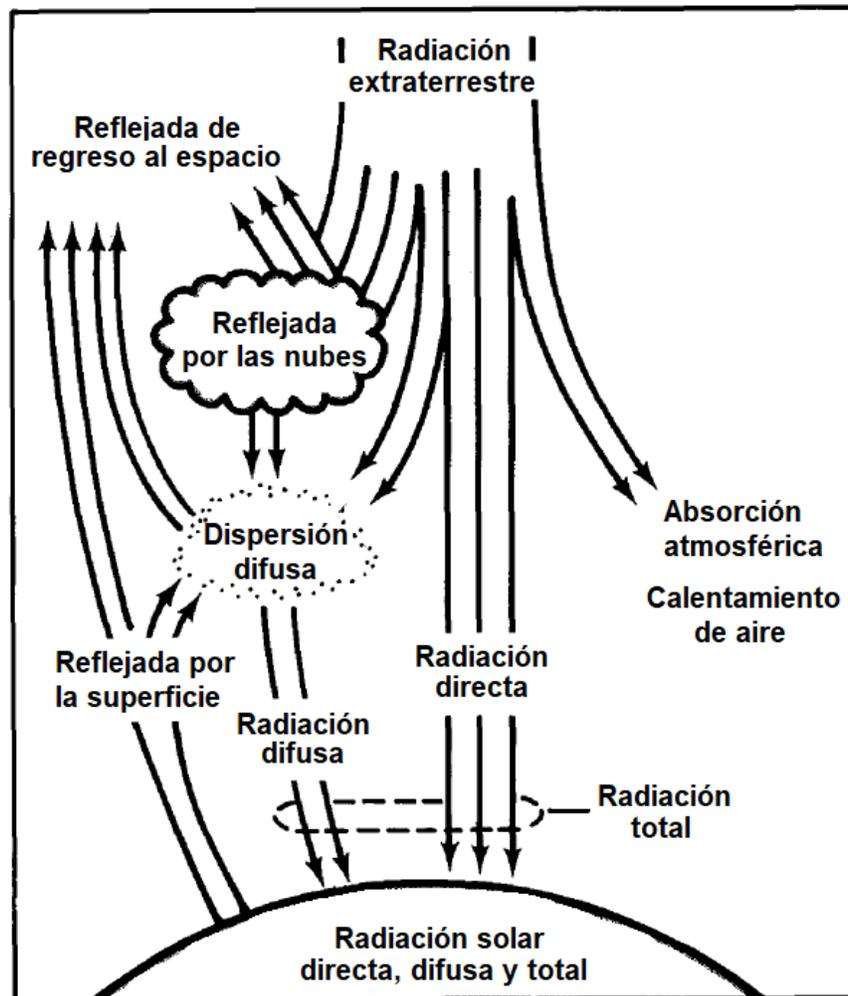


Figura 1. Balance de energía en la interfaz atmósfera-superficie terrestre. Visto en (Hersch et al., 1982). La radiación de onda larga (infrarrojo) se atribuye a la radiación difusa, por otra parte, la radiación de onda corta se asocia a la radiación directa.

La presencia de gases y partículas contaminantes en el aire contribuye en la atenuación o reducción de radiación solar que incide sobre los sistemas de generación de energía solar, por lo que el uso de dichos sistemas se traduce en menores niveles de emisión de contaminantes, los cuales contribuyen a la formación de lluvia ácida, smog urbano y problemas de salud. Tan solo en 2001, las fuentes de energía renovable evitaron la emisión de 70 millones de toneladas de carbón a la atmósfera (Bull, 2001).

La energía solar y las demás fuentes de energías renovables son aquellas que se generan a partir de procesos naturales a una tasa igual o mayor a la que se esté consumiendo. Se obtienen a partir de flujos energéticos continuos que ocurren en el entorno natural e incluyen fuentes tales como la biomasa, calor geotérmico, olas y mareas, potencial del agua, energía del viento, entre otros (Edenhofer et al., 2011).

El desarrollo de las energías renovables ha incrementado muy rápido en los últimos años. A pesar de aportar una generación de energía relativamente pequeña en comparación a las tecnologías fósiles, el crecimiento en sus aplicaciones ha sobrevivido a crisis económicas a nivel global (2009), tan solo la solar fotovoltaica incrementó su capacidad instalada en un 53% para el año 2010 (Edenhofer et al., 2011), mientras que para el 2011 creció un 74% (Ellabban et al., 2014). Para el año 2021 la capacidad instalada de energía solar a nivel mundial fue de 854,795 MW, es decir, cerca del 27.86% de la capacidad instalada de energías renovables (IRENA, 2022).

La radiación solar que incide sobre la atmósfera y superficie del planeta Tierra, en conjunto, favorecen un balance de energía anual, y ésta varía según la latitud, que al incrementarse tiende a reflejar o emitir al espacio mayor radiación que la que se recibe en dichas zonas del planeta. El efecto contrario ocurre a latitudes más bajas, es decir, que mientras más cerca al Ecuador, se recibe más energía a lo largo del año que la que se pierde. En la figura 2 se ilustra este fenómeno físico a lo largo del globo terráqueo. Del total de la energía solar anual que alcanza la atmósfera de la tierra, el 30% es reflejada hacia el espacio, 19% es absorbida por la atmósfera y las nubes y el 51% es absorbida en la superficie terrestre (Ahrens C. Donald, 2009).

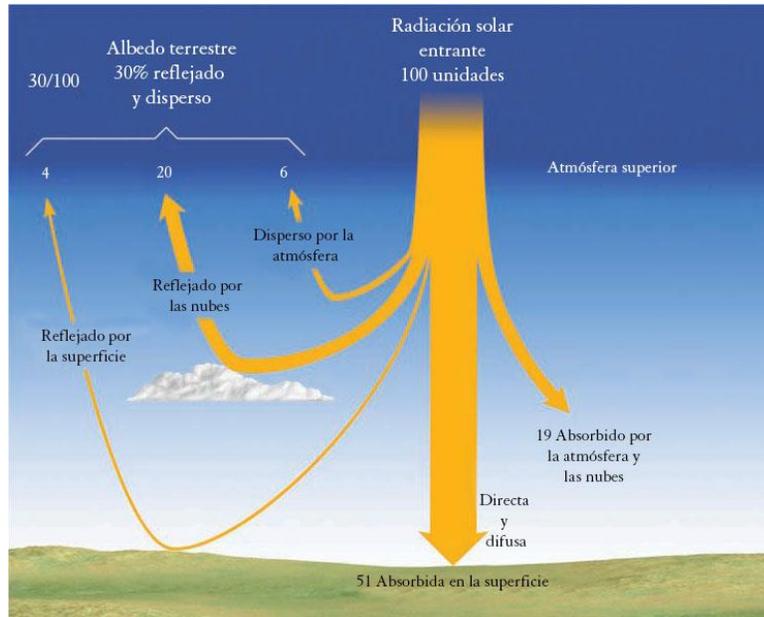


Figura 2. Dinámica de la radiación solar al entrar a la atmósfera. Tomado de "Meteorology today" (Ahrens C. D., 2009).

La energía solar constituye una fuente limpia e inagotable. Su conversión directa en electricidad se realiza a través de las celdas fotovoltaicas. Éstas se agrupan para formar los módulos fotovoltaicos, que a su vez se acomodan en serie y/o paralelo para formar arreglos fotovoltaicos, conformándose así los denominados generadores fotovoltaicos. Mediante ellos se aprovecha el efecto fotoeléctrico, a través de diferentes tecnologías como: materiales semiconductores de oblea, semiconductores de lámina delgada, materiales orgánicos o puntos de quantum. Cada tecnología presenta diferencias en la curva de potencia obtenida bajo determinadas condiciones climatológicas (Arias & Pérez, 2017).

La corriente de salida de un panel fotovoltaico se ve afectada directamente por la radiación solar que incide sobre la superficie del equipo, por su parte, el voltaje que el módulo fotovoltaico puede entregar se ve influenciado por la temperatura a la que se encuentra operando. En la figura 3 se muestran las curvas de funcionamiento para un módulo fotovoltaico en especial (modelo KC200GT) bajo diferentes condiciones de operación. A la izquierda se observan diferentes niveles de radiación solar y temperatura constante, mientras que en la gráfica de la derecha se presentan cambios en la temperatura manteniendo constante la radiación solar incidente.

Por practicidad, en la instalación, costos de adquisición y modularidad (debido a la capacidad de ser adaptados según las necesidades), la tecnología de los sistemas fotovoltaicos se ha convertido en una solución atractiva para cualquier región a nivel mundial; aún más en latitudes cercanas al Ecuador, en donde los niveles de radiación son relativamente constantes durante todo el año (Eraso et al., 2019).

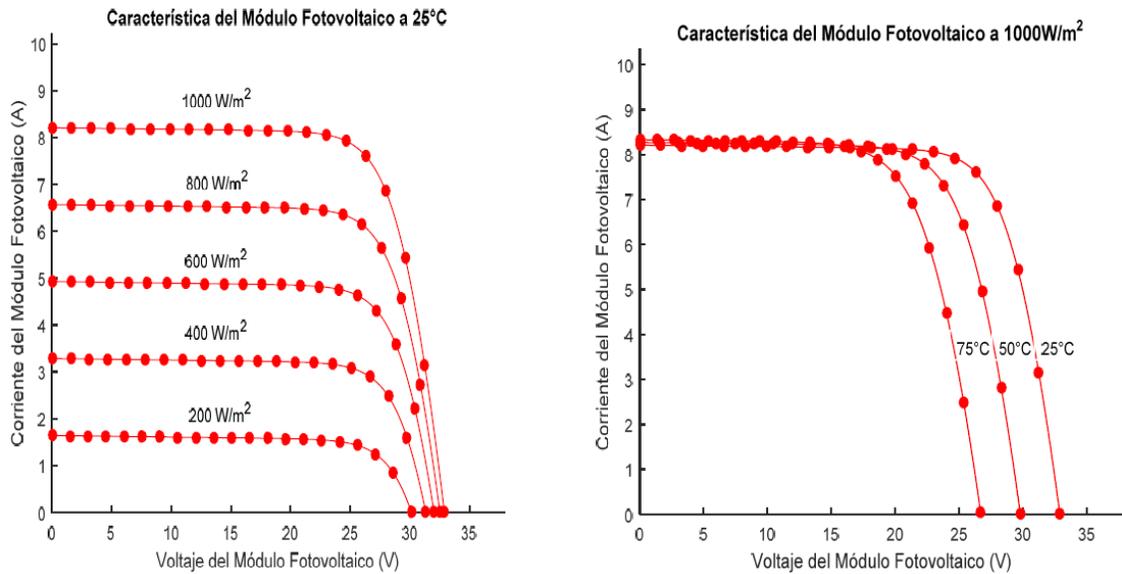


Figura 3. Curvas características del módulo fotovoltaico KC200GT bajo diferentes condiciones atmosféricas. Tomado de “Nueva metodología para determinar los parámetros de un módulo fotovoltaico” (Arias & Pérez, 2017).

Los paneles fotovoltaicos utilizados más comúnmente son los de celdas de silicio monocristalino, policristalinos, de película delgada y los de silicio amorfo (Eraso et al., 2019).

El deterioro en la eficiencia de los módulos fotovoltaicos es un fenómeno indeseado pues el costo de capital se considera alto debido a la vida útil de los equipos (de 25 años). Además, puede tomar entre 5 y 7 años para que los equipos generen la energía equivalente a la requerida para su fabricación (Gopal Nath & Swapnil Dubey, 2010).

Uno de los principales factores que favorecen la caída del rendimiento de los equipos fotovoltaicos es la acumulación de polvo sobre su superficie, especialmente en zonas áridas y desérticas del planeta, donde las precipitaciones son escasas (Sulaiman et al., 2014). Éstas son consideradas como las principales fuentes de polvo, partiendo de aquellas de mayor extensión como el oeste de África y Asia central hasta las más pequeñas como el desierto central de Australia; los de Sudamérica, el noroeste de México y parte de Estados Unidos se destacan entre estas fuentes gracias a sus desiertos. En la figura 4 se resaltan las principales regiones que aportan polvo a nivel global, así como las líneas que indican la dirección y trayectorias de su desplazamiento (Pye & Tsoar, 1987).

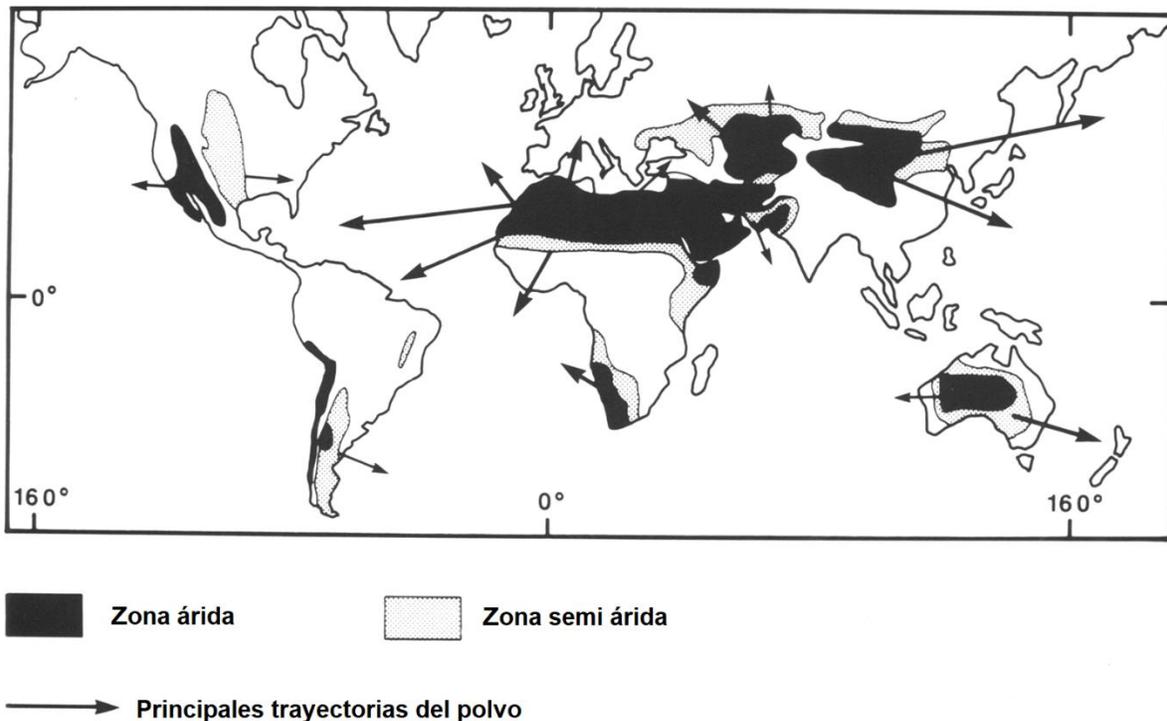


Figura 4. Principales regiones del mundo generadoras de polvo. Las flechas indican la dirección general de sus trayectorias. Visto en "The mechanics and geological implications of dust transport and deposition in deserts with particular reference to loess formation and dune sand diagenesis in the northern Negev, Israel. Pye K & Tsoa H (1987).

## 1.2 Planteamiento del problema

El estudio de la dinámica de la atmósfera se realiza considerando la relación entre diversos parámetros meteorológicos y su interacción con distintos elementos naturales y antropogénicos, tales como el relieve, uso de suelo y construcciones en zonas urbanas, entre otros. La tropósfera, capa de la atmósfera más cercana a la superficie que cuenta la mayor densidad de gases, contiene miles de especies químicas en forma de trazas (cualquier otro gas que se encuentre en concentraciones muy bajas y que representa menos del 1% de la mezcla) y puede ser considerada como un enorme contenedor que incluye tanto contaminantes gaseosos como en forma de material particulado.

Los procesos atmosféricos y la reactividad de los contaminantes, además del tamaño del material particulado, determinan su tiempo de residencia y sus efectos en los humanos, en otros seres vivos, en los ecosistemas y en materiales de construcción antropogénica (Seinfeld and Pandis 2006). El comportamiento de los contaminantes, específicamente polvo, se verá afectado por estas características, así como su adhesión a la superficie de los módulos fotovoltaicos.

Dentro de la dinámica de la atmósfera existen dos fenómenos conocidos como convección y advección, estos son interesantes especialmente porque influyen en

el movimiento de las masas de aire y en el campo de temperatura. La convección o turbulencia convectiva se relaciona con los cambios de temperatura y transferencia de energía de manera vertical en la atmósfera, por otra parte, a la advección o turbulencia mecánica se le asocian los movimientos horizontales de las masas de aire en ambos casos, las componentes de velocidad de viento juegan un papel muy importante (Ahrens C. Donald, 2009).

La dispersión de contaminantes, así como la de gases en la atmosfera se debe principalmente a las condiciones de dinámica del viento y procesos convectivos, los cuales favorecen respectivamente su transporte horizontal y vertical, resultado de la interacción entre las variables meteorológicas. Cuando se presentan por ejemplo condiciones estables con bajas o nula velocidad del viento, se alcanzan altas concentraciones de contaminantes en la atmósfera, por otra parte, cuando existen condiciones inestables (turbulencia) puede existir el transporte de material particulado y gases. (Thistle, 1996).

La variación en las condiciones de estabilidad atmosférica, que juega un papel importante en la dinámica de la atmósfera, ocurre cuando se presenta un desplazamiento de volumen de aire provocado por fuerzas externas que actúan sobre éste (p.ej. debido a su interacción con otras masas cercanas que tengan diferentes niveles de energía). Dicha estabilidad depende del perfil vertical de temperatura y la humedad, es decir, de la variación de ambos parámetros en dicha dirección. El aire caliente y húmedo tiene menor densidad que el aire más fresco y seco (con menos vapor de agua), por lo que se considera que las condiciones o variaciones verticales de su desplazamiento son más abruptas o inestables. Las categorías o clases de estabilidad en la atmosfera se relacionan con la mezcla y dispersión de contaminantes, que se ven afectados por las condiciones turbulentas y la formación de nubes (Ahrens C. Donald, 2009). Las partículas de polvo pueden depositarse sobre los paneles fotovoltaicos y reducir la eficiencia de operación de éstos en mayor o menor medida debido a los procesos atmosféricos mencionados.

La contaminación del aire se ve afectada por las características climáticas y topográficas del lugar que se desee estudiar (Jauregui, E. & Luyando, 1999). En la ciudad de México, las montañas reducen la ventilación y favorecen la inversión térmica (ocurre cuando la masa de aire más cercana a la superficie del suelo se encuentra a menor temperatura que la capa superior a ella), afectando los niveles de radiación solar que inciden sobre la superficie del suelo, y por ende reduciendo la energía disponible para su aprovechamiento mediante paneles fotovoltaicos.

En la ciudad de México la concentración en el aire de partículas suspendidas PM<sub>10</sub> (aquellas cuyo diámetro es inferior o igual a los 10 µm) es de aproximadamente 50 µg/m<sup>3</sup>. La acumulación de polvo en temporadas sin precipitación con periodos mayores a los 60 días, puede reducir la producción de energía de los sistemas fotovoltaicos hasta 15%. Se estima que, gracias a la precipitación natural, las

pérdidas de producción energética de los paneles fotovoltaicos son de 3.6% al año (Weber et al., 2014).

La ciudad de Mexicali, ubicada en Baja California, México es uno de los cinco municipios del estado, además de ser su capital (Figura 5). Es importante mencionar que se trata de una ciudad progresista, cuya actividad económica se ha visto en transición desde la actividad agrícola hacia la industrial. Actualmente destaca económicamente por su presencia agrícola, industrial y turística (Gobierno del Estado de Baja California & SEMARNAT, 2011). Se debe hacer énfasis en el sector industrial, debido a los contaminantes que son emitidos a la atmósfera, a causa de diversos procesos de fabricación. Para 2005, el sector industrial aportó con 3 toneladas al año de  $PM_{10}$  únicamente en la manufactura de materiales no metálicos a nivel estatal (PROAIRE, 2011).

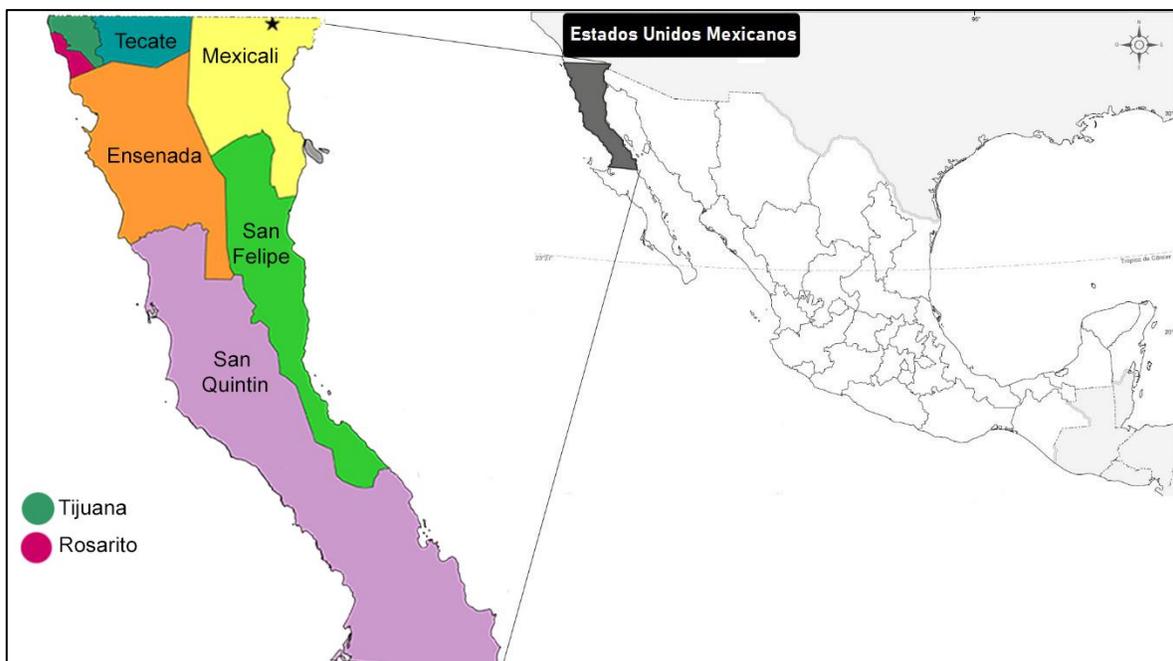


Figura 5. Mexicali, municipio de Baja California Norte y su ubicación en la República Mexicana. Fuente web de INEGI (2021).

Las condiciones meteorológicas de la ciudad de Mexicali comprenden, baja precipitación anual (inferior a los 72 mm), cielos claros y tiempo cálido (con una temperatura promedio anual entre 21°C y 23°C, aunque en verano la temperatura media máxima supera los 30°C) que predominan la mayor parte del año, esto debido al régimen casi estacionario de la celda de alta presión atmosférica que prevalece en la región. En invierno se alcanzan temperaturas medias mensuales de entre 11°C a 14°C. En general se observan grandes contrastes térmicos, pues se han registrado temperaturas tan altas como 54.3°C y tan bajas como -7°C (Gobierno del Estado de Baja California & SEMARNAT, 2011). Se sabe que la precipitación natural

ayuda con la limpieza de los paneles fotovoltaicos, desafortunadamente en Mexicali se presentan lluvias con muy poca frecuencia, y los procesos de inversión térmica generados en invierno tampoco favorecen buenas condiciones de calidad del aire que beneficien dichos sistemas.

La tasa de deposición del polvo y la frecuencia de ocurrencia de periodos sin lluvia son especialmente útiles para describir la pérdida de producción energética de los sistemas fotovoltaicos, algunos errores en las estimaciones pueden ser provocados por factores como la variación mensual de la irradiación solar (Weber et al., 2014).

En su investigación, Armendáriz López, Luna León y González Trevizo (2014) concluyeron que, para la ciudad de Mexicali la irradiancia anual corresponde a 2204.09 kWh/m<sup>2</sup> (valor obtenido considerando una orientación hacia el sur y una inclinación de 30°), con un promedio de 6.03 horas solares pico a lo largo del año. Para obtener estos resultados utilizaron el software TRNSYS como herramienta para evaluar el recurso solar en diversos puntos de la ciudad de Mexicali.

El principal contaminante que se ha considerado en la problemática de la calidad del aire de la ciudad de Mexicali son las partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Según el inventario de emisiones de contaminantes criterio 2005, en la ciudad se liberan cerca de 49 ton/año de PM<sub>10</sub>, de manera paralela se generan poco más de 7 ton/año de PM<sub>2.5</sub> (Gobierno del Estado de Baja California & SEMARNAT, 2011). Es importante recordar que existen más clasificaciones para el material particulado que se encuentra en la atmosfera y que se adhieren a la superficie de los paneles fotovoltaicos, sin embargo, sólo se han registrado este tipo de partículas de manera oficial debido a las afectaciones a la salud que pueden causar.

### 1.3 Justificación

Con base a la escasa información oficial y científica que se tiene en la región referentes a la deposición de polvo sobre paneles fotovoltaicos y la relación que existe entre este proceso y las condiciones meteorológicas que condicionan el comportamiento de la estabilidad atmosférica, se considera de gran interés llevar a cabo el proyecto de investigación para aportar a los conocimientos ya adquiridos, por un lado en el aprovechamiento de la energía solar, y por el otro, en la contaminación atmosférica y su relación con el primero.

En el estudio de Canales-Rodríguez et al (2014) se analiza la calidad del aire de la zona urbana y la zona rural de Mexicali, se concluye que dicha calidad no es satisfactoria. Encontraron que, para la temporada de invierno, el material orgánico es el principal elemento que compone las PM<sub>10</sub> con un 54.52% (debido a la quema y los residuos orgánicos), mientras que para el verano se constituye del 75.48% con material geológico, es decir, polvo de la región.

La acumulación de polvo es uno de los principales problemas que interfieren en el correcto funcionamiento de los paneles solares y como en Mexicali existen pocos periodos de precipitación anual debido a las condiciones climáticas de la región, esto se traduce en poca limpieza natural de los equipos fotovoltaicos.

Las principales fuentes emisoras que generan polvo en Baja California son: caminos pavimentados (4,182 ton/año), caminos sin pavimentar (38,402.8 ton/año), actividades de construcción residencial (15.2 ton/año) e industrial/comercial (107.6 ton/año) y quema de campos agrícolas (1,448 ton/año) (Gobierno del Estado de Baja California & SEMARNAT, 2011). La acumulación de material particulado puede ser provocado por el incremento en la concentración de partículas suspendidas en el aire durante el transporte aéreo de éstas por acción del viento. La variabilidad en sus velocidades se puede traducir en una mayor o menor deposición de polvo (Goossens & Van Kerschaever, 1999).

Mediante este proyecto se busca recopilar datos de deposición de polvo en la superficie del panel fotovoltaico, así como datos meteorológicos y energéticos para analizar posteriormente su relación estadística con ayuda de software especializado (R Software) y métodos de clasificación de la estabilidad atmosférica (Pasquill-Gifford). También se determinará la relación que existe entre estos parámetros con el fin de investigar cómo la producción energética de los paneles fotovoltaicos se ve afectada por la adherencia del material particulado sobre los módulos fotovoltaicos. Todo esto de manera sistemática y dándole un seguimiento del adecuado funcionamiento de los equipos.

#### 1.4 Antecedentes

Estudios han demostrado que la entrega de potencia de paneles fotovoltaicos puede verse afectada hasta en un 60% en aquellos lugares con altos niveles de contaminación atmosférica, especialmente material particulado (polvo), el cual se define como aquellas partículas de material sólido con tamaños inferiores a los 500  $\mu\text{m}$ , las cuales pueden presentarse en el ambiente por distintas fuentes emisoras, tales como sitios en construcción, industrias y tormentas de arena (Hussain et al., 2017). Lo anterior ocurre cuando no se realiza limpieza de los equipos con regularidad (Ghazi & Ip, 2014).

Sanaz Ghazi y Kenneth Ip (2014) realizaron análisis del rendimiento de dos instalaciones fotovoltaicas con distintas condiciones ambientales en la ciudad de Brighton (Inglaterra), una de ellas en el exterior mientras que la otra operaba en un ambiente interior. Los resultados de las pruebas realizadas en el interior indicaron que la más mínima cantidad de polvo acumulado reduce la transmitancia de la luz hasta un 11%. Para el análisis estadístico de regresión, los parámetros meteorológicos que tuvieron más efectos significativos en la eficiencia de los equipos fotovoltaicos fueron la alta humedad (vapor de agua), la lluvia y la nieve.

