

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



Estudio de las condiciones de sobreirradiancia: su impacto
en la distribución espectral en distintas latitudes y su
relación con la profundidad óptica de las nubes

Tesis para obtener el grado académico de Doctor en Física que
presenta:

Marco Antonio Zamalloa Jara

Asesores:

Prof. Dr. Jan Amaru Palomino Töfflinger

Prof. Dr. Rolf Grieseler

Lima, 2024

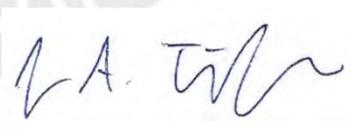
Informe de Similitud

Yo, Jan Amaru Palomino Tofflinger, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada **Estudio de las condiciones de sobreirradiancia: su impacto en la distribución espectral en distintas latitudes y su relación con la profundidad óptica de las nubes**, del autor, Marco Antonio Zamalloa Jara, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 18 %. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 10/10/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima, 10.10.2024

Palomino Tofflinger, Jan Amaru	
DNI: 48866095	Firma: 
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2076-4046	



Dedicado a la memoria de mi madre.

Agradecimientos

Al finalizar este arduo trabajo, con las dificultades propias de una tesis doctoral, y con la pandemia del COVID-19 incluida, quiero agradecer a Dios en primer lugar, por permitirme cumplir con este sueño de completar mi formación académica mucho tiempo relegada.

Debo agradecer de manera muy especial a los Profesores Dr. J. Amaru Töfflinger y Dr. Rolf Grieseler por aceptarme para realizar esta tesis doctoral bajo su dirección. Su capacidad para guiar cada uno de mis pasos ha sido un aporte invaluable en mi formación como investigador. Su apoyo, confianza y rigurosidad, han sido fundamentales para el buen trabajo realizado que sin su oportuna participación no habría sido posible.

Agradecer al Dr. Gustavo Nofuentes del IDEA Research Group de la Universidad de Jaen-España, y la Dra. Carolin Ulbrich del Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energy GmbH Berlin-Alemania, por permitirme trabajar con sus bases de datos que hicieron posible desarrollar el trabajo doctoral con implicaciones a nivel global.

Dar gracias a la Dra. Mónica Zamora Zapata por recomendarme y mostrarme el uso de datos satelitales que permitieron completar la idea del trabajo doctoral.

A mis compañeros del equipo de Investigación Fotovoltaica del Grupo de Ciencia de Materiales y Energías Renovables de la PUCP, que trabajaron en la instalación del Laboratorio de Investigación Fotovoltaica que permitió contar con datos experimentales para este trabajo, así como los comentarios y discusiones académicas dentro del programa doctoral.

A mis colegas del Departamento Académico de Física de la UNSAAC por su apoyo, y a la Red Peruana de Universidades por asumir los costos del programa doctoral en la PUCP.

Finalmente, agradecer a la memoria del Dr. Heinrich Berg por su apoyo, amistad, entusiasmo y valiosos comentarios que marcaron el inicio de este trabajo de tesis.

Resumen

Los eventos de sobreirradiancia y sobreirradiancia-extrema recientemente han llamado la atención de la comunidad fotovoltaica puesto que, si los inversores no han sido dimensionados adecuadamente, se pueden sobrecargar y afectar el funcionamiento de los sistemas de protección instalados en plantas de generación fotovoltaica, ocasionando daños potenciales y pérdidas económicas. Para comprender el mecanismo de los eventos de sobreirradiancia se han aplicado modelos de simulación sin mucho éxito, pues sus estimaciones difieren significativamente de los datos experimentales. Pese a que estos eventos fueron registrados hace más de medio siglo, aún falta entender las condiciones para que se produzcan. Existen dos hipótesis: la primera afirma que estos se producen por reflexión en los bordes y lados de las nubes gruesas fragmentadas, y la segunda indica que se deben a una fuerte dispersión de Mie hacia adelante en nubes delgadas. Este trabajo pone a prueba tales hipótesis usando datos de irradiancia espectral de espectrorradiómetros y datos satelitales de la profundidad óptica de las nubes. Se demuestra que el impacto de los eventos de sobreirradiancia sobre la distribución espectral produce un corrimiento al rojo, que el mayor incremento de la irradiancia se da en la región del infrarrojo, y se determina que nubes gruesas fragmentadas están presentes durante estos eventos. Esto nos lleva a concluir que, la presencia de nubes gruesas fragmentadas son condiciones favorables para los eventos de sobreirradiancia, y que se deberían a la reflexión en los bordes y los lados de estas nubes. Además, el incremento de la irradiancia global se debe al incremento de la componente directa. Finalmente, considerar el impacto de los eventos de sobreirradiancia en la distribución espectral podría ayudar a mejorar los modelos actuales de simulación.

Palabras clave: Sobreirradiancia, Sobreirradiancia-extrema, Espectro solar, Energía media fotónica, Índice de cielo claro inclinado, Profundidad óptica de nubes, corrimiento al rojo.

Abstract

Overirradiance and extreme overirradiance events have recently attracted the attention of the photovoltaic community since, if the inverters have not been properly sized, they can be overloaded and affect the operation of the protection systems installed in photovoltaic generation plants, causing potential damage and economic losses. Simulation models have been applied with little success in understanding the mechanism of overirradiance events since their estimates differ significantly from experimental data. Although these events were recorded more than half a century ago, the conditions for their occurrence still need to be understood. There are two hypotheses: the first states that these are produced by reflection at the edges and sides of thick fragmented clouds, and the second indicates that they are due to strong forward Mie scattering in thin clouds. This work tests such hypotheses using spectral irradiance data from spectroradiometers and satellite data of cloud optical depth. It is demonstrated that the impact of overirradiance events on the spectral distribution produces a red-shift, that the most significant increase in irradiance occurs in the infrared region, and it is determined that thick fragmented clouds are present during these events. It leads us to conclude that thick fragmented clouds are favorable conditions for overirradiance events and that they are due to reflection at the edges and sides of these clouds. Furthermore, the increase in global irradiance is due to the increase in the direct component. Finally, considering the impact of overirradiance events on the spectral distribution could help improve current simulation models.