Athar Hussain, Ankit Batra y Rupendra Pachauri (2017) aseguran que la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos puede verse altamente afectada por factores tanto internos como externos, pues cualquier tipo de cambio en el clima genera fluctuaciones en la radiación solar y en la temperatura ambiente. En su trabajo, se estudiaron y analizaron diferentes muestras de polvo y condiciones de operación, y se realizaron pruebas con arena y polvo de ladrillo.

Se sabe que el grado de deterioro en la eficiencia fotovoltaica depende de la masa específica y tamaño de las partículas de polvo depositadas sobre la superficie del panel solar. Conforme la cantidad de masa depositada aumenta, la salida de potencia y la eficiencia del módulo para generar energía, disminuyen. Además, mientras más pequeñas son las partículas, la entrega de potencia se ve aún más reducida debido a que cubren y reflejan más la radiación de onda corta que incide sobre la superficie de dichos módulos fotovoltaicos (Hussain et al., 2017).

Investigadores (Darwish et al., 2013) realizaron análisis de desempeño en módulos fotovoltaicos, donde se infiere que la pérdida diaria de energía a causa del polvo depositado a lo largo de un año es de aproximadamente 4.4%, y hasta 20% con periodos largos sin lluvia. Los parámetros que se consideraron son la humedad, la temperatura y la velocidad del viento.

Mani y Pillai (2010) indican que el polvo es un factor que influye de manera significativa en el desempeño de una instalación fotovoltaica. Mediante una regresión no lineal, identificaron que la reducción en la transmitancia (es decir, el porcentaje de luz visible incidente transmitida directamente a través del vidrio) depende de la densidad del polvo depositado en conjunto con el ángulo de inclinación del módulo y la orientación de la superficie con respecto a la dirección de los vientos dominantes (Hussain et al., 2017).

Los investigadores Kaldellis y Kokala (2010) determinaron la influencia del polvo sobre paneles fotovoltaicos mediante un estudio realizado en Atenas, Grecia y consideraron sus efectos como una condición característica del sitio. Posteriormente, los investigadores Said y Walwil (2014) encontraron que la reducción de la transmitancia espectral fue de alrededor del 35% y la transmitancia en general se reducía alrededor de un 20%.

Algunos investigadores estudiaron la influencia de suciedad acumulada en el desempeño de módulos fotovoltaicos y analizaron los efectos de las partículas en los mismos mediante pruebas de laboratorio en un entorno controlado de Malasia (Sulaiman et al., 2014). En dicho estudio se indica que la resistencia externa provocada por el polvo acumulado puede reducir el rendimiento del módulo fotovoltaico hasta un 86%, además se concluye que el agua de lluvia no afecta de manera significativa al desempeño de los paneles.

De acuerdo con Hussain et al. (2017), durante periodos de medición de seis meses, se ha probado que la potencia cae hasta en un 50% a causa de la acumulación de

polvo. El rendimiento de un colector solar cae de manera progresiva según se acumula el polvo en la superficie de éste. Se realizaron pruebas con módulos fotovoltaicos ubicados en azoteas de la ciudad de Karachi (Pakistán) durante ciertos periodos de tiempo y se estimaron las diferentes densidades de polvo depositado, así como el desempeño económico y el rendimiento energético. Reportaron que las pérdidas de energía de las celdas solares se relacionan con la absorción y la reflexión de los rayos solares y ésta ronda entre el 15% y el 30%. Una característica muy particular de las partículas de polvo acumuladas era su forma esférica.

En lugares desérticos, la acumulación de polvo sobre la superficie de los paneles fotovoltaicos es muy alta y se sabe que la reducción en la eficiencia de aprovechamiento solar es de aproximadamente 40%. Es por ello que se emplean métodos de limpieza en estos sitios de clima árido. (Kumar & Chaurasia, 2014).

En su investigación Jáuregui, E. y Luyando (1999), utilizaron modelos de regresión para analizar los datos medidos por tres estaciones de radiación solar con distintas ubicaciones en la ciudad de México (zona suburbana de Tacubaya, zona urbana en la escuela de Minas y la zona rural en plan de Texcoco), donde encontraron que, en la zona urbana, (que presenta mayor contaminación del aire) se registraron menores niveles de radiación solar, en promedio 21.6% menos energía solar disponible en los días despejados en comparación con la zona rural. En las temporadas de lluvia se presentó una reducción muy similar correspondiente a 22.6% que puede ser provocado por condiciones de alta humedad.

Canales Rodríguez et al (2014), encontraron que las especies dominantes que componen a las  $PM_{10}$  en la ciudad de Mexicali, Baja California, son el material geológico y el carbón orgánico en las temporadas de verano e invierno, respectivamente. Además, concluyeron que durante el verano la zona que presenta la mayor parte de la contaminación del aire es la urbana, mientras que en el invierno es la rural. A su vez, se excedió el límite de las concentraciones de contaminantes del aire establecido en la NOM-025-SSA en repetidas ocasiones. Cabe mencionar que Mexicali ocupa uno de los primeros lugares de contaminación por  $PM_{10}$  en el país junto con la zona metropolitana del Valle de México.

La importancia de conocer los antecedentes mencionados, prestando especial atención en: 1) el potencial de energía solar que se presenta en la ciudad de Mexicali; 2) las condiciones óptimas para tratar de aprovecharlo mediante paneles fotovoltaicos; y 3) la información referente a los principales contaminantes que están presentes en el aire, de la zona tanto urbana como rural, y que llegan a afectar la conversión energética; fundamenta la importancia de llevar a cabo estudios que relacionen estos conceptos, partiendo del hecho de que no se han realizado investigaciones de esta índole que apliquen al área de estudio.

## 1.5 Preguntas de investigación

- a) ¿Qué tanta afectación provoca la variación de polvo depositado en los paneles fotovoltaicos sobre el cambio en su potencia generada en una zona específica de la ciudad de Mexicali?
- b) ¿De qué manera influyen las condiciones de estabilidad atmosférica en la deposición de partículas de polvo sobre los sistemas fotovoltaicos?
- c) ¿Es factible construir un modelo de regresión lineal múltiple que, bajo determinadas condiciones de estabilidad atmosférica, relacione la capacidad de aprovechamiento energético de los paneles fotovoltaicos con parámetros meteorológicos a distintos niveles de polvo depositado en los mismos?

## 1.6 Hipótesis

En un sistema fotovoltaico, la cuantificación de las partículas de polvo depositadas en éste y las condiciones meteorológicas del sitio de estudio, bajo distintas clases de estabilidad atmosférica, permitirá construir un modelo de regresión lineal a partir del cual se puede conocer su capacidad de aprovechamiento energético.

## 1.7 Objetivos

### 1.7.1 Objetivo general

Investigar la afectación de las condiciones de estabilidad atmosférica y la deposición de partículas de polvo sobre la capacidad de aprovechamiento energético de un sistema fotovoltaico en una zona urbana específica de la ciudad de Mexicali, B.C.

### 1.7.2 Objetivos específicos

- Cuantificar la cantidad de masa diaria de partículas de polvo que se depositan en una superficie representativa de un sistema fotovoltaico.
- Estimar las clases de estabilidad atmosférica durante las campañas de medición, utilizando el método de Pasquill-Gifford.
- Cuantificar las variaciones de los parámetros radiativos de onda corta reflejada por el panel fotovoltaico y condiciones meteorológicas circundantes.
- Cuantificar las variaciones de los parámetros eléctricos de salida de los paneles solares durante el periodo de estudio.
- Construir un modelo de regresión lineal que permita estimar la potencia de salida del panel, en función de las demás variables involucradas.

## 1.8 Alcance y limitaciones

La investigación estará delimitada a analizar las condiciones de estabilidad atmosférica en una zona urbana específica de Mexicali y determinar cómo influyen en la acumulación de polvo sobre un sistema fotovoltaico durante las campañas de estudio. Lo anterior se realizará a través de modelos de regresión lineal múltiple asociados a las variables involucradas, tales como muestras de polvo y datos

eléctricos de salida del panel solar, utilizando sistemas de captación de datos y estaciones meteorológicas, y aplicando el método de Pasquill-Gifford para la clasificación de la estabilidad de la atmosfera in situ.

Con respecto a los datos de la cantidad de polvo que se deposita sobre los paneles fotovoltaicos, se presenta el inconveniente en la frecuencia con la que se realizan dichos registros, pues la captura no automatizada de material particulado sobre los paneles y la generación de una base de datos de manera manual y periódica provoca una discontinuidad entre los datos. Por otro lado, el estudio no es representativo de toda la ciudad de Mexicali, sino de una zona urbana específica localizada en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC).

## Capítulo 2. Marco teórico

### 2.1 Clima y estabilidad atmosférica

La fisicoquímica de la atmósfera, entre otras cosas se encarga del estudio de los procesos atmosféricos que llevan, en periodos cortos o extensos, a la ocurrencia de variaciones en las concentraciones de contaminantes en el aire y cuáles son sus efectos sobre el entorno natural y antropogénico. Dichos contaminantes se clasifican en tres categorías: material particulado suspendido, contaminantes gaseosos (gases y vapor) y olores. Dentro del material particulado se encuentran reguladas, a nivel internacional, nacional y local, las  $PM_{10}$ , cuyo diámetro medio es menor o igual a  $10\ \mu m$ , y las  $PM_{2.5}$ , de diámetro medio inferior o igual a  $2.5\ \mu m$  (Oliver, 2005).

Cuando se aborda el tema de estabilidad atmosférica en estudios de dispersión de contaminantes o masas de aire, es para analizar el estado de turbulencia mecánica y convectiva de la atmosfera o para describir el movimiento en el aire de concentraciones de gases o partículas. Dos de los métodos más utilizados para catalogar este proceso son el de Pasquill-Gifford y el de Monin-Obukhov. El primero propone la clasificación de la estabilidad en seis categorías: A (muy inestable), B (moderadamente inestable), C (ligeramente inestable), D (neutral), E (moderadamente estable), F (extremadamente estable). Existe una sexta categoría G que considera condiciones estables con poco viento durante el periodo nocturno (Mohan & Siddiqui, 1998).

Cerca de la superficie se suele analizar la turbulencia cinemática con el método de Monin-Obukhov partiendo de la Teoría de Similaridad (Similarity Theory) (Szep et al., 2017). Aquí es donde la longitud de Monin-Obukhov juega un papel muy importante, se trata de una medida de longitud  $L$  (en metros) que expresa la combinación de los procesos de la turbulencia atmosférica que se llevan a cabo en la parte más baja de la atmósfera (a no más de  $100\ m$  de altura), también se le

conoce como altura del substrato de la turbulencia mecánica. La inversa de dicho parámetro se puede asociar a las clases de estabilidad atmosférica identificadas por Pasquill-Gifford.

Otro método para determinar las condiciones de estabilidad atmosférica es el de Richardson que hace uso tanto de la temperatura y velocidad de viento, como de la longitud de Monin-Obukhov para relacionarlos con la clasificación de Pasquill-Gifford (Mohan & Siddiqui, 1998). El método de Pasquill-Gifford sigue aplicándose hoy en día debido a la versatilidad de su clasificación por letras que representa los distintos tipos de estabilidad en la atmósfera.

En condiciones normales, dentro de la tropósfera, la temperatura del aire disminuye a mayor altitud. Existe un fenómeno denominado inversión térmica, el cual consiste en lo opuesto a este comportamiento normal, y se caracteriza por un incremento en la temperatura a mayor altura dentro de un rango vertical. Existen dos categorías según el tipo de inversión térmica, aquella sobre la superficie del suelo y aquella que se encuentra en una capa más alta, en la atmósfera libre, es decir, aquella zona donde el movimiento de las masas de aire ya no es afectado por las características de la superficie. Las inversiones térmicas se llevan a cabo en condiciones de alta presión atmosférica, además de verse fuertemente influenciadas por la topografía (Czarnecka & Nidzgorska-Lencewicz, 2017).

En estudios recientes se ha vinculado la ocurrencia de las inversiones de temperatura con efectos a la salud, esto debido a su relación con la mala dispersión de los contaminantes. (Gramsch et al., 2014). Esta condición climática ayuda a confinar a los gases y partículas en un volumen que se ve reducido debido a su mayor proximidad con la superficie terrestre, favoreciendo el aumento en las concentraciones de éstos, incluso por encima de los estándares de las normativas oficiales. Czarnecka et al (2017) señalan que esto se atribuye a la estratificación o división estable de la atmósfera, la cual limita significativamente el movimiento vertical del viento.

## 2.2 Partículas de polvo y atmósfera

Se habla de material particulado (PM, por sus siglas en inglés) cuando se hace referencia a aquellas partículas que comprenden diámetros entre los 2 nm y los 100  $\mu\text{m}$  y que pueden contener cientos de compuestos mezclados. Su presencia en el aire puede ser provocada por la emisión directa o por formación (física y/o química) en la atmósfera a partir de moléculas con una muy baja presión de vapor (Russell & Brunekreef, 2009).

Las partículas  $\text{PM}_{10}$  pueden quedar retenidas en las vías respiratorias produciendo efectos nocivos a nivel del sistema respiratorio; también pueden contener material biológico como polen, esporas, virus o bacterias o provenir de la combustión incompleta de combustibles fósiles. Partículas más pequeñas como las  $\text{PM}_{2,5}$  son

más perjudiciales para la salud de las personas al tener la capacidad de pasar al torrente sanguíneo y están formadas primordialmente por material proveniente de procesos de combustión. (Remaggi & Jiménez, 2019)

De acuerdo con el Programa de Gestión para mejorar la Calidad del Aire del Estado de Baja California, al año son emitidas 212,551 Mg y 38,511 Mg de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, respectivamente, donde las fuentes naturales erosivas son las de mayor aportación (168,509 Mg de PM<sub>10</sub> y 25,276 Mg de PM<sub>2.5</sub>), seguido de las fuentes de área (39,078 Mg de PM<sub>10</sub> y 9,237 Mg de PM<sub>2.5</sub>), mientras que las fuentes fijas alcanzan la tercera posición (con 2,209 Mg de PM<sub>10</sub> y 2,048 Mg de PM<sub>2.5</sub>) (Arturo et al., 2018).

En México existen Normas Oficiales (NOM's) que establecen los niveles máximos que se consideran permitidos para evitar daños en la salud pública, estos deben ser atendidos por cada entidad federativa y dependen del tipo de material particulado, sus niveles de concentración y del tiempo de exposición de las personas a dichos contaminantes. Según la NOM-025-SSA1-2021 (Secretaría de salud, 2021), los límites que se establecen mientras esté en vigor, son los que se presentan en la Tabla 1:

Contaminante	Concentración	Año 1	Año 3	Año 5
PM <sub>10</sub>	Anual	36 µg/m <sup>3</sup>	28 µg/m <sup>3</sup>	20 µg/m <sup>3</sup>
	24 h	70 µg/m <sup>3</sup>	60 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>
PM <sub>2.5</sub>	Anual	10 µg/m <sup>3</sup>	10 µg/m <sup>3</sup>	10 µg/m <sup>3</sup>
	4 h	41 µg/m <sup>3</sup>	33 µg/m <sup>3</sup>	25 µg/m <sup>3</sup>

Grantz et al. (2003) indica que cuando se trata de material particulado no se debe considerar solo un contaminante, ya que se trata de una mezcla heterogénea (formada por distintos elementos), y es precisamente esta heterogeneidad la que está presente tanto en partículas individuales de un lugar en específico como en muestras de diferentes sitios.

Al ser el material particulado una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos (Figura 6), se favorece su heterogeneidad y justifica el por qué se busca la reducción de su concentración en la atmósfera y la identificación de sus fuentes emisoras, lo cual constituye una tarea compleja, ya que éstas son generadas durante distintos procesos naturales y antropogénicos. (Perrino et al., 2008).

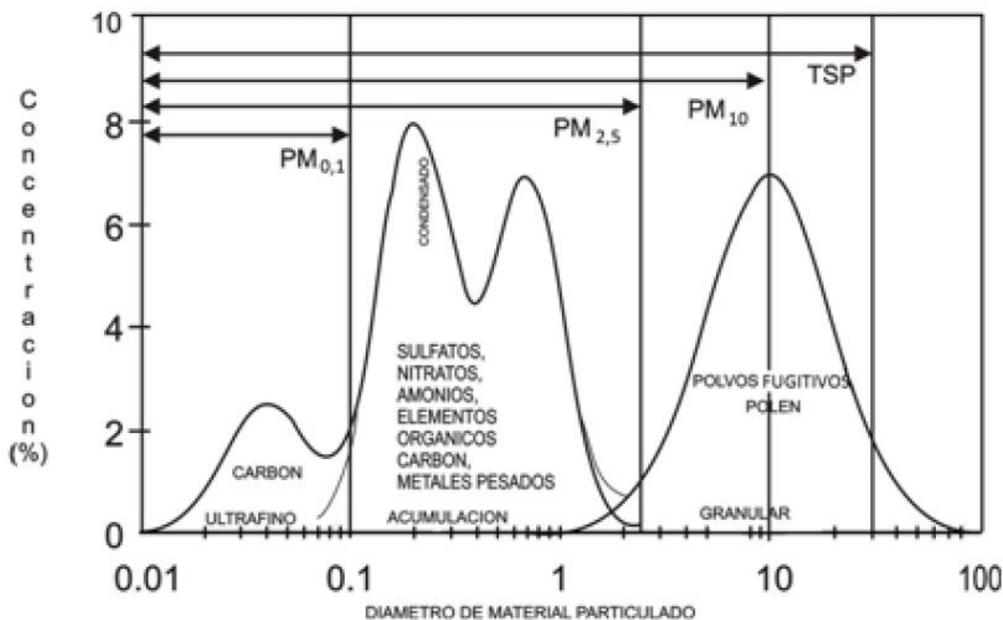


Figura 6. Distribución de las partículas de la atmósfera. Visto en Arciniégas, 2012

### 2.3 Sistemas fotovoltaicos

La radiación solar que incide a la superficie de la Tierra a través de la atmósfera puede ser clasificada en radiación directa (aquella que se propaga a lo largo de una línea imaginaria continua entre el sol y la superficie de la Tierra) y radiación difusa (aquella que se dispersa a causa de los aerosoles, polvo y moléculas suspendidas y no tiene una sola dirección) (Figura 7). El total de la radiación solar incidente se obtiene mediante la suma de ambos tipos y se conoce como radiación global (Gopal Nath & Swapnil Dubey, 2010).

Existen dispositivos para medir la radiación solar sobre la superficie de la Tierra, el pirheliómetro, por ejemplo, se coloca siempre orientado directamente hacia el sol, pues mide la radiación directa. Por otra parte, el piranómetro se encarga de las mediciones de la radiación solar global sobre una superficie plana, tiene la capacidad de leer datos en un rango de 180° con respecto al suelo. Una tercera herramienta es el “piranómetro con aro de sombra”, este equipo resta a la radiación global la que corresponde a la directa, pues la evita gracias al aro de sombra (Gopal Nath & Swapnil Dubey, 2010).

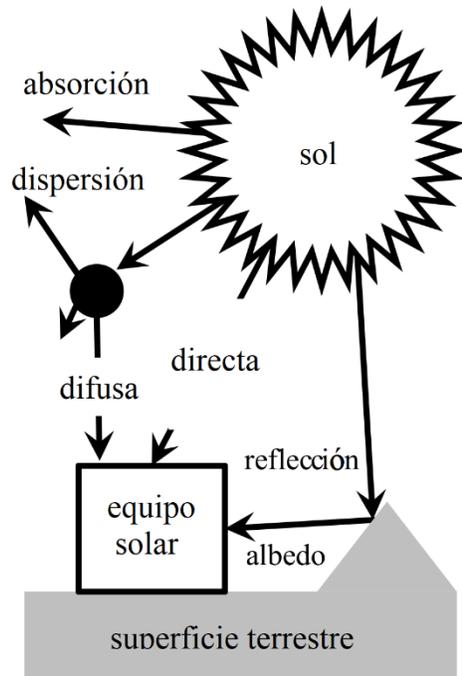


Figura 7. Radiación solar incidente sobre el planeta Tierra. Visto en "Solar Energy: an introduction", (Mackay, 2015).

Una celda fotovoltaica es un dispositivo que convierte la energía solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. La energía solar se transmite en forma de radiación electromagnética, alcanzando la atmósfera terrestre, a esto se le conoce como el espectro electromagnético y engloba un conjunto de radiaciones desde  $0.15 \mu\text{m}$  a  $4 \mu\text{m}$  (Adler et al., 2013). La luz solar está compuesta por fotones, estos contienen energía según su longitud de onda, cuando éstos alcanzan la superficie del panel fotovoltaico pueden ser reflejados, o absorbidos, e incluso pasar a través de ella. Los fotones absorbidos transfieren su energía a un electrón en un átomo del material semiconductor de las celdas y gracias a esto el electrón puede moverse de su posición original para seguir el flujo del circuito eléctrico convirtiéndose en corriente (Cook et al., 1990).

La radiación solar que incide sobre un plano inclinado tiene unidades de flujo de energía por unidad de área ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) y se puede separar en 2 componentes, la de onda corta, es decir, aquella que tiene una longitud de onda entre  $280\text{nm}$  y  $2800 \text{nm}$  (y que representa cerca del 85% de la energía que incide) y la de onda larga, es decir, aquella cuya longitud de onda presenta valores entre  $2800 \text{nm}$  y  $100,000 \text{nm}$  (Klassen & Bugbee, 2005).

El primer módulo de silicio diseñado para uso en exterior se fabricó en el Laboratorio Bell en 1955, justo después de la demostración de las primeras celdas de silicio con eficiencia razonable en 1954. La era moderna del desarrollo de módulos fotovoltaicos comenzó a mediados de 1970, con los programas patrocinados por

Estados Unidos y el creciente interés en el uso de la fotovoltaica para el área de telecomunicaciones particularmente en Australia (Green, 2005).

Debido al crecimiento en las aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos como fuentes suministradoras de energía a distintas latitudes del planeta, se considera de vital importancia conocer los efectos causados por el material particulado y por parámetros meteorológicos tales como la humedad, la velocidad de viento y la temperatura. Como se comentó previamente, el polvo repercute en qué tanto se puede aprovechar la radiación solar que incide sobre las celdas y por lo tanto en la energía que se puede suministrar a algún sistema que lo requiera (Darwish et al., 2013).

Existen diversas técnicas y métodos para la limpieza de los paneles fotovoltaicos, entre ellas se encuentra la limpieza mecánica (que puede ser manual o automatizada con ayuda de robots), el método de cortina eléctrica (previene la adherencia de material particulado gracias a ondas eléctricas), el uso de superficies antiadherentes y finalmente en regiones donde ocurre la precipitación de manera regular. El efecto de la lluvia sobre los equipos, de manera natural ha mostrado ser más que suficiente para mantenerlos limpios (Al-Housani et al., 2019).

## Capítulo 3. Metodología

### 3.1 Sitio de estudio

El municipio de Mexicali es la capital del estado de Baja California, presenta una densidad de población de 72.3 habitantes por km<sup>2</sup> y una población total de 1,049,792 habitantes (INEGI, 2020). La ciudad se encuentra al noroeste del Valle de Mexicali, en frontera con Estados Unidos, cuya ciudad vecina es Calexico, California; sus coordenadas son 32° 39' de latitud norte y 115° 28' de longitud oeste.

El clima predominante es seco y cálido, con temperaturas extremas mínimas y máximas tanto en invierno como en verano respectivamente. El contraste o diferencial térmico entre las temporadas de verano e invierno es grande, pues se han registrado temperaturas desde los -7 °C hasta los 54.3 °C (Gobierno del Estado de Baja California & SEMARNAT, 2011).

El Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (Figura 8) se tomó como punto de ubicación del trabajo experimental a realizar debido a la disponibilidad del equipo requerido y a que se ubica dentro de la zona urbana de Mexicali, al noroeste de la ciudad. Sobre la azotea del edificio se designó un área para colocar los equipos de medición, tomando como base un proyecto dirigido por el Dr. Néstor Santillán (Santillán-Soto et al., 2015). En dicha investigación se utilizaron sensores radiométricos de cuatro componentes NR01 para analizar el comportamiento de algunos materiales de uso común dentro de la zona urbana de la ciudad ante la variabilidad de la radiación en sus distintas componentes. Cabe

resaltar que, mediante el uso de dichos dispositivos, se obtuvieron resultados representativos del área de estudio.



Figura 8. Instituto de Ingeniería de la UABC, se encuentra ubicado sobre el Boulevard Benito Juárez y calle de la Normal, en la colonia Insurgentes Este.

Con respecto a las características del área donde se instalaron los equipos, se trata de una zona que está expuesta directamente a las condiciones meteorológicas locales, se encuentra aproximadamente a unos 10 metros con respecto al nivel del suelo, la azotea se encuentra cubierta con una superficie impermeabilizante y cuenta con aislamiento térmico bajo dicha capa. En los alrededores del Instituto se encuentran algunos árboles, principalmente en los laterales del edificio, así como construcciones aledañas. Se realizó el análisis de sombreado tridimensional mediante SketchUp (esto es dibujando en su ubicación geográfica las edificaciones tanto del Instituto de Ingeniería como de los alrededores, así como árboles u otros objetos de gran altura) para identificar si estos elementos afectarían al experimento, se concluyó a partir de la observación que los elementos involucrados no comprometerían las mediciones sobre los equipos fotovoltaicos.

### 3.2 Periodos de estudio

Se pretende abarcar las estaciones de verano e invierno debido a sus características contrastantes.

Para determinar el tamaño de la muestra, asociada a la cantidad de veces que se captará polvo, se utiliza la fórmula de Torres et al. (2006):

$$n = \frac{Z^2 \cdot N \cdot p \cdot q}{e^2(N - 1) + Z^2 \cdot p \cdot q} \quad (1)$$

Donde “Z” corresponde a un valor a partir del nivel de confianza (se tomó el 95% de nivel de confianza, por lo tanto, “Z” es 1.645), “N” se refiere al tamaño de la población, el parámetro “p” se asocia a la probabilidad de que ocurra el evento, mientras que a “q” se le atribuye la probabilidad de que no ocurra el evento y al error permisible se le denomina como “e”.

Con base en la ecuación 1, se determinó que en la campaña se tomarán muestras de polvo y se realizarán mediciones durante 55 días, sin considerar los fines de semana, vacaciones y días feriados debido a la reducción de actividades económicas en los alrededores del área de estudio (y, por ende, menor tráfico o actividades que involucren movilidad y transporte). Este criterio se tomó a partir de la investigación de Perrino et. al (2008), en su documento se indica que las mayores concentraciones de material particulado se encontraron en las zonas aledañas a la estación de monitoreo del área urbana, debido a que se presentaba mayor actividad de vehículos a combustión interna, esto debido principalmente a las grandes cantidades de carbono emitidas por los medios de transporte de lunes a viernes.

### 3.3 Experimento

Se facilitaron dos paneles fotovoltaicos por parte del CEENER (Centro de Estudios de las Energías Renovables) de la marca Solartec, cada uno es de tipo monocristalino con 72 celdas y una potencia máxima de 300 W. Entre los parámetros que el fabricante establece se encuentran: sus dimensiones 1956 mm x 992 mm x 45 mm, el voltaje de circuito abierto  $V_{oc} = 44.6V$ , el voltaje en su punto de máxima potencia  $V_{mpp} = 36.5 V$ , la corriente de corto circuito  $I_{sc} = 8.74 A$ , la corriente en su máximo punto de potencia  $I_{mpp} = 8.21 A$ , y la eficiencia del módulo  $\eta_{módulo} = 15.46\%$ . Estos datos se tomaron de la ficha técnica ubicada en la parte posterior de los equipos.

Para la elaboración de la estructura que sostiene los paneles fotovoltaicos se optó por un marco metálico hecho con ángulo de 1 ½ de pulgada, esto para cada módulo, posteriormente se unieron uno al lado del otro mediante soldadura. Seguido de la elaboración del marco se soldaron soportes para sujetar y unir la estructura de los módulos fotovoltaicos hacia una base fuera de uso, pero bien cimentada. Se detallaron y removieron los excedentes y los fillos de la estructura y se pintó para evitar la corrosión (Figura 9).



Figura 9. Estructura y base de sujeción para los paneles fotovoltaicos. A la izquierda se observa la estructura, a la derecha se muestra a los paneles ya instalados sobre la misma.

Al instalar los equipos fotovoltaicos, éstos se ajustaron a las condiciones normales de operación en la ciudad de Mexicali, por lo que se posicionaron con una orientación hacia el sur, de tal forma que reciben radiación solar a lo largo de todo el año, sobre todo durante el periodo de verano, cuando el sol se encuentra a una altura solar mayor, esto porque su inclinación se fijó a  $32^\circ$  que corresponde a la latitud de la zona geográfica (Gopal Nath & Swapnil Dubey, 2010).

El movimiento aparente del sol con respecto a la Tierra se puede entender como la trayectoria que sigue el sol sobre la circunferencia de un disco que corta a la Tierra de manera transversal a diferentes ángulos, según la estación del año. Tal y como se ilustra en el libro “*Solar Tracking*” (Prinsloo & Dobson, 2015), las diferentes trayectorias que puede tomar el sol conllevan diferentes alturas solares máximas que este cuerpo celeste puede alcanzar con respecto a la horizontal. En verano, la altura solar es mayor que en el invierno, y por ende los días son más largos debido a una mayor distancia recorrida por el sol para alcanzar dicha altura solar (ver “*Altura solar*” en Apéndice).

Se sabe que la inclinación de los paneles fotovoltaicos repercute, además, en la cantidad de polvo que puede depositarse sobre el equipo. A mayor ángulo de inclinación con respecto al suelo menor será la cantidad de material particulado que

se depositará sobre el mismo (Said & Walwil, 2014). La inclinación a la que se fijó el experimento corresponde con la latitud del lugar, es decir  $32^{\circ}$ , de esta manera se igualan las condiciones operativas de los equipos instalados en viviendas de la ciudad, haciéndolo más representativo del sitio de estudio.

Para determinar la influencia del polvo sobre la superficie de los paneles a lo largo del periodo de análisis es importante tener un punto de comparativa, para ello es necesario mantener limpio uno de los módulos, mientras que el otro quedará a merced de las condiciones de calidad del aire y a su vez, ambos de las condiciones meteorológicas, lo anterior tomando como base el trabajo realizado por Paudyal & Shakya (2016).

La limpieza del panel fotovoltaico de referencia se realizará de manera diaria antes de la recolección de la información (toma de portaobjetos, medición de parámetros fotovoltaicos, etc.) para así reducir la cantidad de polvo acumulado sobre este al mínimo. Para esta actividad se utilizará agua del grifo y un trapo de microfibra, debido a la ubicación del proyecto es difícil llevar agua hasta los equipos de manera convencional, por lo que se utilizará una bomba manual para presurizar el agua y rociarla sobre la superficie de éstos.

### 3.4 Captación de polvo

Para cuantificar la cantidad de polvo que se deposita sobre los paneles fotovoltaicos se utilizan portaobjetos de cristal a la misma altura e inclinación de éstos, lo que permite representar la superficie de afectación (figura 10). Dichos portaobjetos se apilan uno sobre otro en una plancha de metal y se fijan al costado del marco del panel que no se limpiará. Ambos paneles se encuentran a la misma inclinación. Esta técnica de muestreo de material particulado permitirá relacionar a la potencia del panel fotovoltaico sucio con la cantidad de polvo que se deposite sobre el mismo.

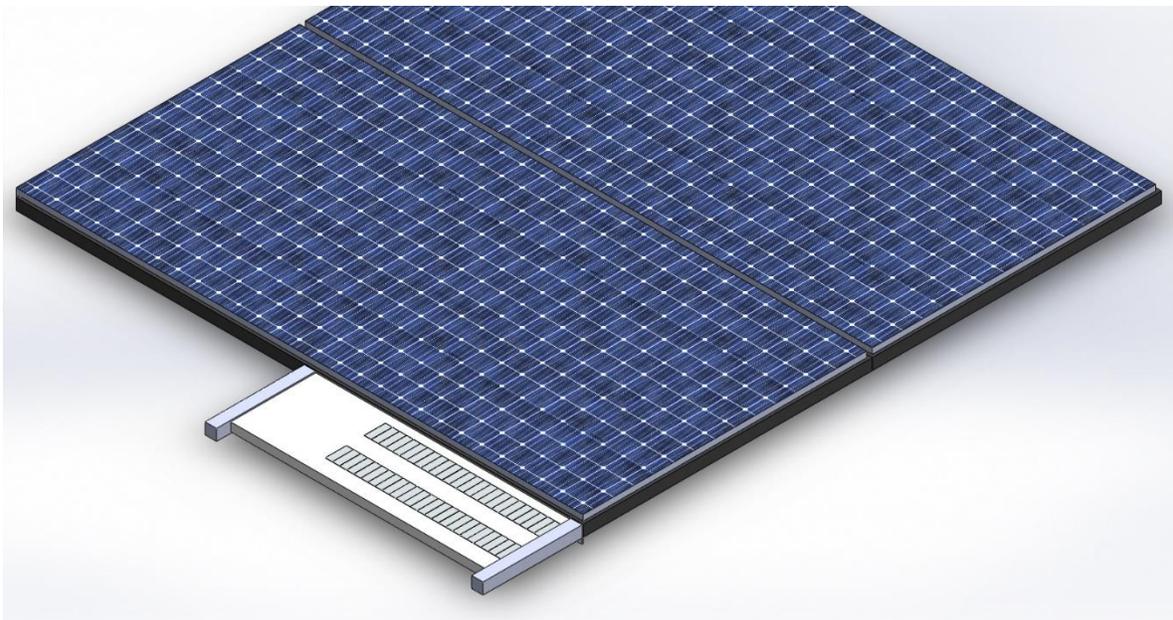


Figura 10. Placa metálica para portaobjetos (color blanco) colocada junto al panel solar que no se limpiará, modelada con ayuda de SolidWorks.

Es importante mencionar que se consiguió la colaboración de la Dra. Jesús Eliana Rodríguez Burgueño, quien proporcionó acceso al laboratorio del área de Ciencias de la Tierra, así como disponibilidad de los equipos de secado, balanza analítica y algunos utensilios para el transporte y manejo de los portaobjetos con el apoyo y asesoría de la Ing. Luz Estela Salazar Escalante.

La dinámica para trabajar con las muestras se llevará a cabo de la siguiente forma:

Una vez retirada la laminilla que sujetará los portaobjetos sobre la placa metálica, se colocará un segundo portaobjeto sobre aquel que contiene la muestra de polvo con el propósito de evitar la pérdida de material particulado y se transportará hasta el laboratorio para su secado y remoción de humedad. Para esto se tendrá que calentar previamente el horno de secado con por lo menos dos horas de anticipación. Posteriormente se dejará secar la muestra durante 24 horas a temperatura constante de 100 °C.

Para determinar la cantidad de polvo acumulado se pesará cada portaobjeto por separado en distintas fases o etapas, las cuales son: 1) justo antes de colocarlo sobre la placa metálica junto al panel sucio; 2) una vez que se haya completado el proceso de deposición de polvo, y su transporte al laboratorio, se pesará con el polvo acumulado antes de meterlo al horno; y 3) posterior a su secado se pesará nuevamente el portaobjetos con el polvo acumulado y sin humedad, para ser comparado con el peso obtenido en la etapa 2. La diferencia corresponderá a la cantidad de polvo (en gramos) depositado y será posible identificar la cantidad de humedad que se retiró de los mismos.

Para la generación de energía a partir de paneles solares se busca que la radiación solar que incide sobre la superficie de éstos sea la mayor cantidad durante el mayor tiempo posible, así, se esperaría que la potencia de salida sea la máxima posible, por ello, es importante considerar tanto la altura solar como la hora solar. En este proyecto se realizó la recolección de la información (polvo acumulado, parámetros fotovoltaicos y meteorológicos) alrededor de las 12:30 pm, que está dentro del rango horario al cual se presenta la altura solar máxima promedio del periodo de estudio, es decir, entre 12:00 pm y 13:00 pm (Figura 11).

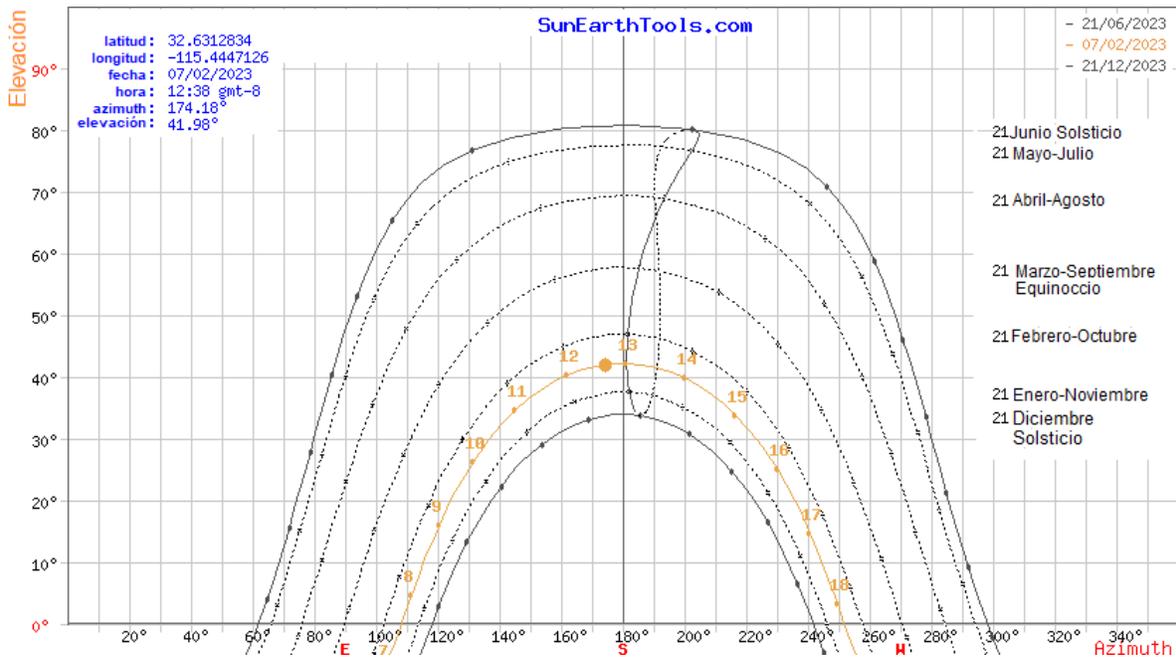


Figura 11. Carta solar para Mexicali en un día de febrero. El mes de febrero presenta una de las alturas más bajas, contrario al mes de junio.

### 3.5 Adquisición de datos

Para almacenar los datos medidos por los sensores que toman mediciones continuas, se utiliza un conjunto de equipos especializados conectados a cada uno, los cuales se ubicaron en la parte posterior de los paneles fotovoltaicos, pues existe una superficie plana y segura para resguardarlos, entre ellos se encuentran los siguientes:

- CR-3000. Es el data logger encargado de registrar los datos asociados a los sensores radiométricos NR-01 (Campbell Scientific, 2018). Entre las variables que se almacenan están la radiación (de entrada y salida) de onda corta ( $W/m^2$ ) y de onda larga ( $W/m^2$ ) y la temperatura ( $^{\circ}C$ ).
- PV-Analyzer. Para guardar los parámetros de voltaje (V) y corriente (A) que entregan los paneles fotovoltaicos es necesario contar con un dispositivo capaz de dar lectura a esta información, dicho equipo fue proporcionado por el laboratorio del CEENER (Centro de Estudios de las Energías Renovables) brindó acceso al equipo.
- Suministro eléctrico. El adquisidor de datos se alimentará mediante una batería de 12 V, la cual será recargada con un mini panel fotovoltaico de 16 V y gracias a un controlador de carga (Chanduvi Palacios, 2019), en el cual se ajustará el estado de carga de la batería; además, dicho controlador tiene

la capacidad de cortar el suministro de energía según el nivel requerido por la batería.

- Estacion Davis Vantage Pro II (Davis Instruments, 2014). Con ella se obtendrán los parámetros meteorológicos, tales como la velocidad del viento (m/s), la temperatura ambiente (°C), la humedad relativa (%) y la radiación solar ( $W/m^2$ ), cuya información será almacenada en su correspondiente data logger.

En la figura 12 se muestra un esquema que representa las interconexiones entre el adquisidor de datos CR-3000 y los sensores NR01, en este se especifica a que pin de conexión del adquisidor corresponde cada cable de los sensores radiométricos. De la misma forma se muestra la conexión necesaria para conectar sensores de temperatura “PT-100” de ser necesario medir la del panel solar. Así mismo, se muestran los arreglos para conectar dos paneles fotovoltaicos; cabe mencionar que en un principio se planteó utilizar un solo adquisidor de datos para registrar todas las variables, incluyendo el voltaje y la corriente, pero debido a la potencia a disipar de los equipos resultó conveniente extraer sus datos de salida por separado de los demás sensores. En la figura 13 se observa una representación 3D modelada a escala real en Sketch Up sobre la ubicación geográfica correspondiente a la zona de estudio, dicho modelo se utilizó para visualizar el análisis de sombreado sobre los equipos. En la figura 14 se presentan imágenes de los equipos que se utilizaron para la recolección de datos meteorológicos, radiación de onda corta, fotovoltaicos y el pesaje de polvo.

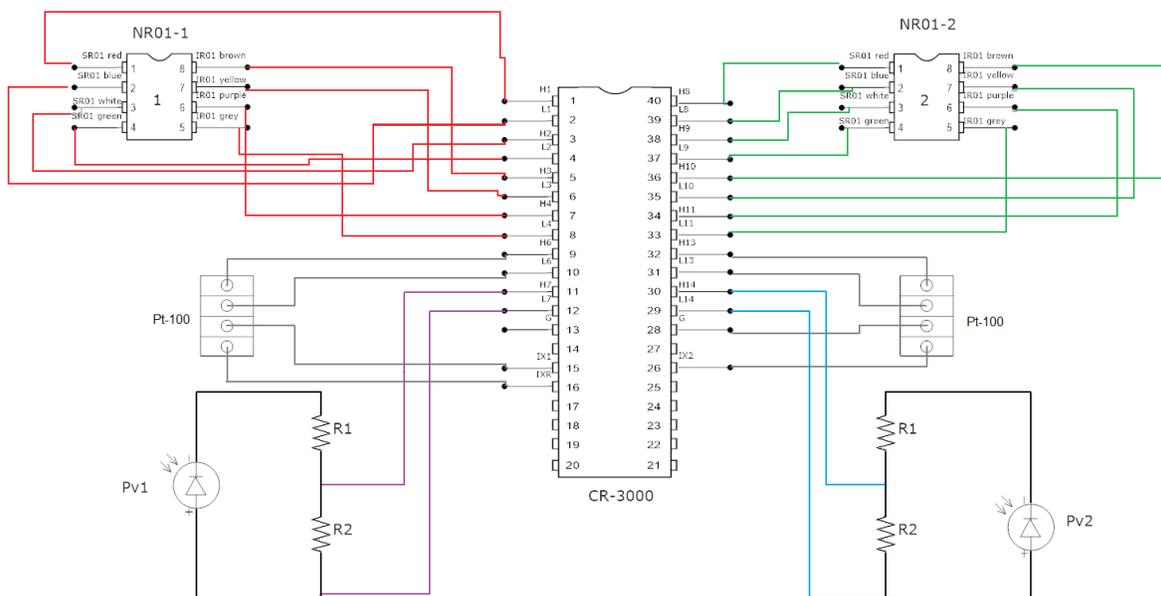


Figura 12. Diagrama de conexiones para el CR-3000, los colores rojo y verde corresponden a los sensores radiométricos (1 y 2, respectivamente), los colores lila y azul se asignaron a los paneles fotovoltaicos y el color gris a los sensores de temperatura Pt-100.

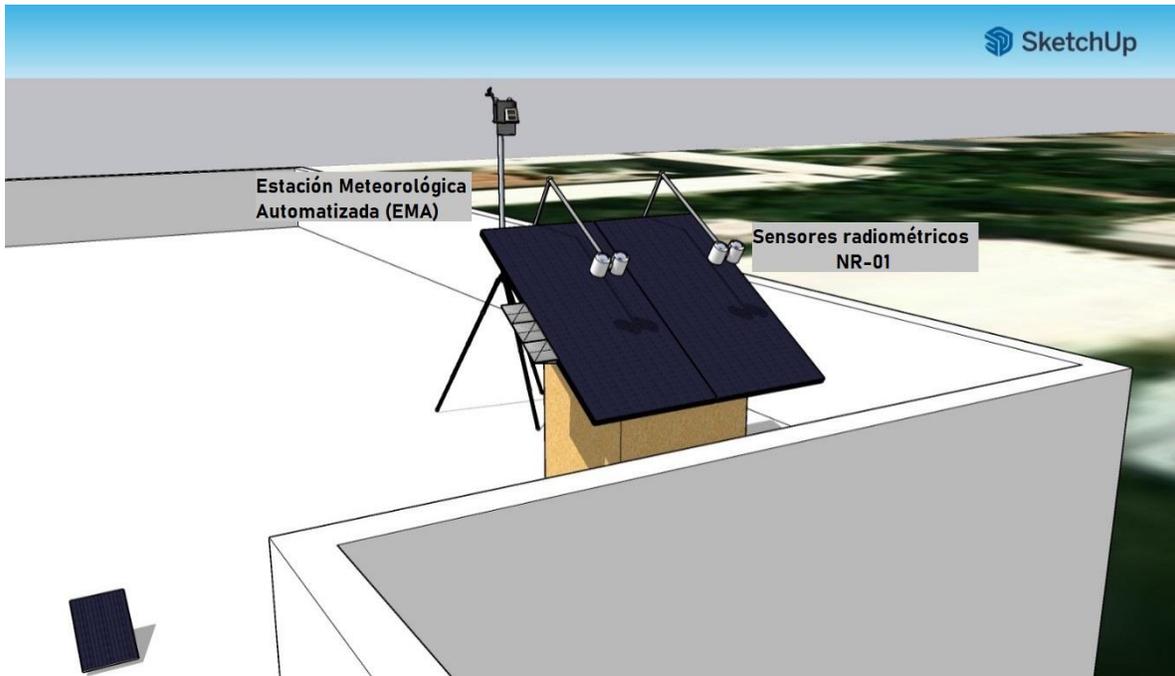


Figura 13. Modelo 3D con los equipos instalados en la azotea del Instituto de Ingeniería, elaborado con el software SketchUp.

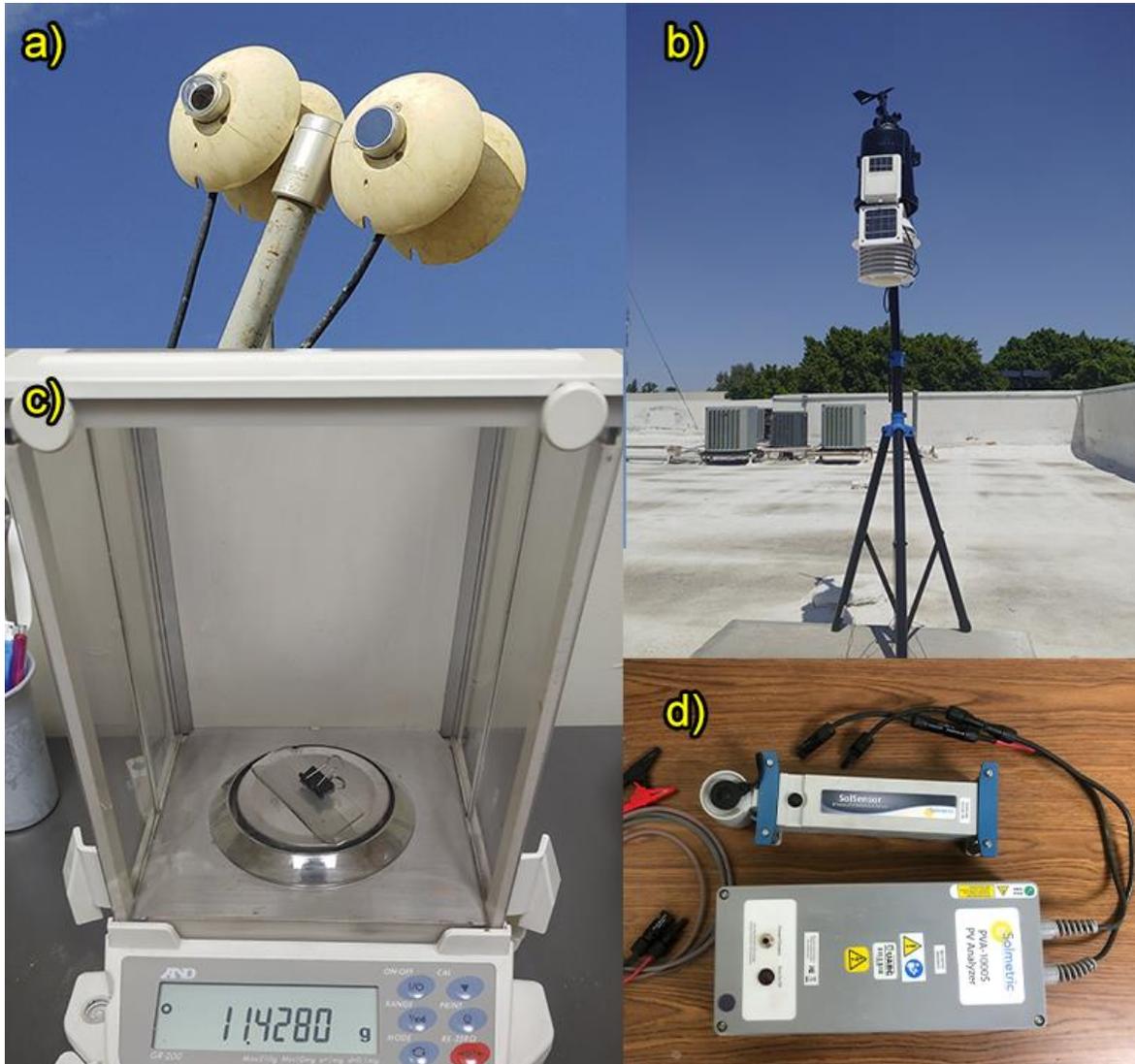


Figura 14. Equipos de medición. En orden consecutivo: sensor radiométrico NR-01, estación DAVIS, balanza analítica y PV-Analyzer.

### 3.6 Estabilidad atmosférica

Para identificar las condiciones atmosféricas en que el polvo se dispersa en el aire, antes, durante y después de su deposición sobre los paneles solares, se hará uso del método de Pasquill-Gifford, el cual propone una simbología de letras asociadas a determinados rangos de valores de radiación solar y velocidad del viento (los cuales favorecen las condiciones de turbulencia convectiva y mecánica, respectivamente).

Tabla 2. Clasificación de Pasquill-Gifford para el periodo diurno			
Velocidad de viento (m/s)	Radiación solar (W/m <sup>2</sup> )		
	Fuerte (>600)	Moderada (300-600)	Ligera (300)
≤ 2	A	A-B	B
2-3	A-B	B	C
3-5	B	B-C	C
5-6	C	C-D	D
> 6	C	D	D

Para automatizar el proceso de análisis y comparativa entre los parámetros que se requieren, se elaboró un programa mediante el software R a partir de la interfaz RStudio (Ahumada, 2003=, el cual se encuentra registrado como Obra Indautor con número de registro 03-2023-092112234500-01 (UABC, 2023). Este programa ha servido para realizar los diagnósticos de calidad del aire que se publican semanalmente en el sitio web oficial del Instituto de Ingeniería (<http://institutodeingenieria.uabc.mx/index.php/pronostico-del-tiempo>). Así mismo, también ha favorecido el desarrollo de propuestas de colaboración con la asociación civil Fundación para la Investigación de la calidad del aire A.C. quien sustenta el programa de responsabilidad social Redspira.

En dicho programa de cómputo es necesario especificar el nombre del archivo que debe contar con los datos de entrada asociados a las variables de radiación solar y velocidad del viento. En la Figura 15 se muestra la interfaz gráfica generada a partir del código de programación correspondiente al método Pasquill-Gifford.

Universidad Autónoma de Baja California  
Instituto de Ingeniería  
Programa para determinar la estabilidad atmosférica

**Seleccione un método:**

Pasquill-Gifford

Monin-Obukhov

**Seleccione un archivo de Excel:**

La metodología de Pasquill-Gifford requiere datos meteorológicos de velocidad del viento y radiación solar, a partir de los cuales se establece un criterio a base de letras de la A a la G para indicar con base a los rangos de valores en que se encuentren ambos parámetros meteorológicos si las condiciones atmosféricas son: muy inestables (A), inestables (B), ligeramente inestables (C), neutras (D), ligeramente estables (E), estables (F), o muy estables (F).

Figura 15. Interfaz de usuario del programa para determinar la clasificación de la estabilidad atmosférica. Elaborado mediante R Studio.

### 3.7 Depuración de los datos

Para generar muestras representativas de polvo será necesario descartar algunos de los datos que se registren a lo largo del experimento y que afecten al funcionamiento de los sensores, la captación de dicho material particulado y la generación de potencia por parte de los sistemas fotovoltaicos. El criterio considerado consiste en descartar aquellos datos que correspondan a días que presenten nubosidad, lluvia o vientos muy fuertes.

Como se mencionó en la sección 3.2 “Periodos de estudio”, también se descartarán los días festivos, los fines de semana y los periodos vacacionales debido a la reducción en las actividades económicas que provoca una disminución en la cantidad de tráfico vehicular que circula sobre las vías de transporte aledañas a la ubicación del experimento.

### 3.8 Modelo de regresión

Se construirá un modelo de regresión lineal múltiple que permita cuantificar la potencia del panel fotovoltaico (variable dependiente), tomando como variables independientes las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección de viento), la radiación de onda corta reflejada sobre el panel fotovoltaico y el peso del polvo depositado sobre los portaobjetos.

Los modelos de regresión lineal son técnicas de modelado para analizar datos y crear predicciones para una variable dependiente que se encuentra en función de una o más variables independientes. Es común encontrarlos en la literatura, tal como se ve en las investigaciones de Paudyal y Shakya (2016) y Al-Kouz et al. (2019), en ambas se consideran variables meteorológicas como la temperatura ambiente, así como la humedad relativa y la radiación solar sobre el plano inclinado.

Otro punto importante a destacar es que las condiciones o clases de estabilidad atmosférica no serán incluidas como una variable independiente dentro de cada modelo de regresión, ya que corresponde a un tipo de variable cualitativa; por lo que éstos servirán como referencia para identificar las condiciones de turbulencia que influyeron en los rangos de valores de las variables involucradas, especialmente la potencia de salida del panel y el polvo depositado, durante las estaciones de verano e invierno.

## Capítulo 4. Resultados

### 4.1 Estadística descriptiva aplicada a las variables de: polvo, sistemas fotovoltaicos y meteorológicas

Los datos que se analizan en este documento se obtuvieron a partir de la campaña de mediciones identificada como “AgoOct-Febrero” que comprende días desde agosto a octubre del 2022, así como algunos días del mes de febrero del 2023. Se omiten los meses de noviembre y enero debido a la presencia de lluvias, así como presencia de nubes que afectaron a las mediciones.

Como primer análisis y a modo de comparativa se presentan las tablas 3 y 4, que corresponden a la estadística básica para los datos tomados a lo largo del experimento. La tabla 3 corresponde a los datos depurados a partir de los criterios que se consideran en la sección 3.7 “Depuración de los datos” y que hacen referencia a las gráficas e información que se presentan a lo largo de este documento. Por otra parte, la tabla 4 considera, además, a los datos que fueron “eliminados” mediante los criterios de depuración, es decir, que incorpora todos aquellos datos que se tomaron durante todo el muestreo del experimento.

A partir de la estadística básica podemos identificar una primera aproximación a la calidad de la información, en las tabla 4 se observa que al considerar el periodo completo de muestreo, la varianza para las variables de temperatura, humedad relativa, radiación solar y onda corta difiere más que en comparación con los datos depurados (tabla 3), esto se ve reflejado también en el coeficiente de variación y en algunos casos en la desviación estándar (polvo, temperatura, humedad relativa, radiación solar, onda corta y velocidad de viento). En el Apéndice se encuentra más información respecto a los datos completos y su estadística básica, al final de este documento.

Tabla 3. Estadística básica por variable (periodo agosto-octubre y febrero).					
Variable	Media	Desviación estándar	Varianza	Coefficiente de variación	Mediana
Polvo (g)	1.56E-03	7.76E-04	1.00E-06	49.770	1.4E-03
Temp (°C)	32.950	8.530	72.740	25.880	35.900
HR %	28.780	8.690	75.540	30.200	28.000
Rad (W/m <sup>2</sup> )	746.670	70.990	5039.480	9.510	717.000
Corriente_sucio (A)	7.8796	0.447	0.199	5.670	7.852
Potencia_sucio (W)	231.160	17.700	313.240	7.660	226.530
Corriente_limpio (A)	8.053	0.447	0.200	5.550	8.022
Potencia_limpio (W)	237.670	18.100	327.610	7.620	233.480
OC_limpio (W/m <sup>2</sup> )	22.386	5.034	25.344	22.490	22.730
OC_sucio (W/m <sup>2</sup> )	27.276	3.970	15.758	14.550	27.250
VV (m/s)	4.900	2.015	4.060	41.120	4.800

OC\_limpio y OC\_sucio corresponden a la radiación de onda corta; Corriente\_limpio y Corriente\_sucio, Potencia\_limpio y Potencia\_sucio se refieren a la corriente y potencia en cada panel, respectivamente. El parámetro VV indica velocidad de viento.

Variable	Media	Desviación estándar	Varianza	Coefficiente de variación	Mediana
Polvo (g)	1.46E-03	7.81E-04	1.00E-06	53.380	1.4E-03
Temp (°C)	30.070	9.160	83.990	30.480	29.500
HR %	28.080	9.920	98.330	35.310	27.000
Rad (W/m <sup>2</sup> )	720.800	85.800	7360.800	11.900	704.500
Corriente_sucio (A)	7.843	0.421	0.177	5.370	7.829
Potencia_sucio (W)	233.150	16.960	287.550	7.270	230.430
Corriente_limpio (A)	8.015	0.419	0.175	5.210	7.985
Potencia_limpio (W)	239.860	17.160	294.600	7.160	236.890
OC_limpio (W/m <sup>2</sup> )	29.340	14.280	204.060	48.680	24.700
OC_sucio (W/m <sup>2</sup> )	28.936	5.012	25.121	17.320	28.865
VV (m/s)	4.559	2.093	4.380	45.900	4.539

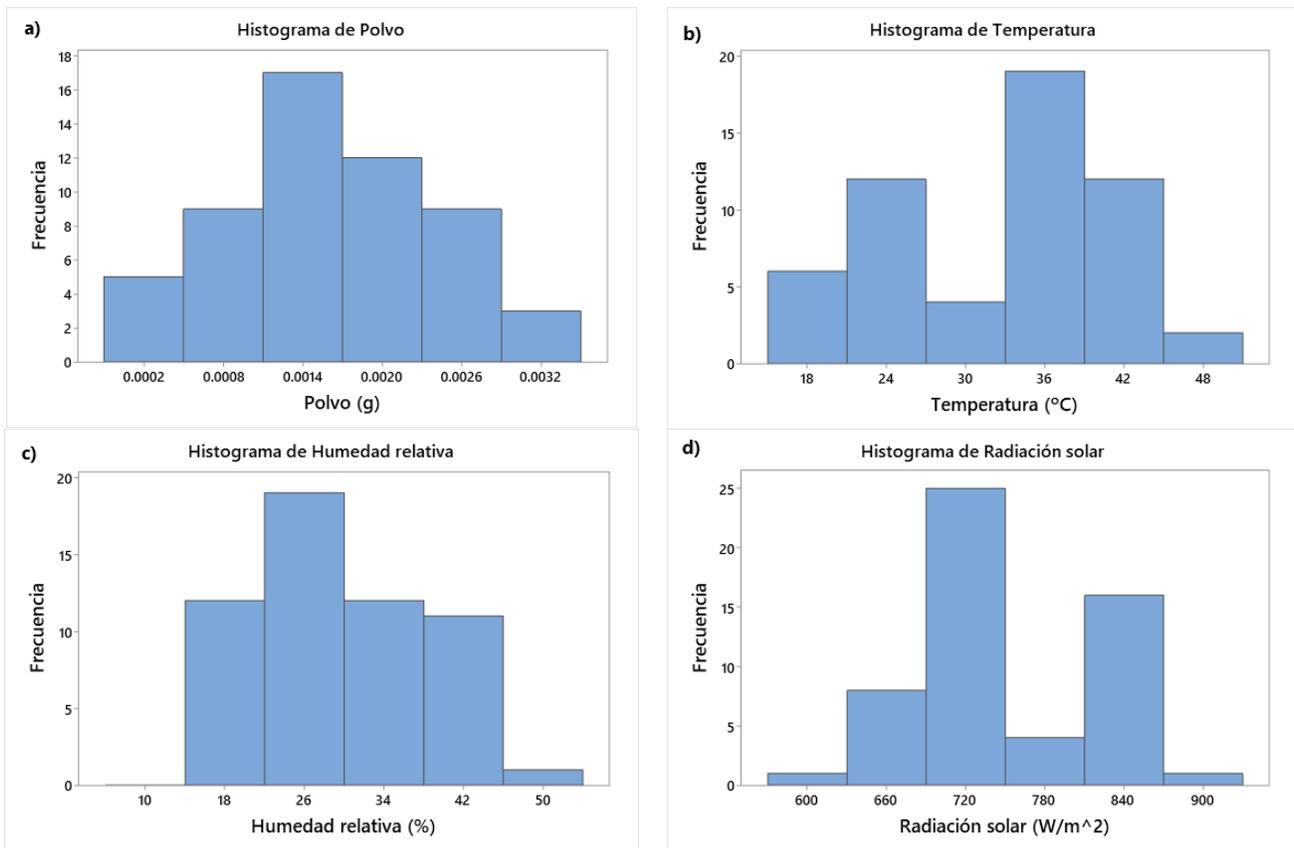
OC\_limpio y OC\_sucio corresponden a la radiación de onda corta; Corriente\_limpio y Corriente\_sucio, Potencia\_limpio y Potencia\_sucio se refieren a la corriente y potencia en cada panel, respectivamente. El parámetro VV indica velocidad de viento.

El histograma de los datos de polvo (fig. 16a) alcanza su mayor frecuencia en los 0.0014g, mientras que la menor de las frecuencias corresponde a 0.0032g; por su parte, para las variables meteorológicas (fig. 16b, 16c, y 16d) se observa que la temperatura presenta sus mayores frecuencias alrededor de los 36°C, mientras que su frecuencia mínima se encuentra en los 48°C; la humedad relativa alcanza una mayor frecuencia en el 26%, mientras que su contraparte logra el 50%; la radiación solar logra alcanzar una mayor frecuencia alrededor de los 720W/m<sup>2</sup>, mientras que la menor frecuencia corresponde a los 900W/m<sup>2</sup>.

Con respecto a los parámetros de los paneles fotovoltaicos, el panel sucio (fig. 16e y 16f) presenta una mayor frecuencia en los 8A de corriente, con frecuencias mínimas entre los 5.6A, 8.8A y 9.6A; ahora bien, la potencia alcanza su frecuencia máxima en los 220W y la menor frecuencia se encuentra en los 300W. Por su parte, el panel limpio (fig. 16g y 16h) presenta una frecuencia mayor en la corriente de 8A,

mientras que las frecuencias más bajas se encuentran en los 5.6A, 7.2A y 9.6A, la potencia del panel limpio presenta frecuencias más altas con respecto a las que se registraron para el sucio, la menor de las frecuencias en este caso corresponde a los 200W.

Los datos de onda corta reflejada sobre el panel limpio (fig. 15i) presentan una frecuencia mayor en los 25W/m<sup>2</sup> y que supera los 20 días, mientras que la menor se encuentra a los 35 W/m<sup>2</sup>; sobre el panel sucio (fig. 15j) la mayor de las frecuencias se encuentra a los 26 W/m<sup>2</sup>, seguido de los 23 W/m<sup>2</sup> y 29 W/m<sup>2</sup>, que se presentaron durante 13 y 11 días, respectivamente. La más baja de las frecuencias corresponde a 20 W/m<sup>2</sup>.



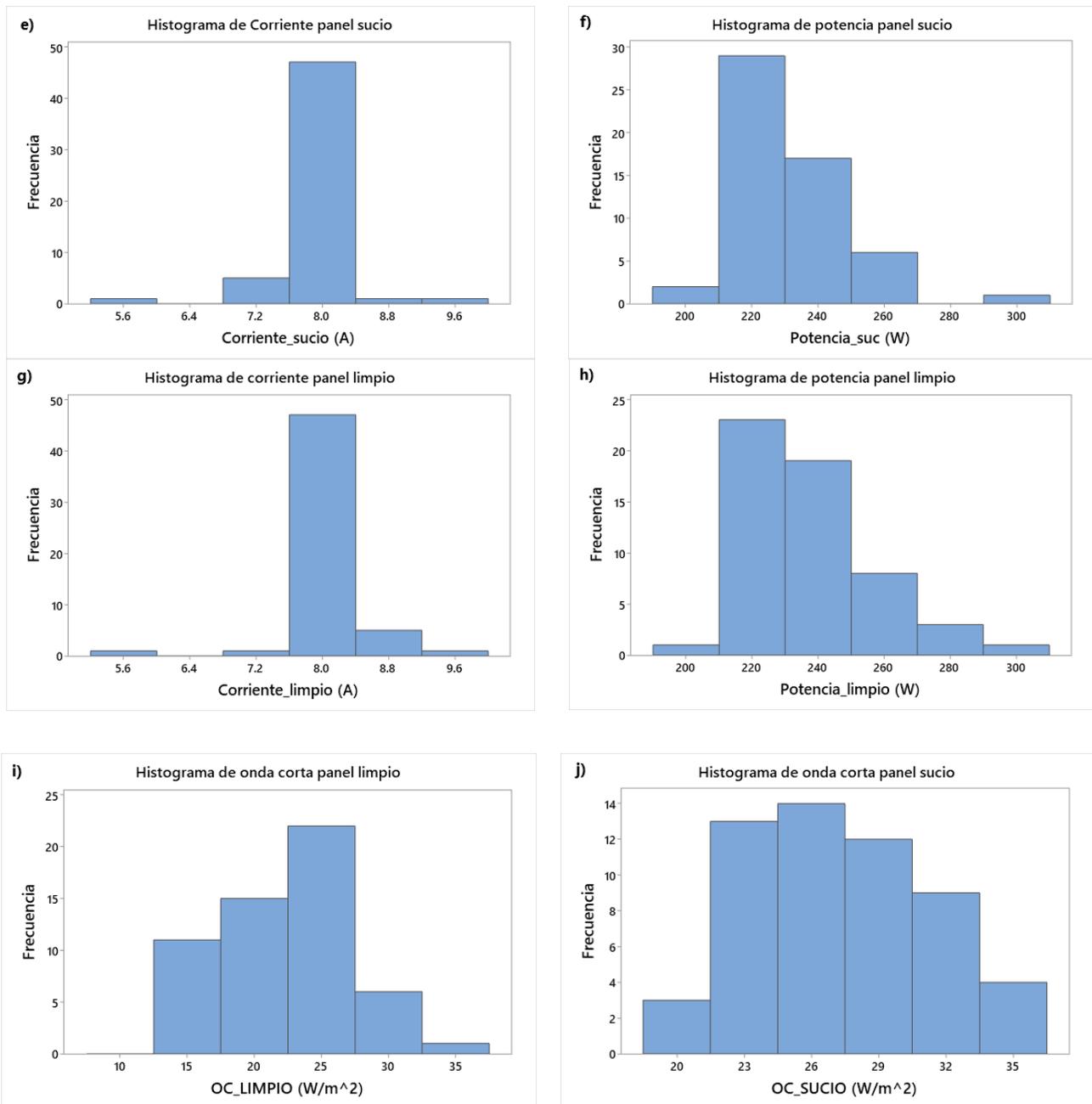


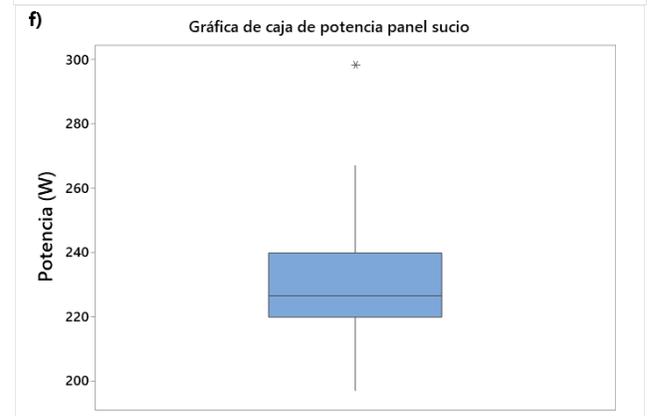
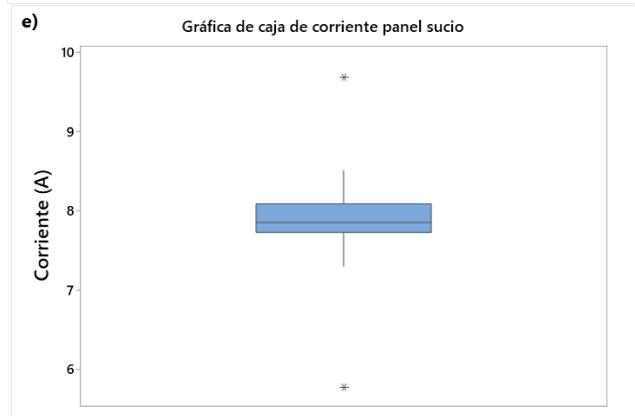
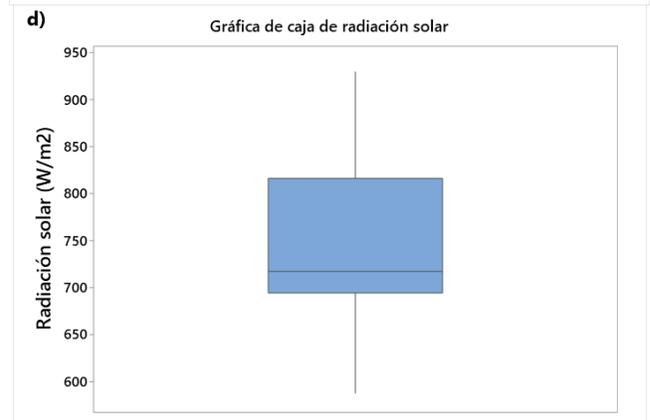
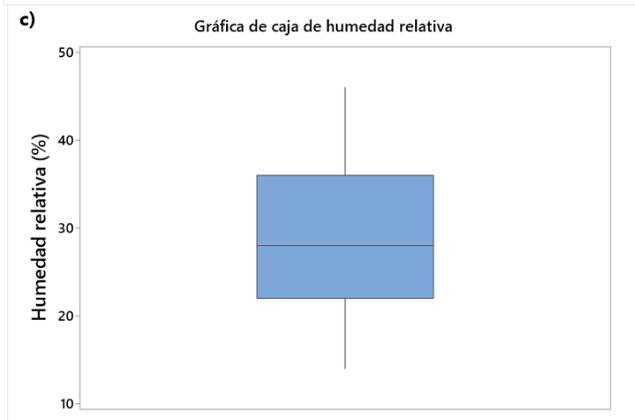
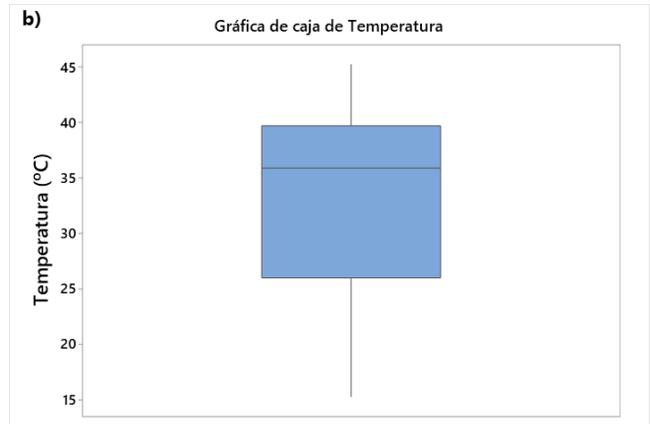
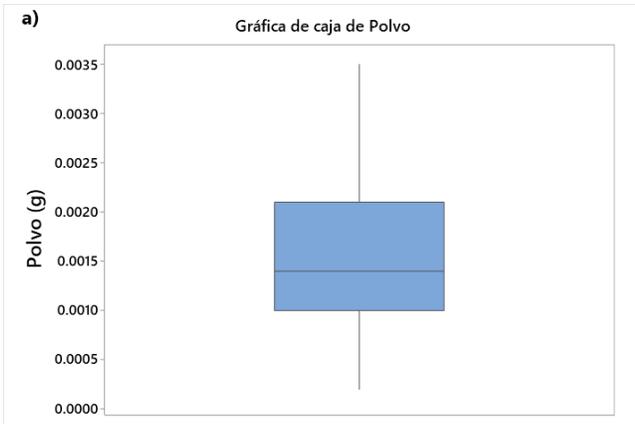
Figura 16. Histogramas correspondientes a los datos de polvo, variables meteorológicas y variables del panel fotovoltaico. Donde OC\_sucio y OC\_limpio corresponden a los datos de radiación de onda corta reflejada sobre el panel sucio y limpio, respectivamente.

Al analizar las gráficas de caja para los datos de polvo (figura 17a) se observa una mediana de 0.0014g y un rango de valores que van desde 0.001g hasta 0.0021g; para la temperatura (figura 17b) se obtuvo un rango de 30°C, con valores que van desde 15°C hasta 45°C, con una mediana de 35.9°C; la humedad relativa (figura 17c) presenta una mediana de 28% y un rango de valores entre 14% y 46%; la

radiación solar (figura 17d) registró valores desde  $550\text{W/m}^2$  hasta  $920\text{W/m}^2$  y una mediana de  $717\text{W/m}^2$ .

Para los parámetros fotovoltaicos del panel sucio (figuras 17e y 17f) se observa que la corriente comprende valores entre  $7\text{A}$  y  $8.5\text{A}$ , con una mediana de  $7.85\text{A}$ , en este caso se observan dos valores atípicos y que corresponden a  $5.7\text{A}$  y  $9.7\text{A}$ ; la potencia alcanzó una mediana de  $226\text{W}$ , con un rango de valores entre  $190\text{W}$  y  $265\text{W}$ , con un valor atípico cercano a los  $300\text{W}$ . El panel limpio, por su parte (figuras 17g y 17h) registró una corriente con valores entre  $7.5\text{A}$  y  $8.5\text{A}$ , con una mediana de  $8.02\text{A}$ , se observan dos valores atípicos (el más pequeño por debajo de  $6\text{A}$  mientras que el mayor se aproxima a los  $10\text{A}$ ); en términos de potencia, el panel limpio se mantuvo operando entre los  $190\text{W}$  y los  $290\text{W}$ , con una mediana de  $233\text{W}$ , se observa un valor atípico cercano a los  $300\text{W}$ .

La radiación de onda corta para el panel limpio (figura 17i) presenta un rango de valores desde  $13\text{W/m}^2$  hasta  $34\text{W/m}^2$ , con una mediana de  $22.73\text{W/m}^2$ , por parte del panel sucio (figura 17j), la radiación solar de onda corta reflejada durante el periodo de estudio comprende valores que van desde los  $18\text{W/m}^2$  hasta los  $36\text{W/m}^2$  con una mediana de  $27.25\text{W/m}^2$ .



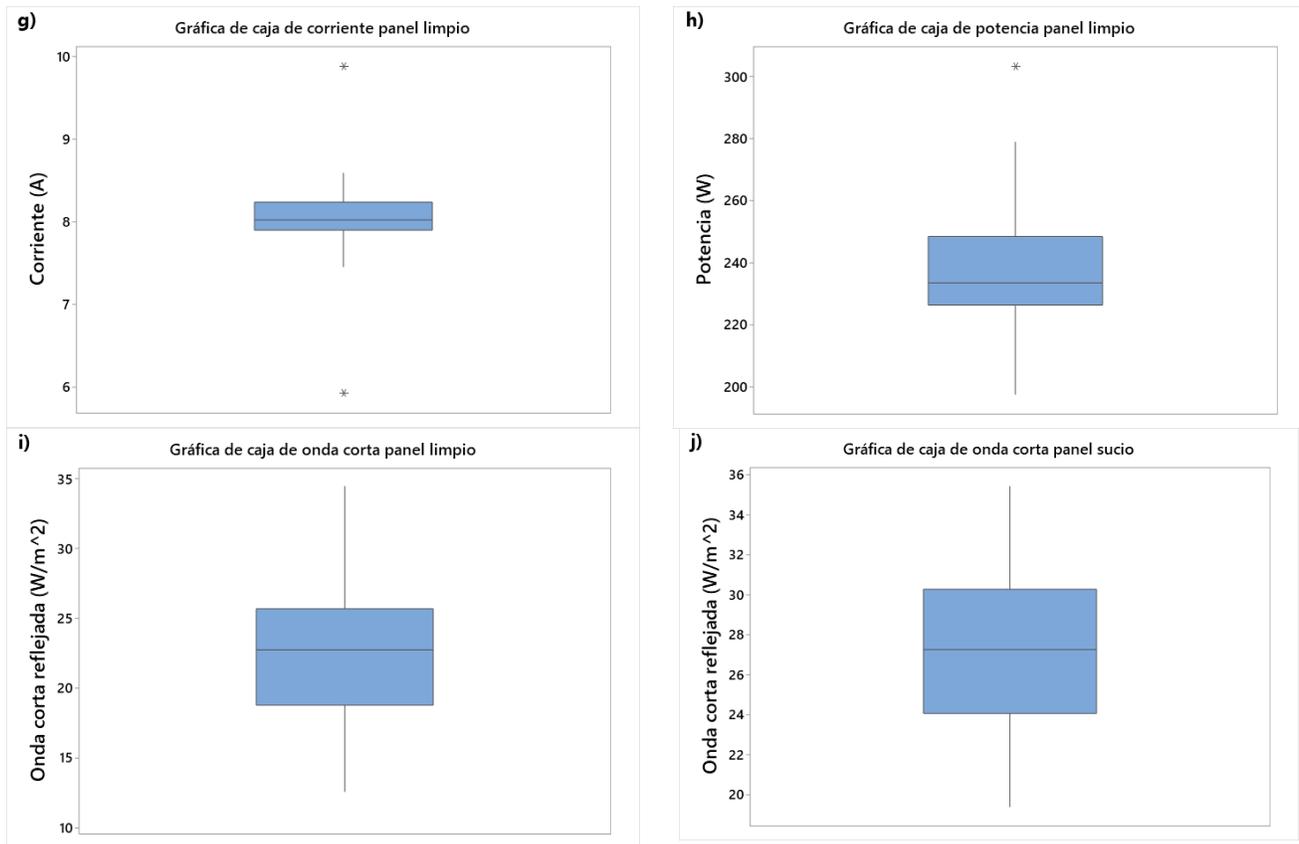
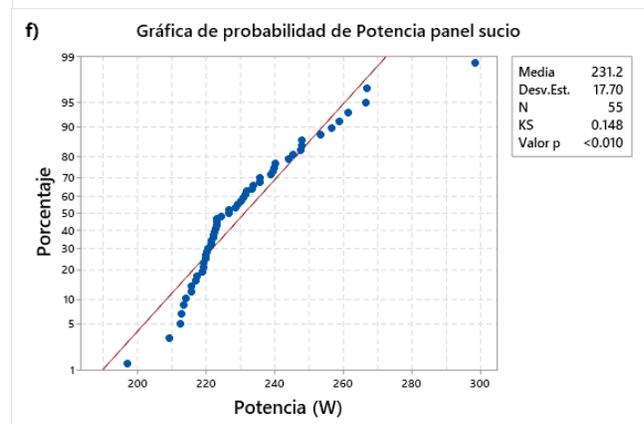
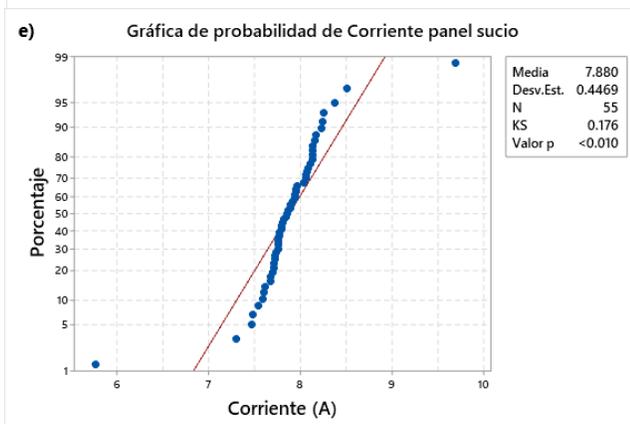
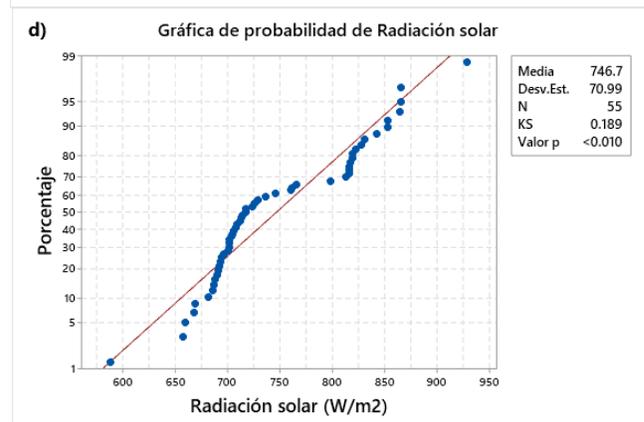
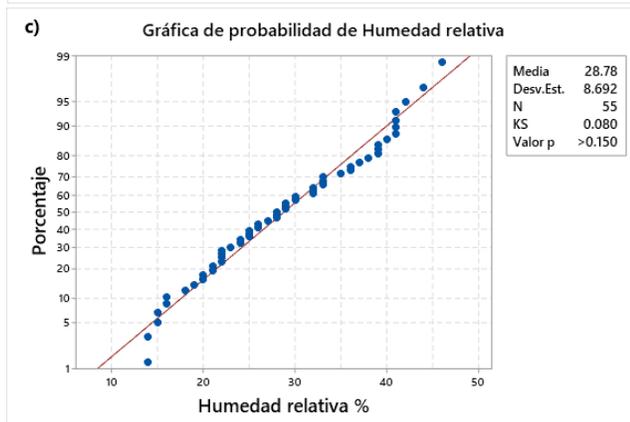
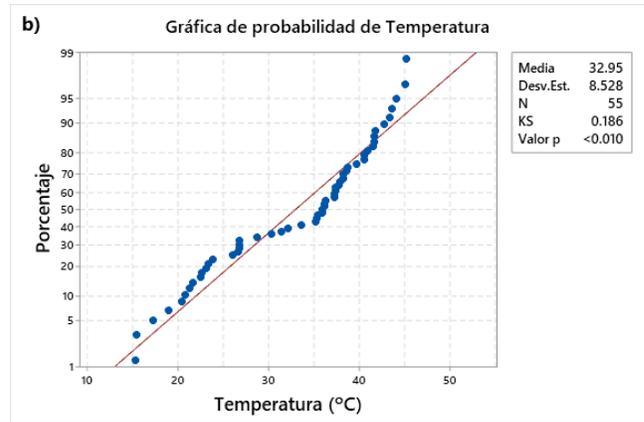
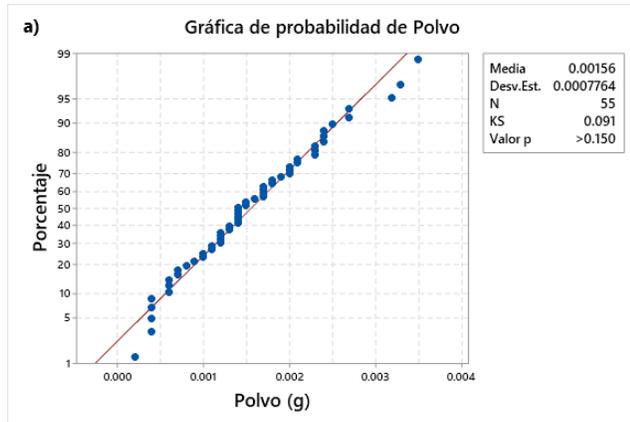


Figura 17. Gráficas de caja y bigotes correspondientes a los datos de polvo, variables meteorológicas y variables de los paneles fotovoltaicos. Incisos e, f y j corresponden al panel sucio, mientras que los incisos g, h e i corresponden al panel limpio.

Para el caso del polvo depositado (figura 18a) la prueba de Kolmogorov-Smirnov y su gráfica Cuantil-Cuantil, se indica un comportamiento normal entre los datos, esto debido a que el p-valor se obtuvo como 0.15 (mayor que el error aceptado de 0.05); la temperatura (figura 18b), por su parte presenta un comportamiento no normalizado, con un p-valor de 0.01; los datos de humedad relativa (figura 18c) también presentan un comportamiento normalizado, así como un p-valor de 0.15; la radiación solar (figura 18d) no muestra un comportamiento normal con respecto a la media, su p-valor es de 0.01; tanto la corriente del panel sucio (figura 18e) como la potencia del mismo (figura 18f) reflejan un comportamiento no normalizado, con un p-valor de 0.01; además, la corriente y la potencia del panel limpio (figuras 18g y 18h) muestran un comportamiento no normalizado sobre la media de sus datos, ambos con un p-valor de 0.01; por último, los datos de radiación de onda corta reflejada para el panel limpio (figura 18i) se encuentran alrededor de la media, por lo que se consideran normalizados, con un p-valor de 0.15; para el panel sucio (figura 18j) se observa la misma situación, pues su comportamiento está normalizado según la prueba de Kolmogorov-Smirnov y su p-valor es 0.15.

Con base en los resultados obtenidos a partir de la estadística básica, la prueba de Kolmogorov-Smirnov y las gráficas Cuantil-Cuantil (mejor conocidas como Q-Q Plot)

mostradas en la Figura 18, se confirma que los estadísticos que se aplican en adelante serán de tipo “no paramétrico”, lo que significa que el análisis de la posible relación entre las variables se realizará aplicando el método de correlación de Spearman, esto es tomando los valores asociados a partir de la categorización de los datos medidos de menor a mayor, por lo cual a partir de aquí se identifica si el comportamiento de los mismos es monótonicamente creciente o decreciente.



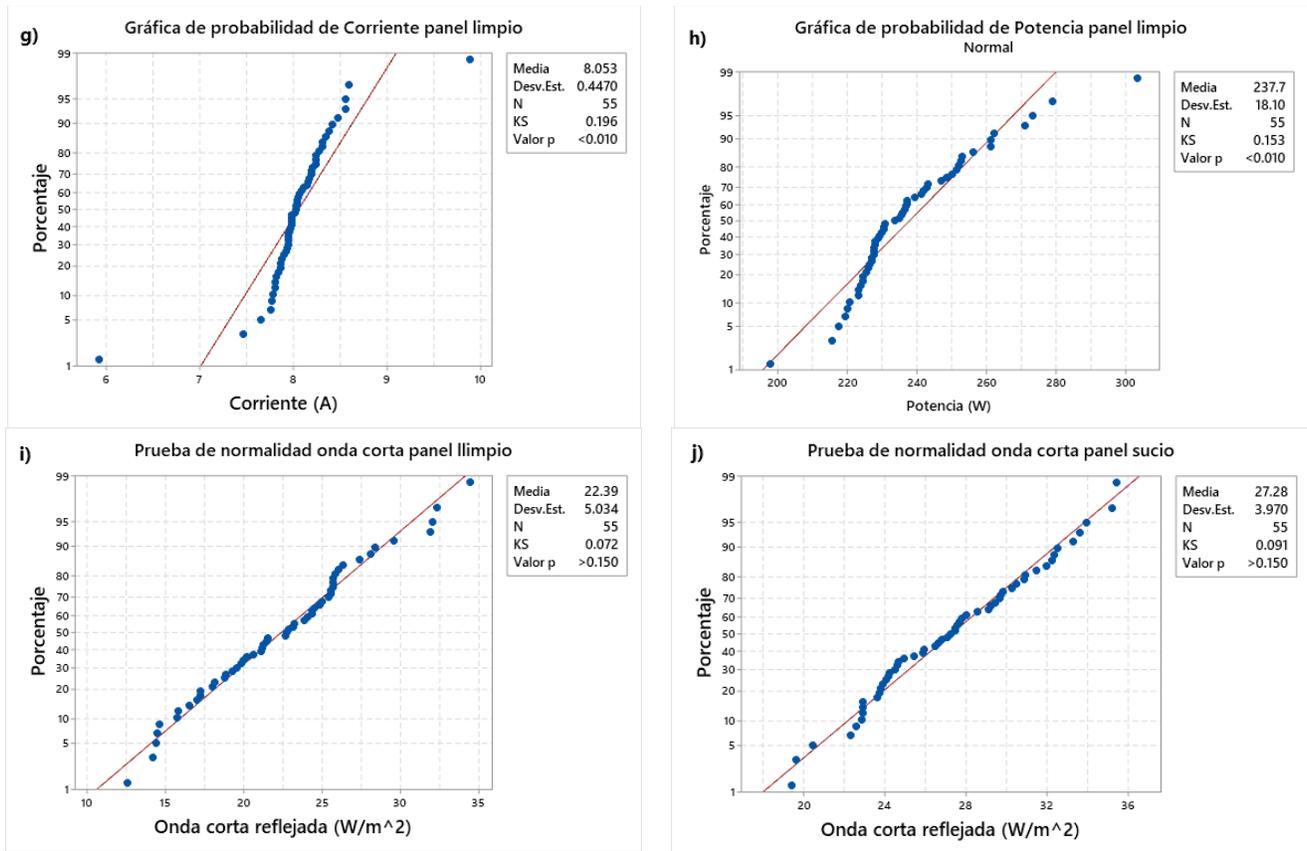


Figura 18. Pruebas de normalidad para los datos de polvo (gráficas Cuantil-Cuantil) tanto para las variables meteorológicas y de los paneles fotovoltaicos.

#### 4.2 Análisis de la relación estadística entre variables

Para conocer la relación estadística entre las variables meteorológicas se calcularon los coeficientes de correlación de Spearman, los cuales se acomodaron en una matriz (figura 19), donde se hace uso de una escala de colores para resaltar la fuerza de las interacciones entre cada par de variables, a esto se le conoce como escala de Milton, se trata de una propuesta de rangos de valores para la interpretación de los coeficientes de correlación positivos o negativos, y van desde *débil* (0 a 0.5), *moderada* (0.5 a 0.9) y *fuerte* (0.9 a 1) (González Támara, 2017).

Por lo anterior se observa que, con base en la escala de Milton, el par de variables con mayor correlación es el de voltaje del panel sucio y la temperatura ambiente (-0.86), por el contrario, la correlación más débil corresponde a la radiación de onda corta reflejada y la radiación solar (se aproxima a 0).

Para el proyecto es importante analizar el comportamiento de todas las posibles combinaciones entre cada par de las variables meteorológicas, la acumulación de polvo sobre la superficie de los captadores, los parámetros de salida del módulo fotovoltaico y la radiación de onda corta que se ve reflejada a causa del polvo, de

tal manera que en la figura 20 se presentan las gráficas de dispersión de dichos parámetros.

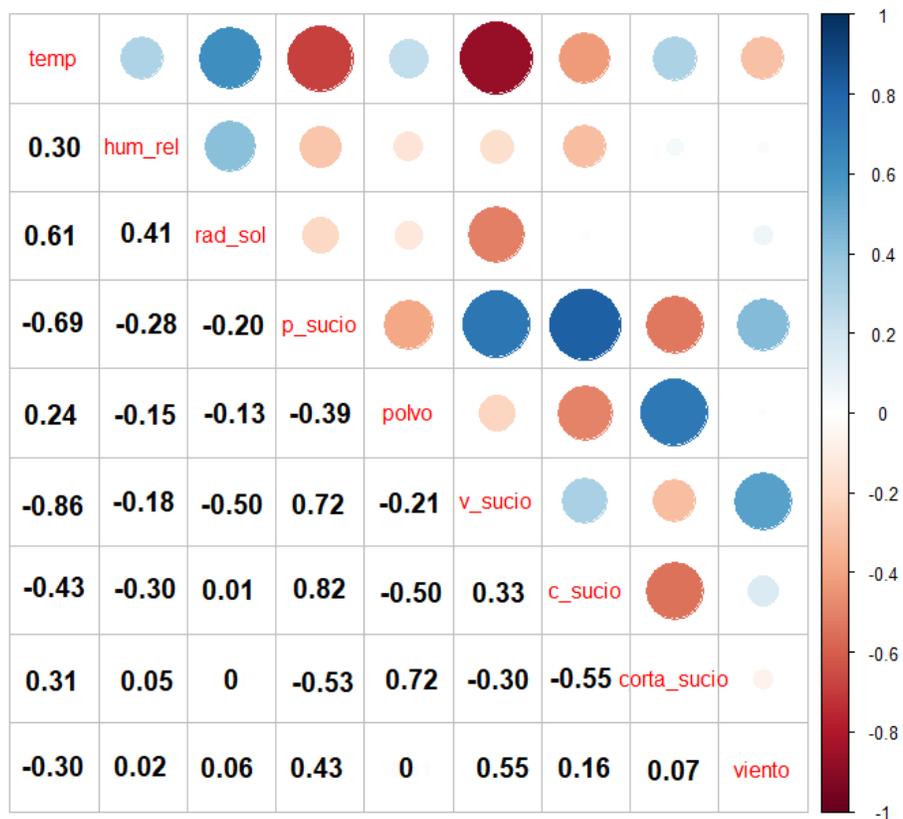


Figura 19. Tabla de correlaciones con escala de colores (método de Spearman).

A partir de la tabla de correlaciones de Spearman (figura 19) y la matriz de dispersión (Figura 20), se genera una nueva matriz considerando únicamente las variables que mayor correlación tienen con la potencia (variable dependiente) (figura 21), esto debido a que es la forma en que se ve reflejada la afectación del polvo y las condiciones atmosféricas sobre la superficie de los paneles fotovoltaicos, que es la interfaz o zona de interacción de la celda solar donde comienza el proceso para la generación de dicha potencia.

Por lo anterior, en la figura 21 se observa que el coeficiente de correlación de la potencia ( $p\_sucio$ ) con: la temperatura ambiente ( $temp$ ) es  $-0.69$ , el voltaje ( $v\_sucio$ ) y la corriente ( $c\_sucio$ ) del panel fotovoltaico es  $0.72$  y  $0.82$  respectivamente, la radiación de onda corta reflejada ( $corta\_sucio$ ) se obtuvo  $-0.53$ , el polvo depositado ( $polvo$ ) es  $-0.39$  y la velocidad de viento ( $viento$ ),  $0.43$ . Cabe mencionar que se contemplan aquellas variables cuyo coeficiente tiene un valor superior a  $0.35$  para incluir el papel que tiene el polvo en esta investigación y así cuantificar la relación monótona entre dichas variables. La aplicación de este estadístico sirve para investigar si cada par de variables tiene un comportamiento monótono creciente o

decreciente. Es importante aclarar a qué se refiere cada variable, hum\_rel corresponde a la humedad relativa.

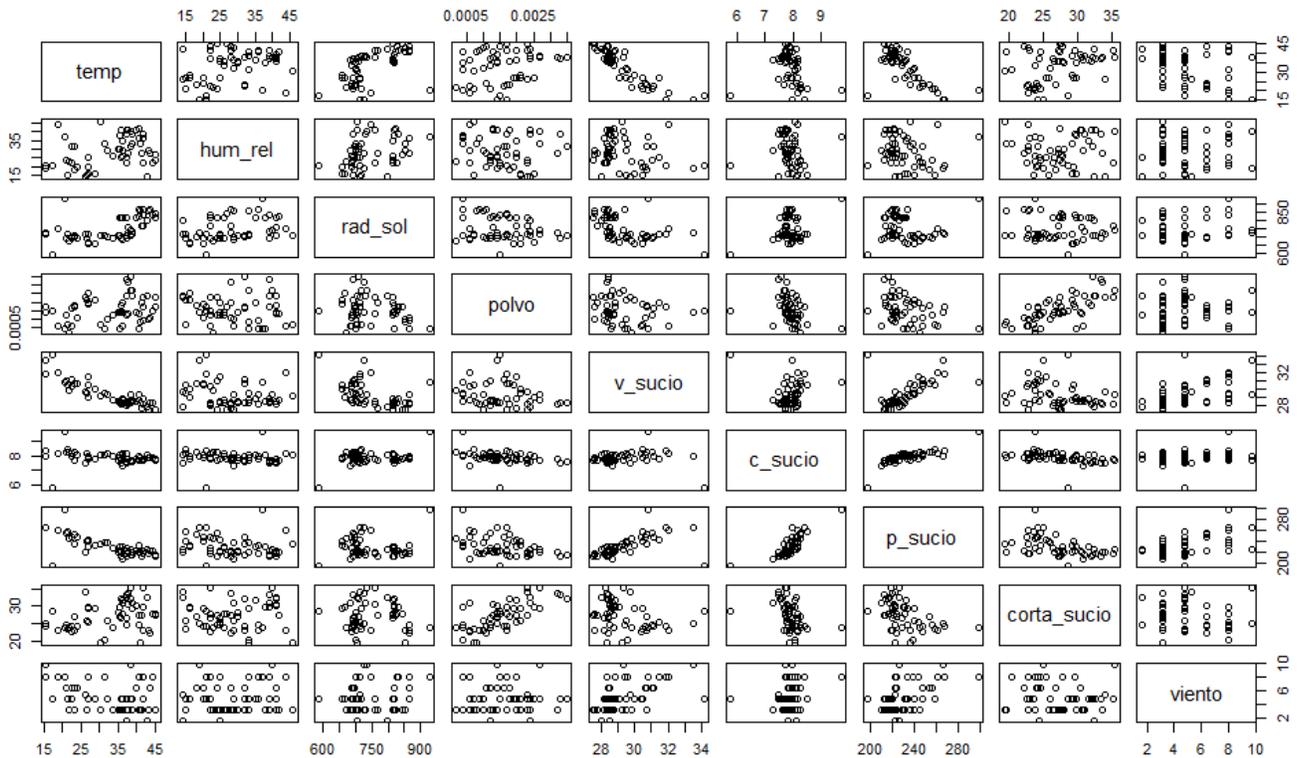


Figura 20. Matriz de dispersión (incluye todas las variables involucradas en el proyecto).

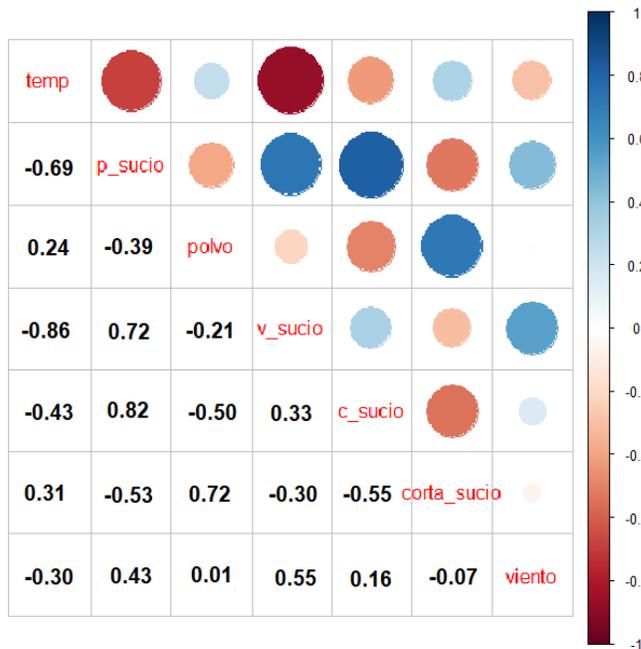


Figura 21. Matriz de correlaciones, se presentan las correlaciones más interesantes para el proyecto (método de Spearman).

En la Figura 22 se muestran las gráficas de relación monotónica de las variables más aptas para el análisis de potencia. Cabe mencionar que los ejes de las gráficas no llevan unidades debido a que los datos que se utilizaron para su elaboración son aquellos tomados a partir de la jerarquización de menor a mayor de los datos originales.

Entre las relaciones que se consideran dentro del proyecto se encuentra: la radiación de onda corta y el polvo depositado (figura 22a), que presenta un comportamiento monotónicamente creciente, con una correlación de 0.716; la humedad relativa y el voltaje de salida del panel fotovoltaico (figura 22b), muestra una mayor dispersión entre los datos, con una correlación negativa muy baja de -0.163; la radiación solar y la corriente del panel fotovoltaico (figura 22c) muestran también una relación débil de tan solo -0.010; la temperatura y la radiación solar (figura 22d) reflejan una correlación positiva de 0.615; la interacción entre la potencia y la corriente (figura 22e) es positiva y alcanza un coeficiente de correlación de 0.820; la relación monotónica entre el polvo y la potencia (figura 22f) es de -0.378.

En la figura 23 se presentan gráficas de dispersión con relaciones monotónicas que consideran a la potencia como variable dependiente y que presentan correlaciones superiores a 0.35 para considerar la influencia del polvo, tal y como se había comentado previamente. Para la potencia y la temperatura (figura 23a) se reporta que su correlación es negativa con un valor de -0.685; para el voltaje y la potencia (figura 23b) se obtuvo 0.723; para la radiación de onda corta reflejada y la potencia (figura 23c) se encuentra una relación negativa de -0.525.

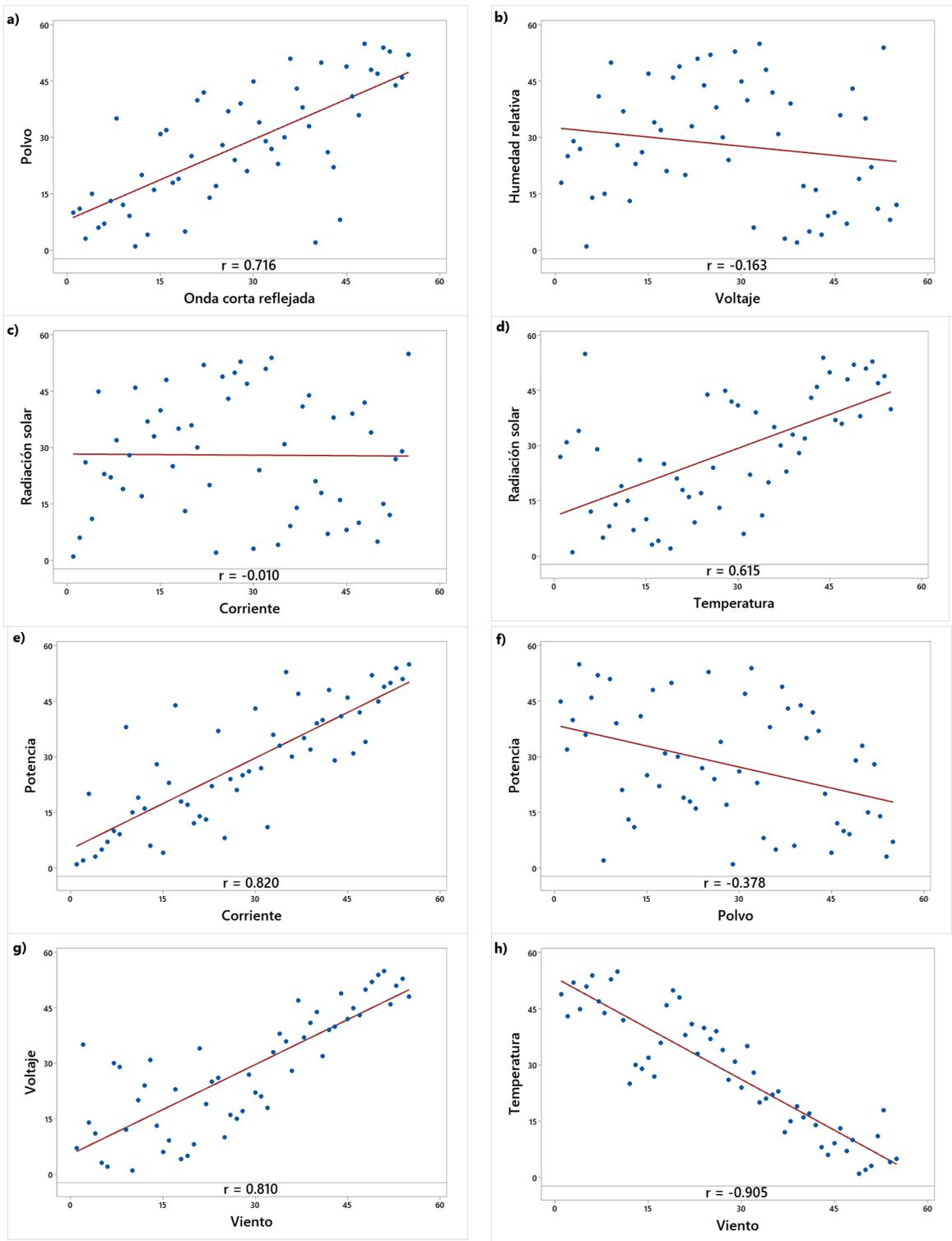


Figura 22. Relaciones monotónicas. Incluye las interacciones de principal interés para el proyecto.

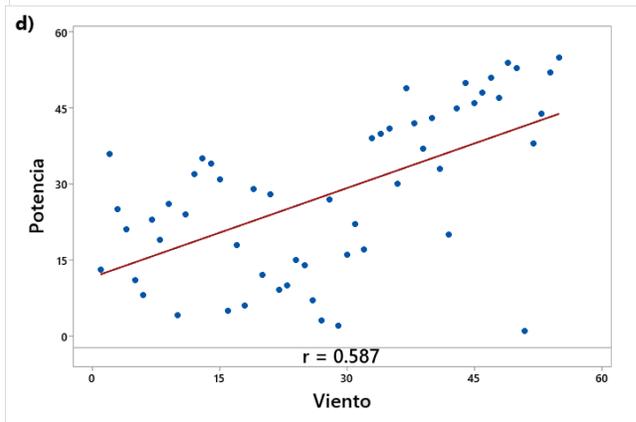
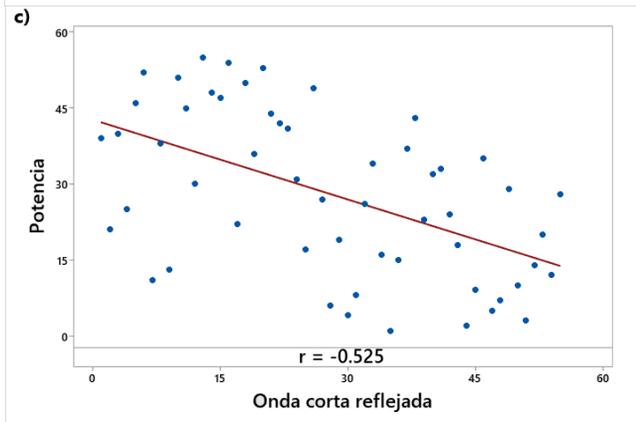
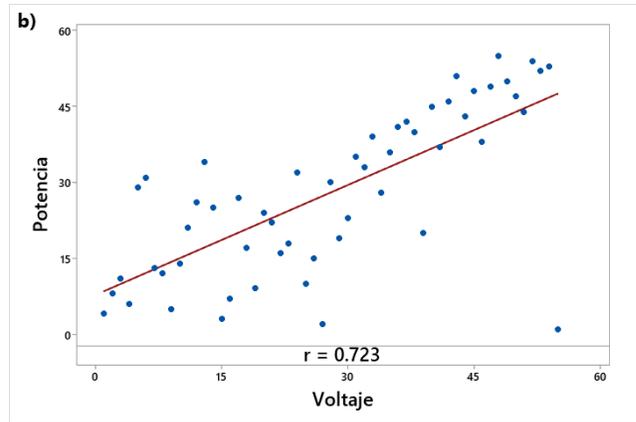
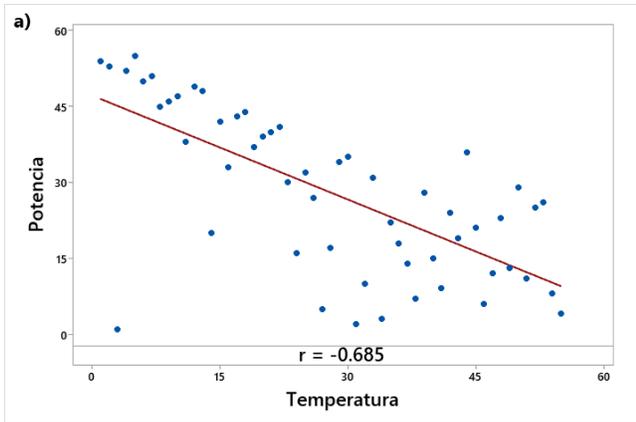


Figura 23. Relaciones monotónicas que incluyen a la potencia. Se incorporan las combinaciones de variables que se consideran importantes para su análisis a partir de las correlaciones de la figura 21.

### 4.3 Series de tiempo y estabilidad atmosférica

En la figura 24 se presenta la potencia del panel fotovoltaico sucio para los días correspondientes al experimento, sobre ésta se muestra también una clasificación por colores de los tipos de estabilidad atmosférica obtenidos mediante el método de Pasquill-Gifford, el cual depende de la velocidad del viento y la radiación solar. Entre los valores registrados por el panel limpio y el panel sucio se encuentra una diferencia máxima de 6.18% a favor del panel limpio. Las estabilidades que se identifican a lo largo del análisis corresponden a la clasificación “Muy inestable” (velocidad de viento por debajo de los 2 m/s y radiación solar fuerte, es decir, mayor a 600 W/m<sup>2</sup>), “Inestable” (velocidad de viento por debajo de 3 m/s y radiación solar por debajo de los 600 W/m<sup>2</sup>) y “Ligeramente inestable” (velocidad de viento de hasta 6 m/s con radiación solar superando los 600 W/m<sup>2</sup> o velocidad de viento entre 3 y 5 m/s con radiación solar por debajo de los 300 W/m<sup>2</sup>). Se observa, que generalmente, cuando la atmósfera se vuelve más inestable se deposita mayor cantidad de polvo, además de verse incrementada la potencia generada (tanto para el panel limpio como para el panel sucio), este aumento en la deposición de polvo se presentó en 17 días, que corresponde al 30.9% del periodo analizado.

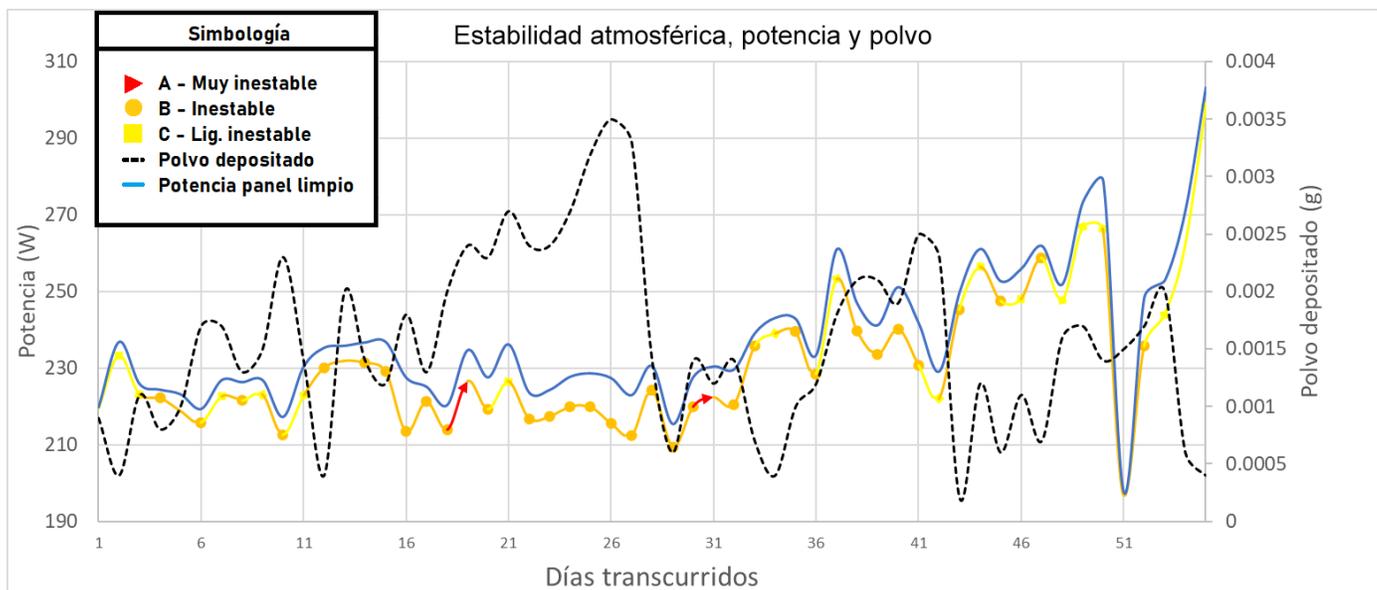


Figura 24. Serie de tiempo de estabilidad atmosférica con el método de Pasquill-Gifford, potencia (panel sucio y panel limpio) y polvo. Los días transcurridos del 1 al 6 pertenecen al mes de agosto, del 7 al 23 corresponden a septiembre, del 24 al 42 comprenden al mes de octubre y, del 43 al 55 a febrero.

Para continuar con los resultados de las mediciones de los parámetros, se generaron las gráficas de series de tiempo mostradas en la figura 25, en ellas se registró de manera diaria los valores medidos correspondientes al polvo, meteorológicos, datos de salida del panel fotovoltaico sucio y radiación de onda corta. Se presentan los resultados de aquellas variables con mayor importancia para

el proyecto que se identificaron previamente en las matrices de correlación (figuras 17, 18 y 19).

Para la radiación de onda corta reflejada y el polvo depositado sobre los paneles fotovoltaicos (figura 25a) se observa que, la mayor cantidad de energía que se reflejó es de alrededor de  $35\text{W/m}^2$  (día 21 del experimento y perteneciente al mes de septiembre), mientras que la menor cantidad se encuentra por debajo de los  $20\text{W/m}^2$  (día 33 del experimento, asociado al mes de octubre); por otra parte, la mayor cantidad de polvo que se depositó sobre los portaobjetos alcanzó los  $0.0035\text{g}$  (día 26 del experimento, asociado al mes de octubre), mientras que la cantidad mínima que se registró durante el periodo es de alrededor de  $0.0002\text{g}$  (día 43 del experimento, correspondiente al mes de febrero). Es importante hacer mención del comportamiento de las variables, se aprecia que, cuando el polvo aumenta su acumulación sobre el panel fotovoltaico, se refleja una mayor cantidad de radiación de onda corta hacia el espacio y viceversa.

En la figura 25b se observa que los valores más altos de temperatura se encuentran en los primeros 10 días del periodo de análisis, es decir, a finales de agosto y principios de septiembre, además se observa el descenso en las temperaturas a manera que avanza el tiempo, debido al cambio entre las estaciones de verano a otoño y de otoño a invierno; por parte de la radiación solar se observa que la mayor de las incidencias ( $929\text{ W/m}^2$ ) se obtiene al finalizar el periodo de análisis (que es cercano a la estación de primavera), sin embargo, al inicio del experimento (a finales del mes de agosto) se alcanza alrededor del 92.27% de la radiación solar máxima que se registró, además, se va atenuando conforme avanza el tiempo.

La corriente y la potencia (figura 25c) son dos parámetros de salida del panel fotovoltaico, además, se sabe que son directamente proporcionales, esto se ve reflejado en un comportamiento muy similar para ambas variables, es decir, cuando una aumenta su valor, la otra también lo hace, lo mismo ocurre cuando decrecen. El valor más alto tanto de corriente como de potencia se encuentra en el día 55 (28 de febrero del 2023, último día de la experimentación); el valor más bajo se asocia al día 51 (17 de febrero del 2023), se registró una radiación solar para ese día por debajo de los  $600\text{ W/m}^2$ .

En la serie de tiempo que relaciona a la potencia entregada por el panel fotovoltaico sucio y al polvo depositado sobre los portaobjetos (figura 25d) se puede apreciar su comportamiento, en términos generales, a medida que una de las variables aumenta, la otra disminuye su valor. Los valores máximos se encuentran los días 55 (correspondiente al mes de febrero) y 26 (perteneciente al mes de octubre) para la potencia y el polvo, respectivamente, mientras que los valores mínimos registrados corresponden a los días 51 y 43 (ambos asociados al mes de febrero) para la potencia y el polvo, respectivamente.

Para la potencia del panel sucio y la temperatura ambiente (figura 25e) se observa un comportamiento opuesto entre ambas variables, es decir, cuando la temperatura

aumenta, la potencia se ve reducida y viceversa. Se identifican valores máximos de temperatura que se acercan a los 45 °C (día 10 del experimento, perteneciente al mes de septiembre) mientras que los valores más bajos son de 15 °C aproximadamente (día 49, correspondiente al mes de febrero).

Con respecto a la potencia y el voltaje del panel sucio (figura 25f) se presenta un comportamiento que ilustra la relación directa entre una variable y la otra. Cuando el voltaje aumenta, la potencia también incrementa su valor, y cuando el voltaje se ve reducido, la potencia también disminuye. Los valores más altos de voltaje se aproximan a los 35 V (día 51 del análisis, identificado en el mes de febrero), mientras que el valor más bajo es de alrededor de 27.5 V (día 10 del experimento, perteneciente al mes de septiembre).

Al analizar a la potencia y la radiación de onda corta sobre el panel sucio (figura 25g) se encuentra que el comportamiento entre ambas variables es opuesto en algunos días, es decir, cuando la potencia se ve reducida, la radiación de onda corta que se refleja se ve incrementada, mientras que, cuando la potencia aumenta, la radiación de onda corta reflejada por el panel disminuye. Se registraron valores máximos para la radiación de onda corta reflejada que alcanzan los 36 W/m<sup>2</sup> (transcurridos los 21 días, perteneciente al mes de septiembre), mientras que el valor mínimo fue inferior a los 20 W/m<sup>2</sup> (se encuentra transcurridos 33 días, en el mes de octubre).

Para la potencia del panel sucio y la velocidad de viento (figura 25h) se identificó en términos generales, que cuando la velocidad de viento aumenta, la potencia también incrementa. Se alcanzaron velocidades de viento máximas de 10 m/s (el día 21, identificado en el mes de septiembre) mientras que las más bajas fueron inferiores a 2 m/s y se encontraron en el día 31 del mes de octubre.

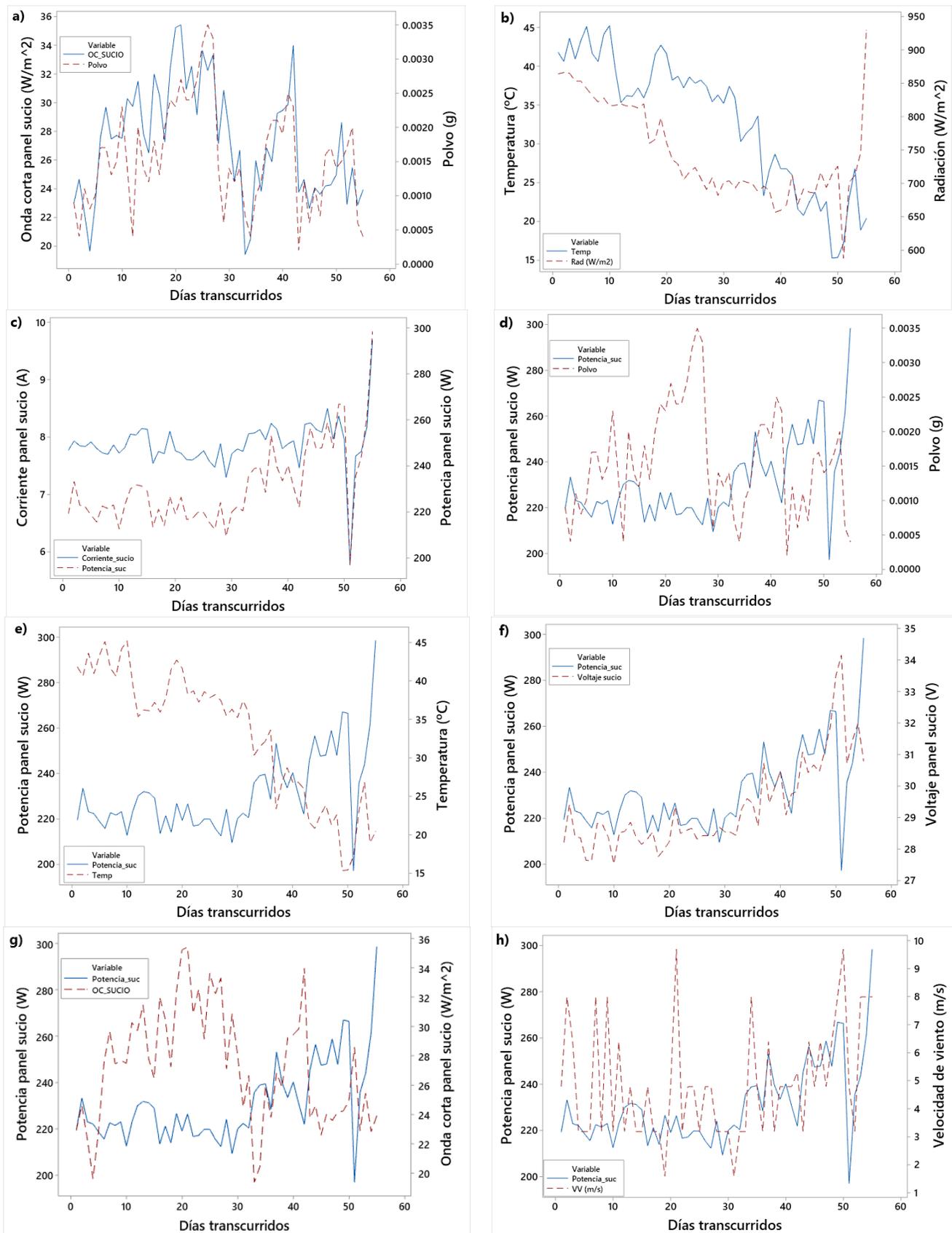


Figura 25. Series de tiempo para las interacciones de mayor importancia. *OC\_sucio* muestra los datos de onda corta reflejada sobre el panel sucio, *Polvo* indica la cantidad de polvo depositada, *Temp* señala la temperatura ambiente, *Rad* indica la radiación solar, *VV* corresponde a velocidad de viento, *Corriente\_sucio*, *Potencia\_suc* y *Voltaje sucio* corresponden a los parámetros fotovoltaicos del panel sucio.

## Capítulo 5. Discusión

### 5.1 Relación monotónica y correlación entre variables

A partir de las gráficas de dispersión y los coeficientes de correlación de Spearman mostrados en el capítulo anterior, es posible interpretar el comportamiento y asociación entre dos variables. Existe una relación monotónica creciente entre la radiación de onda corta y polvo depositado (figura 22a), debido a que a mayores niveles de radiación reflejada por la superficie del panel fotovoltaico habrá una mayor cantidad de polvo depositado en el mismo, se entiende que la capa de polvo formada sobre el panel logra reflejar parte de la radiación solar incidente.

Las correlaciones más bajas corresponden tanto al voltaje vs la humedad relativa como a la corriente vs la radiación solar (figuras 22b y 22c) con valores de -0.163 y -0.01 respectivamente (tabla 5). Ambas gráficas muestran una ligera tendencia decreciente de las variables dependientes, es decir, de la humedad relativa y la radiación solar respectivamente.

Las variables de temperatura ambiente y radiación solar mostraron una relación monotónica positiva (figura 22d) y moderada según la escala de Milton de 0.615 (tabla 5) debido a que, a mayor radiación solar incidente, habrá mayor temperatura ambiente gracias a la transferencia de calor por convección entre la superficie y el aire.

Los parámetros de corriente y potencia del panel fotovoltaico (figura 22e), presentan una pendiente positiva y una correlación moderada de 0.82 (tabla 5), es decir una  $r^2$  de 0.6724, que explica en un 67.24% la variabilidad de la potencia que entrega el panel fotovoltaico a partir de los datos de corriente que entrega el mismo.

La relación entre el polvo depositado sobre la superficie del panel fotovoltaico y la potencia que entrega el mismo (figura 22f) presenta una pendiente negativa y una correlación baja de -0.378 (tabla 5), lo que significa que a mayor cantidad de polvo corresponde un decremento de la potencia del panel.

Las variables de velocidad de viento y voltaje del panel fotovoltaico (figura 22g), presentan una pendiente positiva, así como una correlación moderada de 0.81 (tabla 5), esto se traduce en un aumento en el voltaje cuando existen vientos que ayuden a disipar el calor del equipo y por ende reducir su temperatura.

La mayor de las correlaciones se obtuvo para las variables de velocidad de viento y temperatura ambiente (figura 22h), con una pendiente negativa acompañada de un coeficiente de correlación fuerte de -0.905 (tabla 5), el cual indica que a mayor velocidad de viento le corresponde un descenso en la temperatura ambiente.

Las variables de temperatura ambiente y de potencia de salida del panel fotovoltaico (figura 22a) presentan una pendiente negativa y una correlación moderada de -0.685 (tabla 5) que se traduce en una menor generación de potencia cuando

existen mayores temperaturas, ya que el incremento de calor del aire que rodea el panel favorece a su vez el aumento de su temperatura.

Con respecto a la asociación entre el voltaje y la potencia del panel fotovoltaico (figura 22b) se observa una pendiente positiva y una correlación moderada de 0.723 (tabla 5), esto indica que a mayor voltaje le corresponde una mayor generación de potencia.

La correlación entre las variables de radiación de onda corta y la potencia (figura 22c), presenta una pendiente negativa con una correlación moderada de -0.525 (tabla 5), lo que se traduce en que conforme una mayor cantidad de radiación solar de onda corta se refleje desde la superficie del panel fotovoltaico le corresponde una menor entrega de potencia por parte del equipo.

Las variables de viento y potencia tienen una correlación positiva y moderada de 0.587 (figura 22d y tabla 5), la cual indica que a mayor velocidad de viento en contacto con el panel se le atribuye una generación mayor de potencia (en watts).

Tabla 5. Coeficientes de correlación de Spearman		
Variable independiente	Variable dependiente	Correlación
Polvo	Onda corta	0.716
Voltaje	Humedad relativa	-0.163
Corriente	Radiación solar	-0.010
Temperatura	Radiación solar	0.615
Corriente	Potencia	0.820
Polvo	Potencia	-0.378
Viento	Voltaje	0.810
Viento	Temperatura	-0.905
Temperatura	Potencia	-0.685
Voltaje	Potencia	0.723
Onda corta	Potencia	-0.525
Viento	Potencia	0.587

## 5.2 Regresión lineal múltiple

A partir de la matriz de la figura 20, donde se seleccionaron las variables independientes mejor correlacionadas con la potencia (variable dependiente) para el caso del panel sucio, se generó el siguiente modelo de regresión lineal múltiple, el cual las incorpora y explica cuantitativamente su comportamiento en función de los demás parámetros involucrados.

$$\text{Potencia} = -217.8 + 31.357x_1 + 294x_2 + 6.941x_3 - 0.0815x_4 - 0.0235x_5 + 0.2371x_6 \quad (2)$$

Donde  $x_1$  = corriente del panel sucio (Amperes),  $x_2$  = polvo depositado (en gramos),  $x_3$  = voltaje del panel sucio (Volts),  $x_4$  = temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $x_5$  = radiación de onda corta reflejada ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) y  $x_6$  = velocidad de viento ( $\text{m}/\text{s}$ ). Tanto el coeficiente de correlación (R) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) múltiples, son de 0.9991 y 0.9984 respectivamente.

Debido a que la forma general de la ecuación de regresión es  $Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4 + \beta_5x_5 + \beta_6x_6$ , para interpretar el comportamiento de cada coeficiente  $\beta_i$  de manera individual, se debe mantener como constantes al resto de los coeficientes (De la Fuente Fernández, 2011). Por lo anterior, cada uno representa la variación de la potencia por cada unidad de incremento de la variable independiente que le corresponde, de tal forma que:

- El término  $\beta_1$  indica que un incremento de 1 A en la corriente ( $x_1$ ) se asocia con un aumento de 31.357 Watts en la potencia generada por el panel fotovoltaico; esto se debe por una parte a que la corriente (I) y la potencia (P) se relacionan de manera directa por la ecuación  $P=V \cdot I$ , tal que, a medida que la corriente aumenta (manteniendo constante al voltaje), la potencia incrementará de manera proporcional.
- El término  $\beta_2$  quiere decir que un aumento de 1 g en la deposición de polvo ( $x_2$ ) sobre el panel corresponde a un aumento de 294 Watts en la generación de potencia del panel sucio. Lo que se puede deber a dos factores: 1) que un gramo de polvo no afecta de manera representativa la generación de energía en el panel solar; y 2) a que, en este análisis multivariable, existen otras variables independientes que ejercen una mayor influencia sobre la pérdida de energía. Ambos aspectos se continúan discutiendo más adelante.
- El término  $\beta_3$  significa que un incremento de 1 V en el voltaje ( $x_3$ ) se asocia con un aumento de 6.941 Watts en la potencia que entrega el panel; esto debido a la relación directa entre ambas variables dada por la ecuación  $P=V \cdot I$ . El aumento en la potencia no es tan grande en comparación con el caso de la corriente, esto podría atribuirse a que el voltaje del panel se asocia a los materiales con los que están elaboradas las celdas fotovoltaicas, así como a la manera en que se interconectan (Wenham et al., 2011).
- El término  $\beta_4$  infiere que un aumento de 1  $^{\circ}\text{C}$  en la temperatura ambiente ( $x_4$ ) se asocia con una disminución de 0.0815 Watts de potencia generada por el panel fotovoltaico sucio. El incremento en la temperatura ambiente provoca que el equipo se caliente, reduciendo así su eficiencia de operación (Gopal Nath & Swapnil Dubey, 2010).
- El término  $\beta_5$  establece que un aumento de 1  $\text{W}/\text{m}^2$  en la radiación de onda corta reflejada ( $x_5$ ) por el panel fotovoltaico se asocia con una disminución

de 0.0235 Watts. La onda corta que se refleja es radiación que pudo haberse aprovechado en la conversión de energía por parte del panel solar, y como se comentó anteriormente, este proceso puede estar asociado a la capa de polvo depositada sobre el panel, por lo que podría ser un indicador indirecto de su influencia sobre dicho sistema fotovoltaico.

- El término  $\beta_6$  establece que un aumento de 1 m/s en la velocidad de viento ( $x_6$ ) se asocia con un incremento de 0.2371 Watts. La velocidad del viento es un factor que favorece la remoción del polvo sobre la superficie de los paneles fotovoltaicos, además de que contribuye en reducir la temperatura de éstos.

El coeficiente de determinación múltiple es  $R^2 = 0.9984$ , tal que las variables independientes consideradas en el modelo de regresión lineal pueden explicar el 99.84% de la variabilidad de la potencia. Además, el coeficiente de correlación múltiple  $R = 0.9991$ , respalda la fuerte relación lineal de las variables independientes con la potencia, por lo que, el modelo sugiere que el conjunto de las variables independientes representa de manera confiable la potencia en los periodos en que se tiene mayor incidencia de radiación solar durante el día.

En la tabla 6 se presentan los modelos de regresión múltiple de algunas combinaciones de variables independientes con la potencia, a partir de los cuales se pretende analizar de manera más particular la influencia de pares de estas sobre dicha variable dependiente, sin la influencia de las demás:

Modelo	$X_1$	$X_2$	$R^2$	R
$P=284.44 -1.365x_1 -5315x_2$	Temperatura	Polvo	0.5593	0.7478
$P=375.6 -1.898x_1 -2.79x_2$	Temperatura	Voltaje	0.5180	0.7197
$P=60.3 -1.1911x_1 -26.67x_2$	Temperatura	Corriente	0.9420	0.9705
$P=305.9 -1.301x_1 -1.168x_2$	Temperatura	Onda corta	0.5692	0.7544
$P=260.87 -1.270x_1 +2.48x_2$	Temperatura	Vel. Viento	0.5775	0.7599
$P=46 -6342x_1 +6.65x_2$	Polvo	Voltaje	0.4266	0.6531
$P=3 -3009x_1 +29.56x_2$	Polvo	Corriente	0.6419	0.8011
$P=282.3 -2496x_1 -1.731x_2$	Polvo	Onda corta	0.2237	0.4729
$P=223.32 -8144x_1 +4.194x_2$	Polvo	Viento	0.3775	0.6144
$P=-241.04+7.5471x_1+31.827x_2$	Voltaje	Corriente	0.9979	0.9989
$P=88.5 +6.19x_1 -1.43x_2$	Voltaje	Onda corta	0.4465	0.6682
$P=54.5 +5.65x_1 +2.21x_2$	Voltaje	Viento	0.3972	0.6302
$P=32 +28.4x_1 -0.902x_2$	Corriente	Onda corta	0.6619	0.8135
$P=-9.4 +28.57x_1 +3.156x_2$	Corriente	Vel. Viento	0.7507	0.8664
$P=263.3 -1.914x_1 +4.093x_2$	Onda corta	Vel. Viento	0.4336	0.6584

Se puede identificar que, en las ecuaciones de la tabla donde se considera la influencia del polvo, el término de  $\beta$  asociado a ésta es de signo negativo, lo que indica que por cada aumento de 1g de polvo depositado sobre la superficie del panel fotovoltaico (y manteniendo constante a la otra variable) se reduce la potencia de salida de este. En primera instancia se podría pensar que lo anterior contradice el comportamiento que se observa en la primera ecuación de regresión (aquella que considera a todas las variables independientes seleccionadas previamente), en la que resultaba en un valor positivo, sin embargo, esto último puede ser causado porque en el primer modelo, la temperatura ambiente y la radiación de onda corta tienen una mayor influencia sobre la disminución de la potencia, por lo que sus coeficientes son negativos a comparación del polvo, donde se comentó que 1g del mismo no afectaba la generación de energía. En el caso de los modelos asociados al polvo que se presentan en la Tabla 6, la disminución de variables independientes consideradas en cada ecuación favorece que se visualice de manera cuantitativa el efecto negativo del polvo sobre la potencia.

### 5.3 Comparativa entre valores medidos y calculados

Para comparar la potencia calculada a partir del modelo de regresión múltiple con la potencia medida, se presentan ambas en una gráfica de serie de tiempo, la cual se observa en la figura 26. Recordemos que el error aceptado del modelo es de tan solo 5%, lo que favorece una interpretación más confiable del comportamiento de la potencia calculada (a partir de las variables independientes). Por lo anterior, se identifica que la diferencia entre ambas potencias, tomando como referencia la medida, no rebasa el error aceptado.

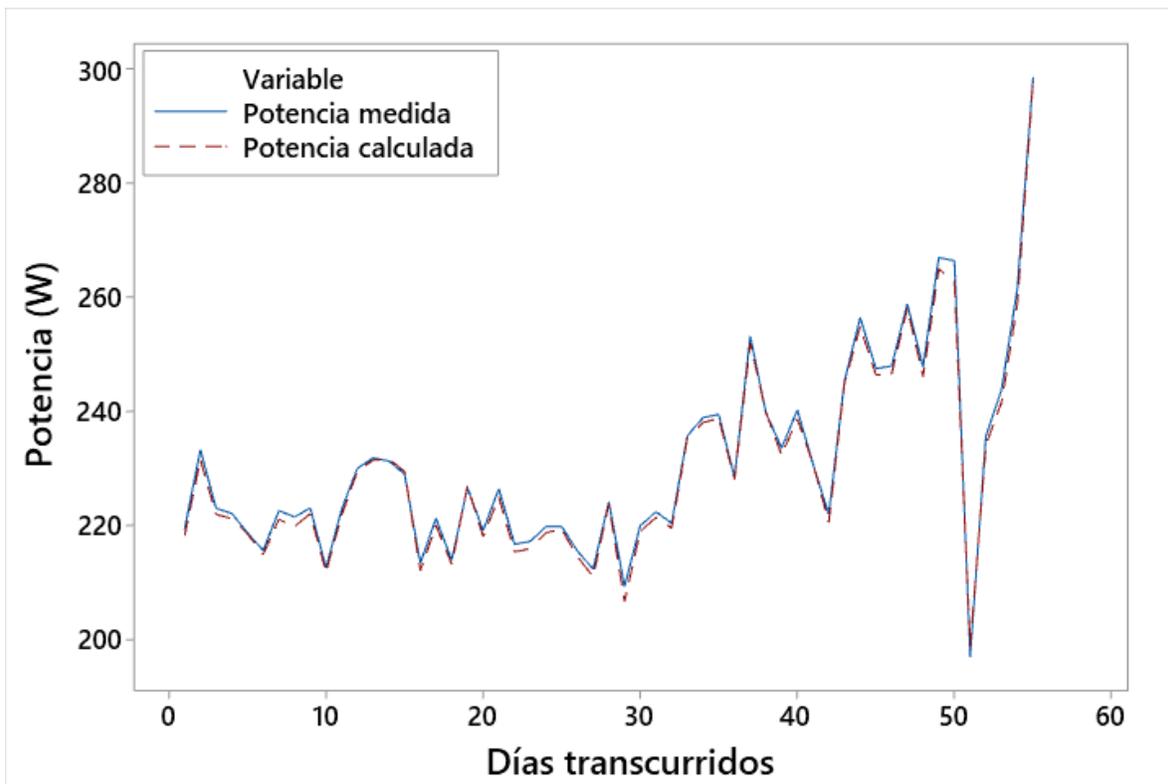


Figura 26. Serie de tiempo: potencia medida vs potencia calculada a partir del modelo propuesto. Ecuación (2).

Con la finalidad de generar comparativas en los resultados, en la tabla 7 se mencionan algunos trabajos de investigación que utilizan ecuaciones de regresión lineal múltiple para relacionar variables meteorológicas y deposición de polvo con la generación de potencia de paneles fotovoltaicos. Los investigadores tomaron como variables dependientes la eficiencia y la reducción de eficiencia de dichos paneles, se sabe que esta variable está relacionada directamente con la potencia de los mismos (De la Cruz Montañez & Bastidas Guzmán, 2020).

En el trabajo realizado por Paudyal y Shakya (2016) se define a la variable dependiente como la reducción de la eficiencia a partir de las variables de temperatura de celda, densidad de polvo depositado, humedad relativa, radiación solar sobre el plano inclinado, lluvia y temperatura ambiente. De su propuesta se destaca que, las variables que favorecen la pérdida de eficiencia del panel solar son la temperatura de celda, la densidad de polvo y la humedad relativa.

Por otra parte, en la investigación de Al-Kouz et al (2019) se propone un modelo, indicando que la eficiencia del panel se ve afectada por el tiempo de exposición a las condiciones ambientales y por la temperatura ambiente.

El modelo que se propone en el presente documento indica que, tanto la temperatura ambiente, como la radiación de onda corta reflejada son los principales factores que reducen la generación de potencia del panel solar. La identificación de las clases de estabilidad atmosférica ayudó a profundizar en la explicación sobre la relación que guardan las variables meteorológicas y el polvo sobre la potencia de salida del panel.

Tabla 7. Comparativa entre ecuaciones de regresión múltiple.

Autor	Modelo	Variabes	R <sup>2</sup>
Paudyal B, Shakya S (2016)	$Y=8.1887-0.04343X_1-0.1602X_2-0.1093X_3+0.0315X_4+0.0323X_5+0.3949X_6$	Y=Reducción de la eficiencia X <sub>1</sub> =Temperatura de celda X <sub>2</sub> =Densidad de deposición X <sub>3</sub> =Humedad relativa X <sub>4</sub> =Radiación inclinada X <sub>5</sub> =Lluvia X <sub>6</sub> =Temperatura ambiente	0.8155
Al-Kouz et al (2019)	$\eta_i=16.0513-0.024133D_i-0.078743T_i$	$\eta_i$ = Eficiencia diaria D <sub>i</sub> =Día de exposición T <sub>i</sub> =Temperatura ambiente promedio diaria	0.877
Esta investigación	$Y=-217.8+31.657X_1+294X_2+6.941X_3-0.0815X_4-0.0235X_5+0.2371X_6$	Y= Potencia X <sub>1</sub> = Corriente X <sub>2</sub> = Polvo depositado X <sub>3</sub> = Voltaje X <sub>4</sub> = Temperatura X <sub>5</sub> = Radiación de onda corta X <sub>6</sub> = Velocidad de viento	0.9984

## 5.4 Comparativa de los resultados de estabilidad entre los métodos de Pasquill-Gifford y Monin-Obukhov

El método de Pasquill-Gifford establece las categorías para las diferentes clases de estabilidad atmosférica a partir de datos meteorológicos de radiación solar (que favorece la turbulencia convectiva) y velocidad de viento (que favorece la turbulencia mecánica).

Por otra parte, el método de Monin-Obukhov se basa en el concepto de la capa límite atmosférica, que es la capa de la atmósfera más cercana a la superficie terrestre donde hay mayor interacción entre ésta y las masas de aire. Este método utiliza un parámetro adimensional denominado “Longitud de Monin-Obukhov” ( $L$ ), que refleja la relación entre la turbulencia y las clases de estabilidad atmosférica.  $L$  es positivo para cuando se presentan condiciones de estabilidad y negativo para condiciones de inestabilidad.

Es importante mencionar que la variable asociada al método de Monin-Obukhov ( $L$ ) no se consideró dentro del modelo de regresión debido a que no se contaba con información completa de los parámetros meteorológicos involucrados en su cálculo para todo el periodo de estudio.

La longitud de Monin-Obukhov está dada por la siguiente ecuación:

$$L = -\frac{\rho C_p T u^3}{kg Q_H} \quad (3)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire seco ( $1.2 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $T$  es la temperatura (en K),  $u$  es la velocidad de fricción (en m/s),  $C_p$  es la capacidad calorífica del aire a presión constante ( $1,010 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  $k$  es la constante de Von Karman (0.4),  $g$  es la constante de gravitación ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) y  $Q_H$  es el flujo de calor sensible ( $\text{W/m}^2$ ) (Flores-Jiménez et al., 2021). Los datos para las variables de temperatura, velocidad de fricción y flujo de calor sensible se tomaron de la torre meteorológica ubicada en la azotea del Instituto de Ingeniería.

Es posible relacionar las clases de estabilidad definidas por Pasquill-Gifford con la inversa de la longitud de Monin-Obukhov debido a que en ambos métodos se consideran tanto la turbulencia convectiva como la mecánica. Con base en lo anterior, se obtiene la siguiente relación entre ambos métodos (Flores-Jiménez et al., 2021):

Tabla 8. Relación entre la clasificación de Pasquill-Gifford y los rangos de la inversa de la longitud de Monin-Obukhov	
Clase de Pasquill-Gifford	Rangos de 1/L
A	$1/L < -0.056$
B	$-0.056 \leq 1/L < -0.016$
C	$-0.016 \leq 1/L < -0.004$
D	$-0.004 \leq 1/L < -0.002$
E	$-0.002 \leq 1/L < -0.006$
F	$-0.056 \leq 1/L < -0.022$
G	$0.022 \leq 1/L$

Para continuar con la comparativa entre el método de Pasquill-Gifford y el de Monin-Obukhov y con información de los sensores correspondientes ubicados en la torre meteorológica del Instituto de Ingeniería, se generaron gráficas de serie de tiempo para aquellas variables que considera cada método y que tienen relación, éstas son: la velocidad de viento (wind) y la velocidad de fricción ( $u_{star}$ ); el flujo de calor sensible y la radiación solar; y la temperatura y la radiación solar. A partir de esta información se generó la Tabla 9:

Tabla 9. Coeficientes de correlación (método de Pearson)					
Velocidad de viento	Velocidad de fricción	Flujo de calor sensible	Radiación solar	Temperatura	Radiación solar
0.577		0.518		0.775	

Para las variables de velocidad de viento y velocidad de fricción se obtuvo una correlación positiva entre ambas variables (Tabla 9), lo que se traduce en un patrón de comportamiento similar entre ellas, es decir, cuando una aumenta su valor, la otra también lo hace y viceversa (Figura 27). La diferencia entre las magnitudes se debe a que la velocidad de fricción ocurre muy cerca de la superficie del suelo y se ve afectada por cualquier protuberancia u obstáculo sobre el mismo.

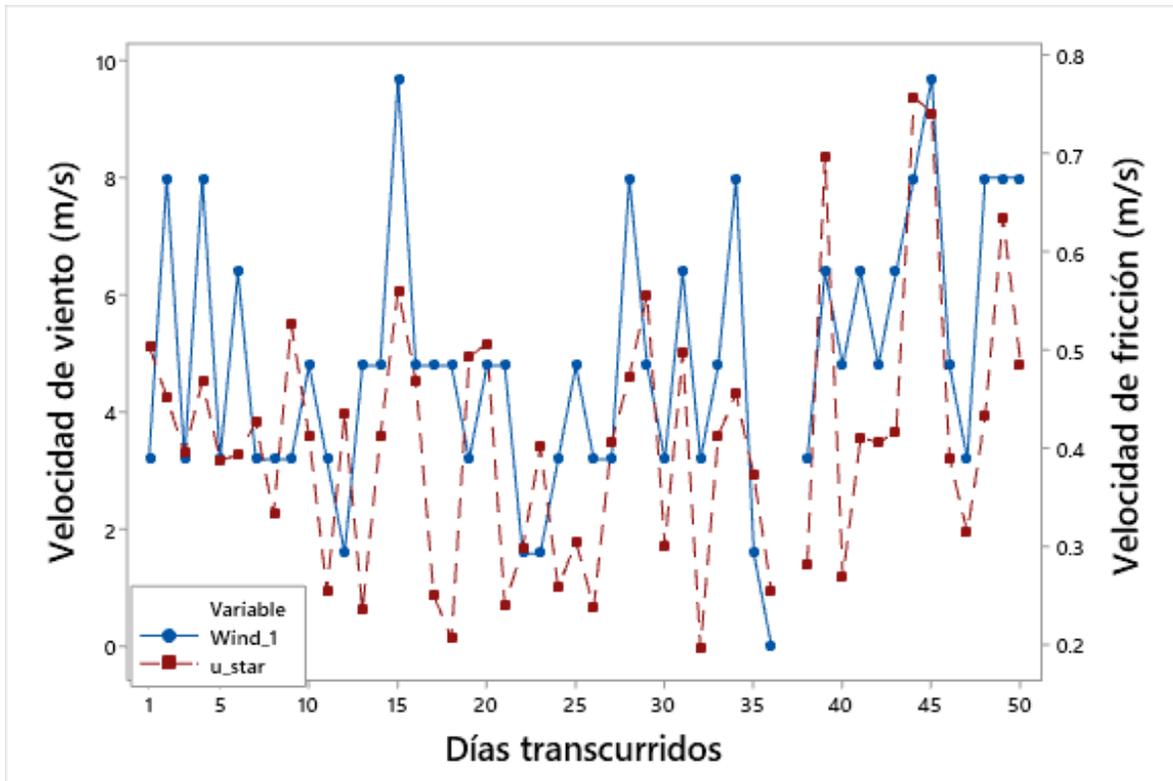


Figura 27. Serie de tiempo: comparativa entre velocidad de viento de la estación meteorológica y velocidad de fricción. El color azul corresponde a la velocidad de viento (*wind\_1*) mientras que el rojo a la velocidad de fricción (*u\_star*).

En la figura 28 se presenta la gráfica de flujo de calor sensible y radiación solar, de esta se destaca que cuando una de las variables aumenta o disminuye su valor, la otra también lo hace en mayor o menor medida. Esto se debe a que la energía que aporta la radiación solar se transfiere en forma de calor de un objeto a otro (flujo de calor sensible). Otro aspecto para destacar es la tendencia de los datos al decremento que se observa de agosto a octubre (del primer día transcurrido hasta el día 39), así como la tendencia al crecimiento de principios de febrero hasta finales del mismo (a partir del dato 40).

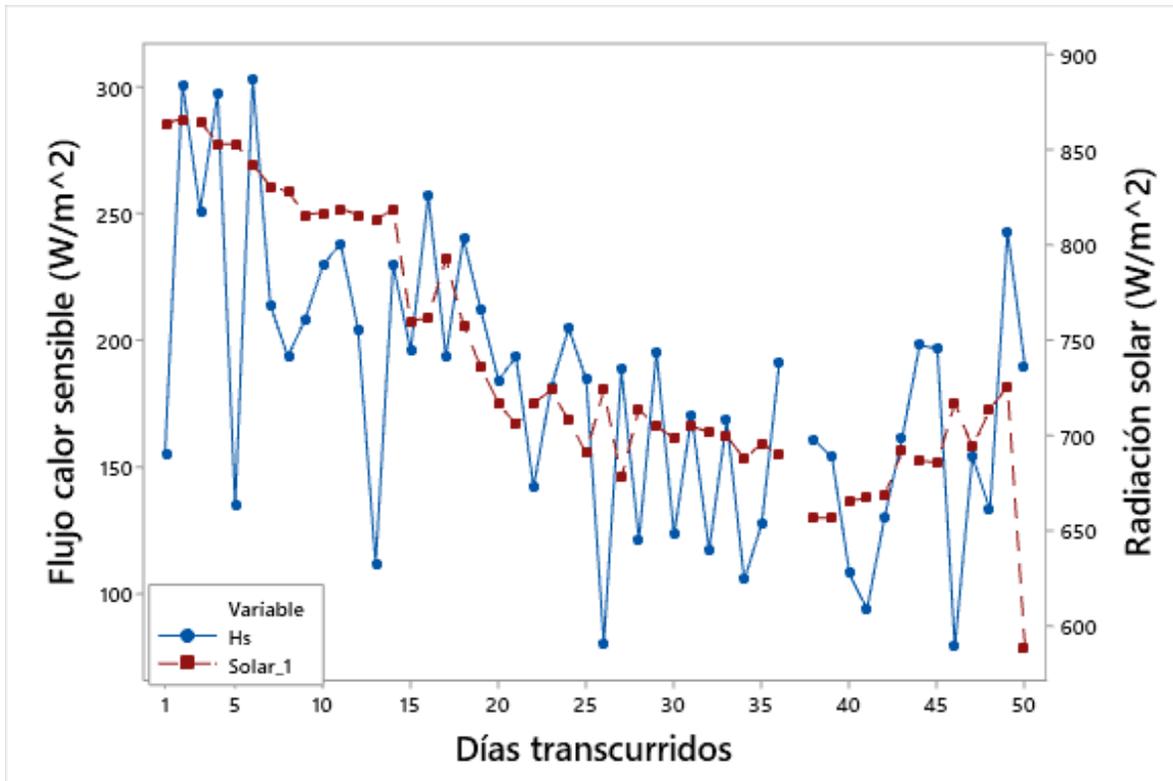


Figura 28. Serie de tiempo: comparativa entre flujo de calor sensible y radiación solar. El color azul corresponde al flujo de calor sensible y el color rojo a la radiación solar.

La mayor de las correlaciones se observa en la interacción entre la temperatura y la radiación solar (figura 29), al ser positiva indica que cuando una de las variables aumenta o disminuye su valor, la otra también lo hace. Se entiende que cuando la radiación solar incidente se intensifica, la temperatura tiende a aumentar. El proceso opuesto se puede deber a la presencia de días nublados o con poca radiación debido a algún cambio estacional.

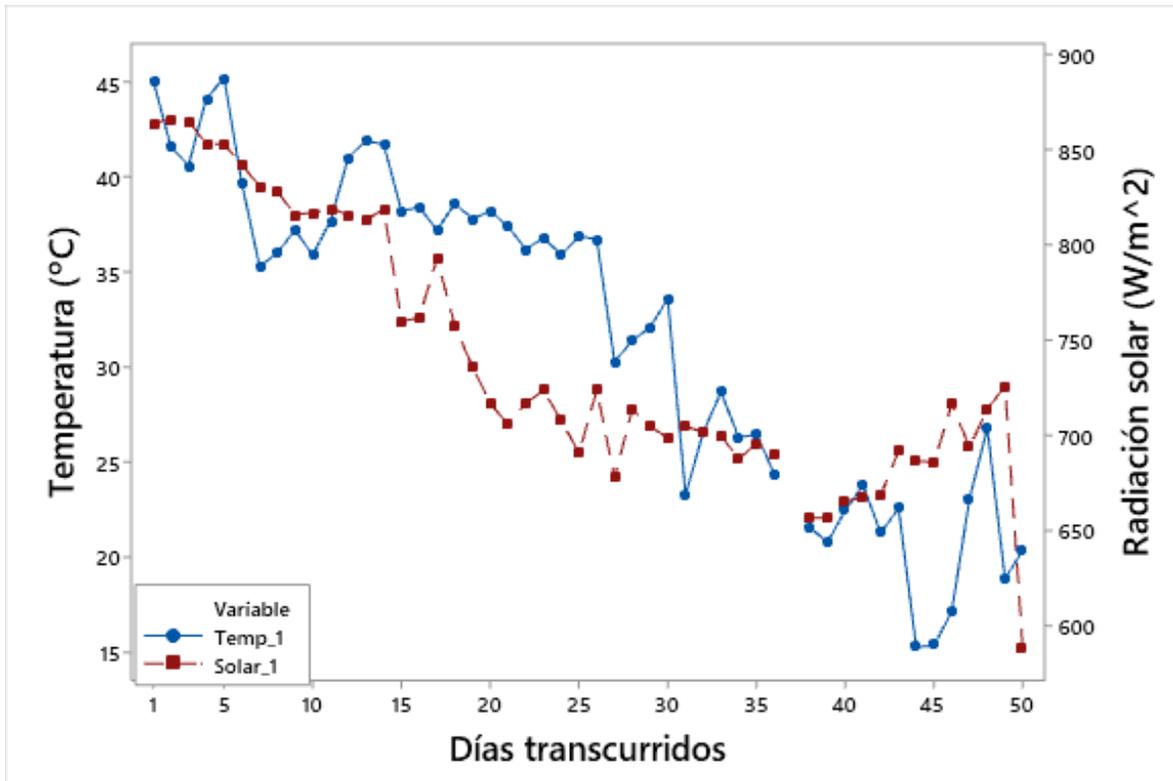


Figura 29. Serie de tiempo: comparativa entre temperatura y radiación solar. El color azul corresponde a la temperatura ambiente y el color rojo a la radiación solar.

Partiendo de que existen diversos métodos para determinar la estabilidad atmosférica, es importante comparar por lo menos aquellos que se utilizaron a lo largo de esta investigación, es decir, el de Pasquill-Gifford (Figura 23) y el de Monin-Obukhov (Figura 30). Éste último, presenta nula variabilidad en las condiciones de la turbulencia atmosférica porque indica una fuerte inestabilidad durante el periodo de análisis, por ende, la clasificación que se le asigna en equivalente a la escala de Pasquill-Gifford es “A – Muy inestable”.

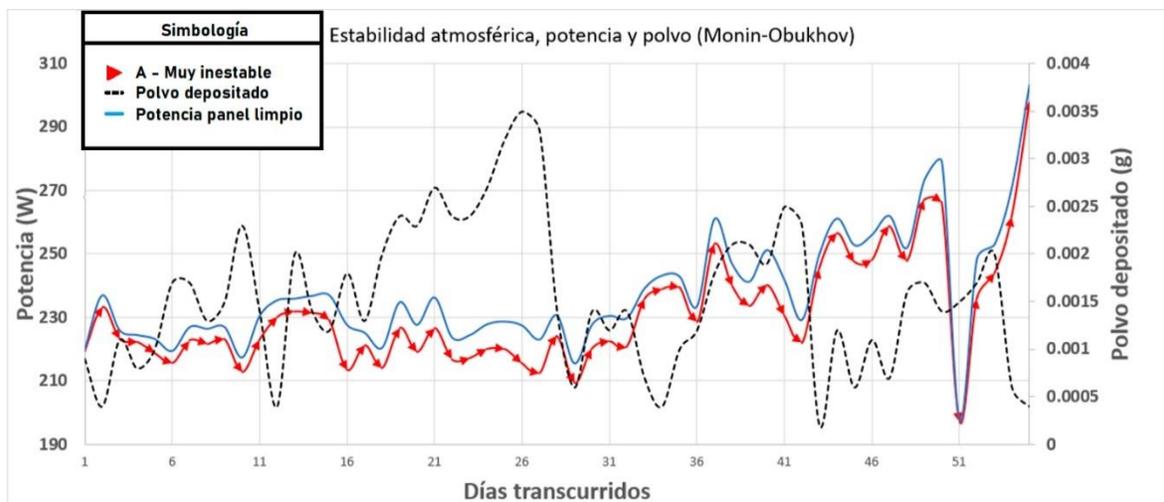


Figura 30. Serie de tiempo: estabilidad atmosférica con el método de Monin-Obukhov, potencia (panel sucio y panel limpio con líneas de color rojo y azul respectivamente) y polvo. Los días transcurridos del 1 al 6 pertenecen al mes de agosto, del 7 al 23 corresponden a septiembre, del 24 al 42 comprenden al mes de octubre y, del 43 al 55 a febrero.

## Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

El análisis de las clases de estabilidad atmosférica utilizando el método de Pasquill-Gifford, ha demostrado ser una herramienta efectiva para explicar cualitativamente el comportamiento diario del polvo y su deposición en los paneles fotovoltaicos, principalmente cuando las condiciones atmosféricas son inestables y favorecen el aumento de la turbulencia por acción de la radiación solar y la temperatura. Esta información es crucial para comprender y explicar los efectos del material particulado en el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos.

En este trabajo se documentaron las variaciones de los parámetros fotovoltaicos, las variables meteorológicas, la radiación de onda corta reflejada y la deposición de polvo a lo largo del periodo de estudio. La herramienta que se desarrolló para determinar las condiciones de estabilidad atmosférica mediante el método de Pasquill-Gifford se registró ante INDAUTOR con número de registro 03-2023-092112234500-01, lo que respalda la originalidad y la relevancia de la investigación realizada.

La afectación del polvo en los sistemas fotovoltaicos, desde la perspectiva de las clases de estabilidad atmosférica, ha ampliado el conocimiento existente sobre los factores que influyen en el rendimiento de los paneles solares, esto debido a que metodologías como la de Pasquill-Gifford y la de Monin-Obukhov permiten identificar cómo la velocidad del viento o la velocidad de fricción (turbulencia

mecánica), y la radiación solar y el flujo de calor sensible (turbulencia convectiva), influyen respectivamente en las variaciones de temperatura y en la generación de potencia a través de dichos sistemas generadores de energía. Se encontró una disminución de hasta 6.18% en la potencia del panel sucio.

Mediante la creación de un modelo de regresión lineal múltiple, se logró desarrollar una relación cuantitativa entre la potencia generada por los paneles fotovoltaicos en las horas de mayor aprovechamiento solar, las variables meteorológicas, la presencia de polvo y los parámetros de salida del panel fotovoltaico como la corriente y el voltaje.

Este modelo demostró que considerando un error del 5%, se puede obtener una predicción confiable del rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en los periodos de mayor radiación solar, bajo diferentes condiciones atmosféricas y de deposición de polvo

La comparación de los resultados obtenidos con los de otros autores reveló que el modelo propuesto en este trabajo muestra una mayor fiabilidad, alcanzando un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.9984, el cual resulta superior al de trabajos que consideran otros aspectos. Esto destaca su utilidad como herramienta predictiva para evaluar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en presencia de polvo y bajo diferentes condiciones meteorológicas y de clases de estabilidad atmosférica. Con esto, se da respuesta a la hipótesis planteada al inicio del documento.

A pesar de que los datos de polvo registraron valores muy pequeños, su variabilidad durante el periodo de estudio permitió identificar asociaciones estadísticas importantes con las demás variables independientes y con la potencia. De tal forma que, como primera aproximación se logró representar adecuadamente cómo sería su influencia sobre la superficie del panel.

La generación de modelos de regresión lineal múltiple sienta las bases para el desarrollo de modelos más sofisticados, como regresiones no lineales, redes neuronales u otras técnicas de aprendizaje automático avanzadas. Al incorporar un mayor número de variables, mediciones horarias en periodos más extensos y considerar relaciones no lineales, estos modelos pueden capturar aún más matices y patrones en los datos, mejorando la precisión de las predicciones.

## Recomendaciones

- Considerar los parámetros de nubosidad para mejorar la identificación de las clases de estabilidad atmosférica con el método de Pasquill-Gifford.
- Como área de oportunidad sería interesante diseñar un experimento donde se recolecten muestras de polvo directamente sobre el panel sin que el

mecanismo utilizado para tal propósito afecte a la incidencia de radiación solar sobre el mismo.

- Se recomienda considerar la variabilidad del ángulo de la altura solar a lo largo del año para mejorar la fiabilidad de los modelos.
- Considerar la implementación de un seguidor de potencia para la adquisición de datos fotovoltaicos de manera constante, generando bases de datos con más información de manera continua a lo largo del día para analizarlos en función de los parámetros meteorológicos, el polvo y la estabilidad atmosférica.
- La elaboración de modelos de regresión para las distintas estaciones del año considerando una mayor cantidad de datos muestrales.

## Referencias

- Adler, F., Berardi, M., García Pedrosa, M., Monticelli, F., & Morquecho, M. (2013). *Energía solar fotovoltaica. Notas del curso Instalaciones Industriales Universidad Nacional de Mar de Plata.*
- Ahrens C. Donald. (2009). *Meteorology Today* (Ninth Edition).
- Al-Housani, M., Bicer, Y., & Koç, M. (2019). Experimental investigations on PV cleaning of large-scale solar power plants in desert climates: Comparison of cleaning techniques for drone retrofitting. *Energy Conversion and Management*, 185, 800–815. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.058>
- Arias, R. M., & Pérez, I. (2017). Nueva metodología para determinar los parámetros de un módulo fotovoltaico. *Ingeniería Energética*, 39(1), 38–47. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59012018000100006&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012018000100006&nrm=iso)
- Arturo, F., Lamadrid, V., Nieto, E. P., Custodio, T. C., Alamán, R. P., Abraham, E., Galindo, G., Palmeros, M. G., Patricia, A., Bolívar, M., Orel, A., & Camarena, B. (2018). *Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Baja California.*
- Bull, S. R. (2001). *Renewable Energy Today and Tomorrow.*
- Campbell Scientific. (2018). *Operator's Manual CR3000 Micrologger.* [www.campbellsci.co.uk](http://www.campbellsci.co.uk)
- Canales-Rodríguez, M. A., Quintero-Núñez, M., Castro-Romero, T. G., & García-Cuento, R. O. (2014). Las partículas respirables PM10 y su composición química en la zona Urbana y rural de Mexicali, Baja California en México. *Informacion Tecnologica*, 25(6), 13–22. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000600003>
- Chanduvi Palacios, J. A. (2019). *Diseño implementación y prueba de un controlador de carga de batería para un sistema solar.* Universidad Nacional de Piura.
- Cook, G., Billman, L., Adcock Typography, R., Szczepanski Cover Design, S., Szczepanski, S., David Editing, R., Pitchford, P., Jones, J., Glenn, B., & Thomas, M. (1990). *Photovoltaic Fundamentals (Revised).*
- Czarnecka, M., & Nidzgorska-Lencewicz, J. (2017). The impact of thermal inversion on the variability of PM10 concentration in winter seasons in Tricity. *Environment Protection Engineering*, 44(2), 157–172. <https://doi.org/10.5277/epe170213>
- Darwish, Z., Kazem, H., Sopian, K., Alghoul, M., & Chaichan, M. (2013). Impact of some environmental variables with dust on solar photovoltaic (PV) performance:

- review and research status. *International J of Energy and Environment*, 7(4), 152–159.
- Davis Instruments. (2014). *User Manual for Vantage Pro2 and Vantage Pro2 Plus Weather Stations*. <https://www.davisinstruments.com/legal>.
- De la Cruz Montañez, J. W., & Bastidas Guzmán, Y. M. (2020). *Evaluación de tres modelos matemáticos de la eficiencia de un panel fotovoltaico*.
- De la Fuente Fernández, S. (2011). *Regresión Lineal Múltiple Santiago de la Fuente Fernández*. Fac. Ciencias Económicas y Empresariales.
- Edenhofer, O., Madrugá, R. P., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., & von Stechow, C. (2011). Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change. In *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139151153>
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 39, pp. 748–764). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113>
- Eraso, F. J., Erazo, O. F., & Escobar, E. (2019). Model for electric power estimation in photovoltaic silicon modules. *Ingeniare*, 27(2), 188–196. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000200188>
- Flohn, H., & Penndorf, R. (1950). *American Meteorological Society The Stratification of the Atmosphere*. 71–78.
- Flores-Jiménez, D. E., García-Cueto, O. R., Santillán-Soto, N., López-Velázquez, J. E., & Camargo-Bravo, A. (2021). Influence of mixing height and atmospheric stability conditions on correlation of NO<sub>2</sub> columns and surface concentrations in a Mexico-United States border region. *Atmospheric Science Letters*, 22(6), 1–12. <https://doi.org/10.1002/asl.1024>
- Gobierno del Estado de Baja California, & SEMARNAT. (2011). Programa para mejorar la calidad del aire en Mexicali 2011-2020. *Gobierno Del Estado de Baja California*, 32–123. [http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/gestionambiental/calidadaddel aire/Documents/Calidad del aire/Proaires/ProAires\\_Vigentes/ProAire Mexicali 2011-2020.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/gestionambiental/calidadaddel aire/Documents/Calidad del aire/Proaires/ProAires_Vigentes/ProAire Mexicali 2011-2020.pdf)
- González Támara, L. (2017). Análisis exploratorio de datos. In *Análisis exploratoria de datos*. Universidad Jorge Tadeo Lozano. <https://doi.org/10.2307/j.ctvc5pc9g>

- Goossens, D., & Van Kerschaever, E. (1999). *AEOLIAN DUST DEPOSITION ON PHOTOVOLTAIC SOLAR CELLS: THE EFFECTS OF WIND VELOCITY AND AIRBORNE DUST CONCENTRATION ON CELL PERFORMANCE* (Vol. 66, Issue 4). [www.elsevier.com/locate/solener](http://www.elsevier.com/locate/solener)
- Gopal Nath, T., & Swapnil Dubey. (2010). *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications*. <http://www.rsc.org/Shop/Books/>
- Gramsch, E., Cáceres, D., Oyola, P., Reyes, F., Vásquez, Y., Rubio, M. A., & Sánchez, G. (2014). Influence of surface and subsidence thermal inversion on PM 2.5 and black carbon concentration. *Atmospheric Environment*, 98, 290–298. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.066>
- Grantz, D. A., Garner, J. H. B., & Johnson, D. W. (2003). Ecological effects of particulate matter. In *Environment International* (Vol. 29, Issues 2–3, pp. 213–239). Elsevier Ltd. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00181-2](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00181-2)
- Green, M. A. (2005). Silicon photovoltaic modules: A brief history of the first 50 years. In *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* (Vol. 13, Issue 5, pp. 447–455). <https://doi.org/10.1002/pip.612>
- Hersch, P., Zweibel, K., & Energy Research Institute, S. (1982). *Basic Photovoltaic Principles and Methods*.
- IRENA. (2022). *Renewable Energy Statistics 2022*. [www.irena.org](http://www.irena.org)
- Klassen, S., & Bugbee, B. (2005). Shortwave Radiation. In *Micrometeorology in agricultural systems* (pp. 43–57).
- Mohan, M., & Siddiqui, T. A. (1998). ANALYSIS OF VARIOUS SCHEMES FOR THE ESTIMATION OF ATMOSPHERIC STABILITY CLASSIFICATION. In *Atmospheric Environment* (Vol. 32, Issue 21).
- Mohan, M., & Siddiqui, T. A. (1998). ANALYSIS OF VARIOUS SCHEMES FOR THE ESTIMATION OF ATMOSPHERIC STABILITY CLASSIFICATION. In *Atmospheric Environment* (Vol. 32, Issue 21).
- Oliver, E. J. (2005). *Encyclopedia of world climatology*.
- Paudyal, B. R., & Shakya, S. R. (2016). Dust accumulation effects on efficiency of solar PV modules for off grid purpose: A case study of Kathmandu. *Solar Energy*, 135, 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.046>
- Perrino, C., Catrambone, M., & Pietrodangelo, A. (2008). Influence of atmospheric stability on the mass concentration and chemical composition of atmospheric particles: A case study in Rome, Italy. *Environment International*, 34(5), 621–628. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.12.006>

- Prinsloo, G., & Dobson, R. (2015). SOLAR TRACKING. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4265.6329/1>
- Pye, K., & Tsoar, H. (1987). *The mechanics and geological implications of dust transport and deposition in deserts with particular reference to loess formation and dune sand diagenesis in the northern Negev, Israel*. <http://sp.lyellcollection.org/>
- Remaggi, J., & Jiménez, J. (2019). Impacto de la contaminación por material particulado sobre las atenciones de urgencias por causas respiratorias en Chillán, Concepción y Los Ángeles Impact of pollution by particulate matter on emergency room admissions for respiratory causes in Chillán, Concepción, and Los Ángeles, Chile tRAbAjo oRiginAL. In *Rev Chil Enferm Respir* (Vol. 35).
- Russell, A. G., & Brunekreef, B. (2009). A focus on particulate matter and health. In *Environmental Science and Technology* (Vol. 43, Issue 13, pp. 4620–4625). <https://doi.org/10.1021/es9005459>
- Said, S. A. M., & Walwil, H. M. (2014). Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance. *Solar Energy*, 107, 328–337. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.048>
- Santillán-Soto, N., García-Cueto, R., Haro-Rincón, Z., Ojeda-Benítez, S., Quintero-Núñez, M., & Velázquez-Limón, N. (2015). Radiation balance of urban materials and their thermal impact in semi-desert region: Mexicali, México study case. *Atmosphere*, 6(10), 1578–1589. <https://doi.org/10.3390/atmos6101578>
- Secretaría de salud. (2021). *Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM10 y PM2.5. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. (NOM-025-SSA1-2021)*. <https://www.sinec.gob.mx/SINEC/Vista/Normalizacion/DetalleNorma.xhtml?pidn=RCtySTBQV0JnOUZMajVucHpMMTJoQT09>
- Sulaiman, S. A., Singh, A. K., Mokhtar, M. M. M., & Bou-Rabee, M. A. (2014). Influence of dirt accumulation on performance of PV panels. *Energy Procedia*, 50, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.006>
- Szep, R., Keresztes, R., Korodi, A., Tonk, S., & Craciun, E. (2017). Study of Air Pollution and Atmospheric Stability in Ciuc Basin-Romania. In *REV.CHIM.(Bucharest)♦* (Vol. 68, Issue 8). <http://www.revistadechimie.ro>
- Thistle, H. W. (1996). ATMOSPHERIC STABILITY AND THE DISPERSION OF PESTICIDES. In *Journal of the American Mosquito Control Association* (Vol. 12, Issue 2).

Torres, M., Paz, K., & Salazar, F. G. (2006). Tamaño de una muestra para una investigación de mercado. In *Boletín Electrónico No.02* (Boletín Electrónico No.02).

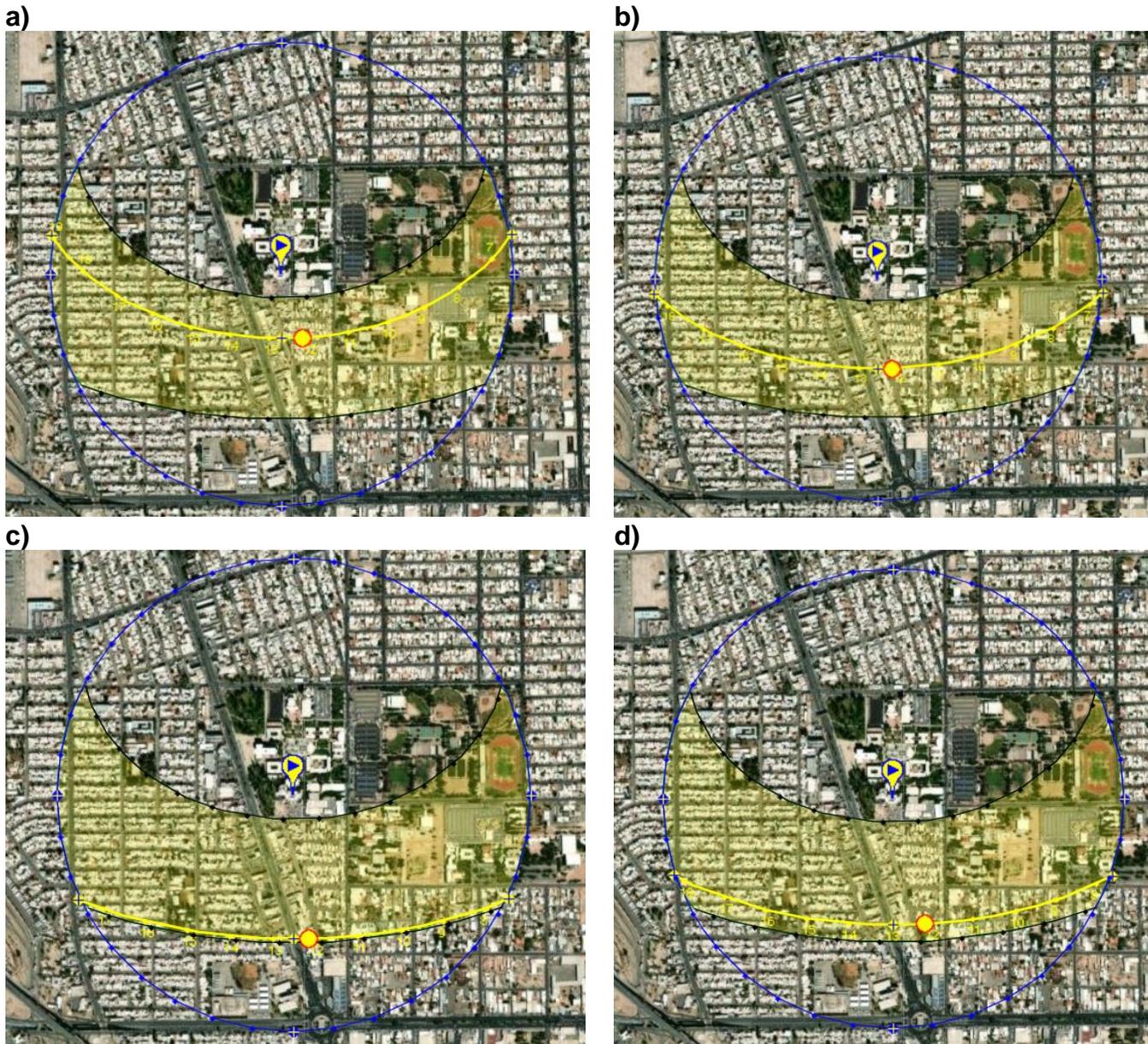
UABC. (2023). *Obra Indautor titulada: PROGRAMA PARA DETERMINAR LA ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA APLICANDO LOS MÉTODOS DE PASQUILL-GIFFORD Y MONIN-Obukhov*. Número de registro: 03-2023-092112234500-01. Autores de la Obra: Flores Jiménez David Enrique, Oblea Ortega Edgar Daniel, Santillán Soto Néstor, López Velázquez José Ernesto, Ojeda Benítez Sara, Cruz Sotelo Samantha Eugenia

Wenham, S. R., Green, M. A., Watt, M. E., Corkish, R., & Sproul, A. (2011). *Applied Photovoltaics Third Edition*.

## Apéndice

### Altura solar

Como se comentó anteriormente en la metodología, la altura máxima que alcanza el sol con respecto al suelo (altura solar) varía a lo largo del año y según la latitud del lugar. A continuación, se presentan algunas imágenes que ayudan a complementar la comprensión de este fenómeno:



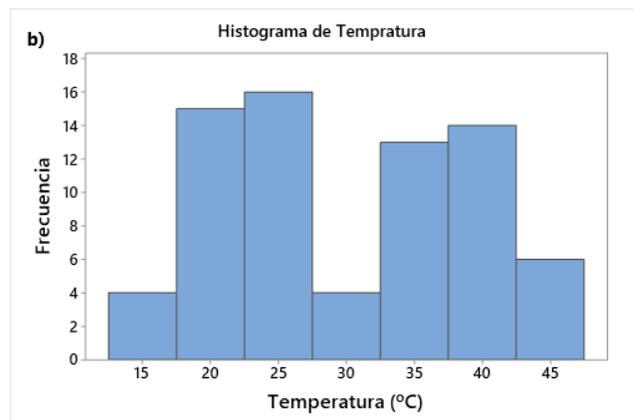
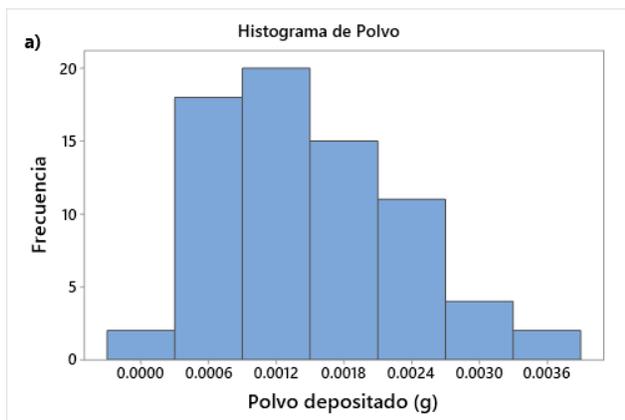
En las imágenes satelitales correspondientes al Instituto de Ingeniería de UABC, campus Mexicali se muestra el movimiento aparente del sol para los meses de septiembre (a), octubre (b), diciembre (c) y febrero (d), donde éste último mes

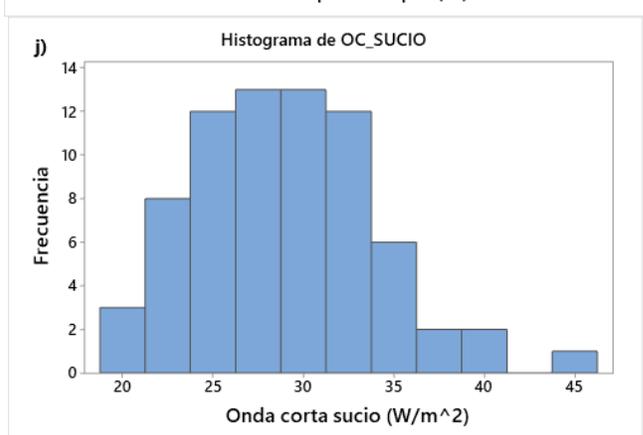
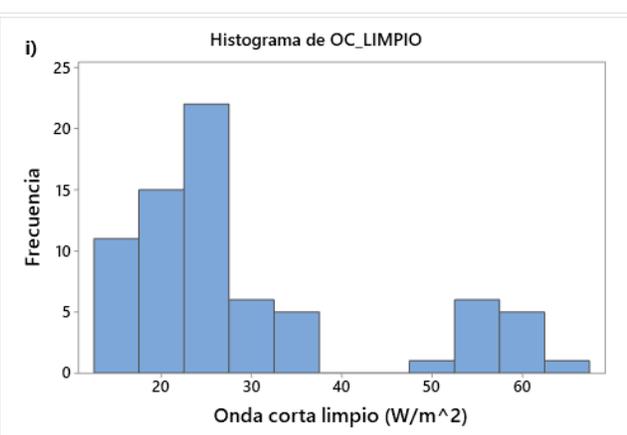
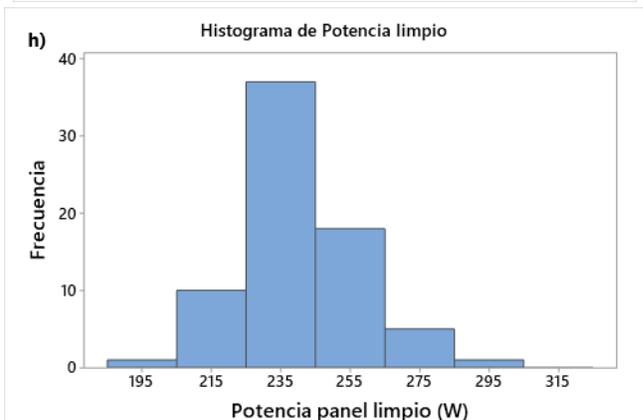
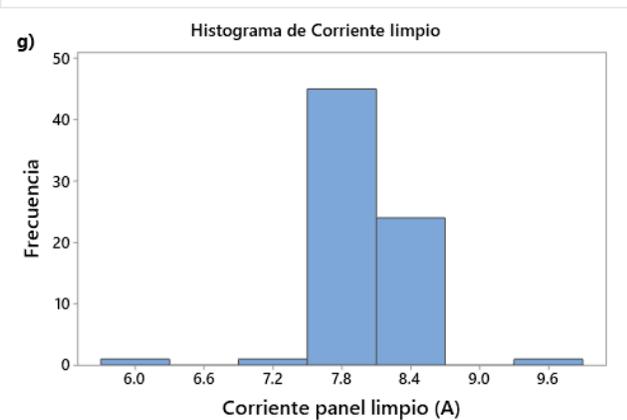
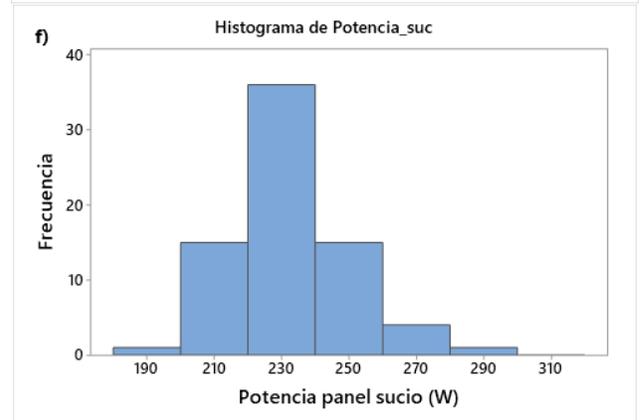
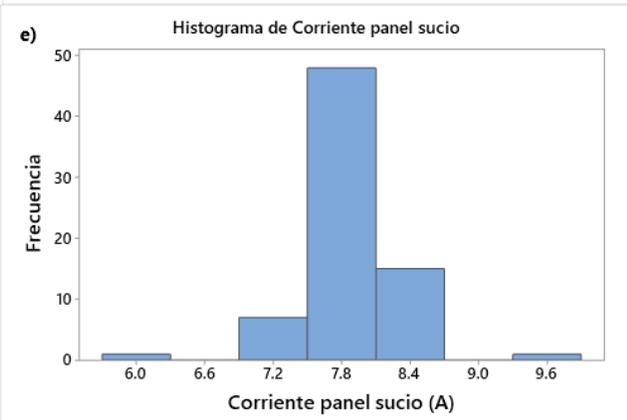
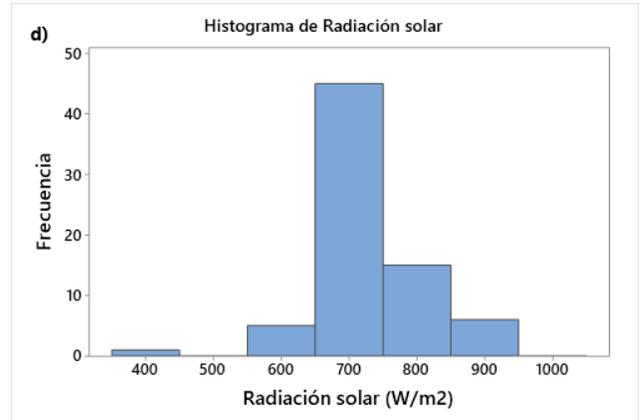
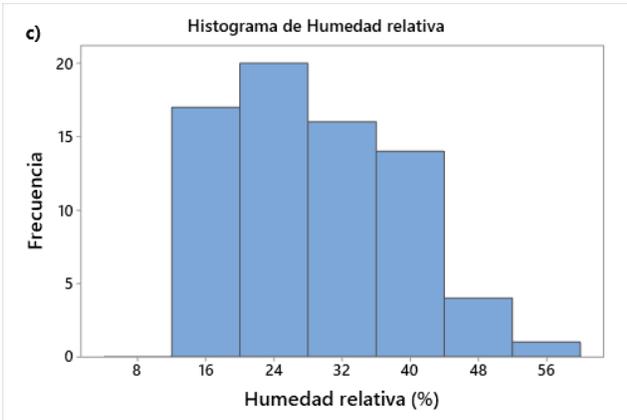
pertenece al año 2023, mientras que el resto de las imágenes pertenecen al año 2022. Se observa que a medida que avanza el tiempo (de septiembre a diciembre) la altura máxima del sol se ve reducida, mientras que al llegar al mes de febrero comienza a incrementar.

### Estadística básica

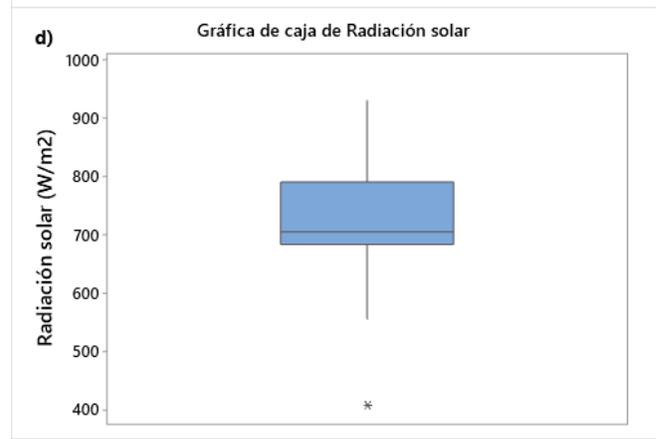
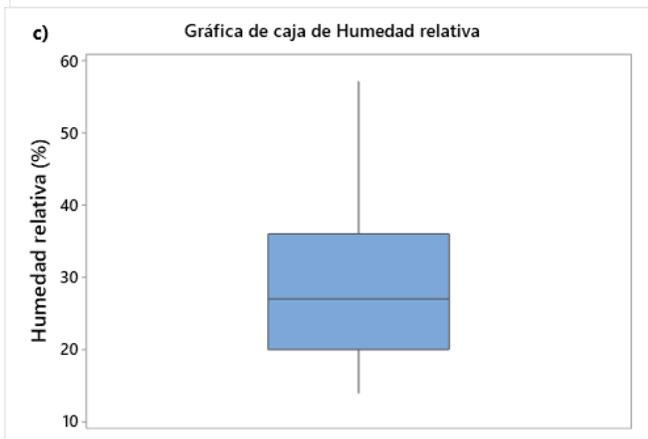
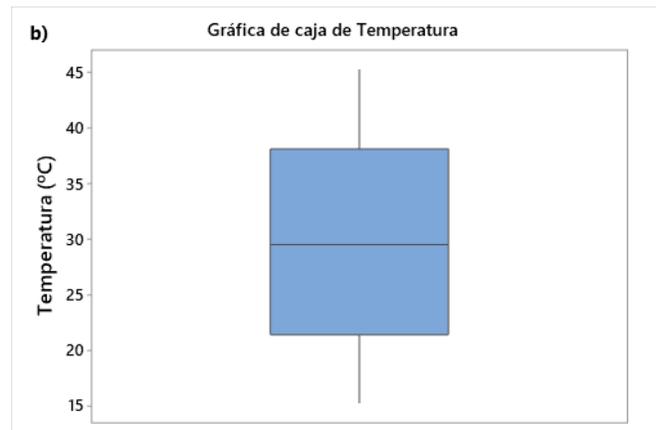
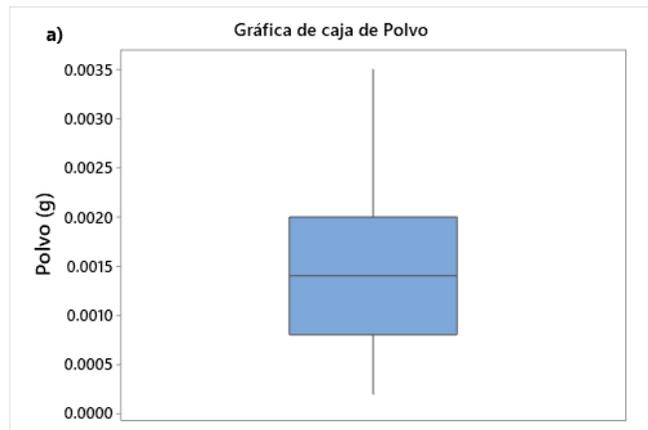
A manera de continuar con la discusión de los resultados y como información extra, en esta sección se presenta la estadística básica para todos aquellos valores que se midieron, incluyendo aquellos que fueron descartados según los criterios para la depuración de los datos (se incorporan datos del mes de noviembre) con un total de 72 datos.

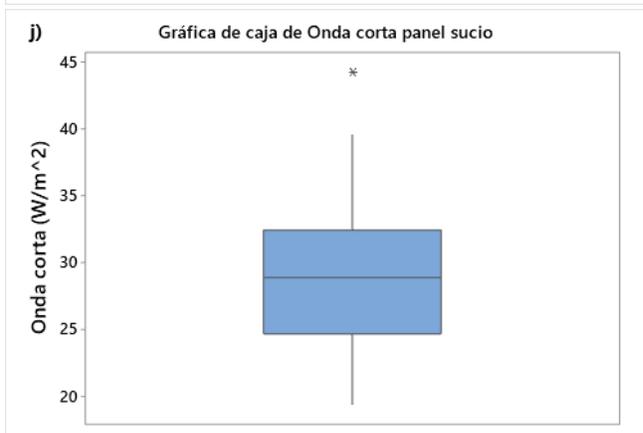
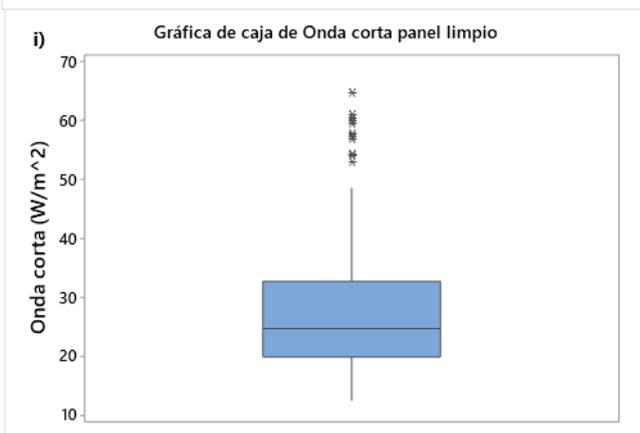
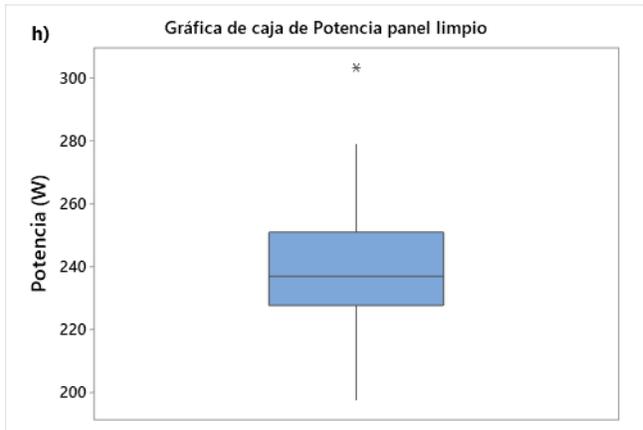
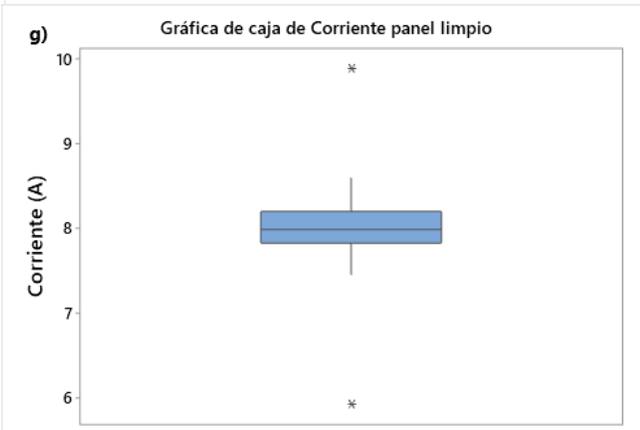
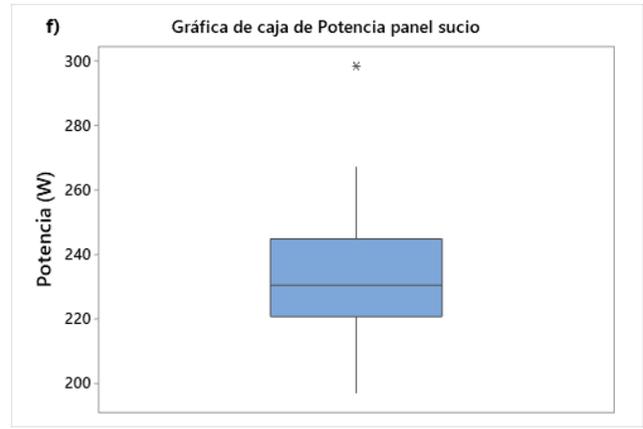
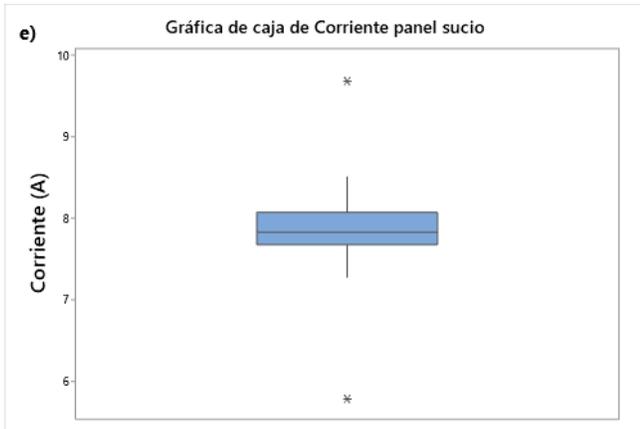
Partiendo con los histogramas de frecuencia, se puede observar que para los datos de polvo (figura a) existe un sesgo hacia la izquierda, con frecuencia mínima por debajo de los 0.0036 g y máxima de 0.0012 g. Para la temperatura (figura b) se observan dos sesgos, con frecuencias máximas de 25 °C y 40 °C y frecuencia mínima de 15 °C. Los datos de humedad relativa (figura c) presentan una mayor frecuencia al 24 % y mínima de 56 %. Por su parte, la radiación solar (figura d) alcanza una mayor frecuencia a los 700 W/m<sup>2</sup> y una menor frecuencia a los 400 W/m<sup>2</sup>. El panel sucio (figuras e y f) presenta una mayor frecuencia a los 7.8 A y una potencia de 230 W, así como las menores frecuencias en 6 A, 9.6 A y 190 W. El panel limpio (figuras g y h) presentó una mayor frecuencia a los 7.8 A y 235 W, así como las menores frecuencias con 6 A, 195 W y 295 W. Para la onda corta (figuras i y j) se observan mayores frecuencias de 25 W/m<sup>2</sup> para el panel limpio y de 13 W/m<sup>2</sup> para el panel sucio, así como las menores frecuencias de 50 W/m<sup>2</sup> y 45 W/m<sup>2</sup> para el panel limpio y el panel sucio, respectivamente.





Continuando con el análisis de datos de estadística básica, se presenta a continuación los diagramas de caja y bigotes. Para el polvo (figura a) se identifica un rango que va de 0.0007 g a 0.0020 g y una mediana que se aproxima a 0.0015 g. La temperatura presenta un rango de valores desde 21 °C hasta 38 °C con una mediana de 30 °C. La humedad relativa presentó valores desde 20 % hasta 35 %, con una mediana de aproximadamente 28 %. La radiación solar, por su parte, presenta un rango de valores más pequeño, que van desde los 680 W/m<sup>2</sup> hasta cerca de los 800 W/m<sup>2</sup>, con una mediana de 700 W/m<sup>2</sup>. Para el panel sucio, se observa a la corriente con un rango de valores entre 7.5 A y 8 A con valores atípicos por debajo de los 6 A y por encima de los 9.5 A, para la potencia se observa un rango de 200 W hasta 245 W con valores atípicos que se acercan a los 300 W. Para el panel sucio se observa que la corriente tuvo un rango de alrededor de 8 A, con valores atípicos cercanos a los 10 A y por debajo de los 6 A, la potencia comprendió un rango entre 230 W y 250 W con valor atípico por arriba de 300 W. La radiación de onda corta sobre el panel limpio presento valores entre 20 W/m<sup>2</sup> y 35 W/m<sup>2</sup> con valores atípicos que van desde los 50 W/m<sup>2</sup> hasta los 65 W/m<sup>2</sup>. La radiación de onda corta sobre el panel sucio entre 25 y 33 W/m<sup>2</sup> con un valor atípico que se acerca a los 45 W/m<sup>2</sup>.





Las pruebas de normalidad a partir del método de Kolmogorov-Smirnov se presentan a continuación. Para el polvo depositado (figura a) se observa un comportamiento normal entre los datos, esto debido a que el p-valor se obtuvo como 0.15 (mayor que nuestro alfa de 0.05); la temperatura muestra un comportamiento no lineal con un p-valor de 0.010; la humedad relativa presentó un p-valor de 0.141 que indica linealidad en los datos; para la radiación solar se encontró un p-valor de 0.010 que indica un comportamiento no lineal; tanto la corriente del panel sucio como la potencia del mismo y la corriente del panel limpio presentaron un comportamiento no lineal debido a sus p-valores de 0.010, 0.035 y 0.010 respectivamente; la potencia del panel limpio presenta un p-valor de 0.111 que se traduce en un comportamiento lineal, por último, la radiación de onda corta del panel limpio presentó un comportamiento no lineal con un p-valor de 0.010 mientras que para el panel sucio se encontró un comportamiento lineal y un p-valor de 0.15.