Keywords: Overirradiance, Extreme overirradiance, Solar spectrum, Average photon energy, Tilted clear sky index, Cloud optical depth, red-shift.

ÍNDICE

Agradecimientos.....	i
Resumen.....	ii
Abstract.....	iii
Índice.....	iv
Lista de Tablas.....	vi
Lista de Figuras.....	vii
1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes y justificación del tema de tesis.....	1
1.2. Objetivos de la tesis.....	2
1.3. Estructura de la tesis.....	4
2. Conceptos generales.....	6
2.1. La radiación solar extraterrestre y la constante solar.....	6
2.1.1. El espectro solar extraterrestre.....	8
2.1.2. La constante solar.....	10
2.2. La radiación solar a nivel de la superficie terrestre.....	11
2.2.1. Irradiancias medidas en la superficie terrestre.....	11
2.2.2. Procesos de extinción de la radiación solar en la atmosfera terrestre..	13
2.3. Eventos de sobreirradiación y sobreirradiación extrema.....	16
2.3.1. Condiciones de sobreirradiación.....	18
2.3.2. Eventos de sobreirradiación.....	19
2.3.3. Eventos de sobreirradiación extrema (EOI).....	20
2.3.4. Estado actual y desafíos pendientes referidos a sobreirradiación.....	21
3. Bases de datos y metodología.....	23
3.1. Datos experimentales de irradiación.....	24
3.2. Datos experimentales de irradiación espectral.....	25
3.3. Extrapolación de datos espectrales para irradiación.....	28
3.4. Identificación de condiciones de cielo claro, nublado y sobreirradiación.....	29
3.4.1. Irradiación estimada por la biblioteca PVLIB Python.....	29
3.4.2. Irradiación simulada para identificación de las condiciones del cielo ...	32

3.5.	Análisis del espectro solar.....	34
3.6.	Datos satelitales de la Profundidad Óptica de Nubes	37
4.	Sobreirradiación y su impacto en la distribución espectral	41
4.1.	Introducción	41
4.2.	Sobreirradiación extrema	41
4.3.	Días de cielo claro	47
4.4.	Días con condiciones de cielo claro, nublado y sobreirradiación.....	50
4.5.	Impacto de la OI sobre la distribución espectral.....	52
5.	Sobreirradiación y nubes presentes	59
5.1.	Introducción	59
5.2.	Profundidad óptica de nubes (COD).....	59
5.3.	Irradiación experimental y profundidad óptica de nubes para días con eventos de sobreirradiación	64
6.	Sobreirradiación en las regiones ultravioleta, visible e infrarrojo.....	66
6.1.	Introducción	66
6.2.	Variación de las irradiancias de los eventos de sobreirradiación y nublado con respecto al cielo claro	67
6.3.	Variación de la energía media fotónica de eventos de sobreirradiación y nublado con respecto de cielo claro.....	69
7.	Conclusiones y recomendaciones	72
8.	Bibliografía.....	75
9.	Publicaciones	83
10.	Anexos.....	84
10.1.	Anexo A.1 APE versus k^* - Lima, Perú.....	84
10.2.	Anexo A.2 APE versus k^* - Madrid, España.....	86
10.3.	Anexo A.3 APE versus k^* - Berlín, Alemania.....	87
10.4.	Anexo B GTI y COD versus Tiempo - Lima, Perú.....	89

Lista de Tablas

Tabla 3.1 Ubicación geográfica y datos relevantes de los espectrorradiómetros.	27
Tabla 3.2 Datos de zona horaria para adecuar el algoritmo “ghi to poa transposition”.	31
Tabla 3.3 Selección para solicitar datos del COD en la página web de AIRS.	38
Tabla 4.1 Eventos de EOI (>1361.1 W/m ²) en Lima desde octubre de 2019 hasta abril de 2020.	42
Tabla 4.2 Coeficiente de Pearson, RMSE, y MBE entre las medidas realizadas por los instrumentos utilizados para la Figura 3.1 tomando como referencia al piranómetro inclinado.	45
Tabla 4.3 Valores medios de las diferencias del APE para OI y Clo con respecto a CS. .	58
Tabla 6.1 Días y horas exactas de las irradiancias espectrales de OI, CS y Clo seleccionadas para el análisis de la irradiancia y la energía media fotónica en las regiones UV, VIS, e IR.....	66

Lista de Figuras

Figura 2.1 Irradiancia extraterrestre con datos medidos en el espacio.....	9
Figura 2.2 Comparación de las irradiancias espectrales de un día de cielo claro y de cielo nublado con la irradiancia extraterrestre, mostrando algunos procesos de absorción debido al ozono, al oxígeno y al vapor de agua.....	15
Figura 3.1 Laboratorio de Investigación Fotovoltaica de la Sección de Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.....	26
Figura 3.2 Diagrama de flujo de la irradiancia simulada y la identificación de los eventos de OI, Clo y CS.....	33
Figura 3.3 Imagen en formato netCDF4 del GOES 16 obteniendo datos del COD para todo el disco terrestre observado.	39
Figura 4.1 Irradiancias medidas el 23 de marzo de 2020 por cuatro instrumentos diferentes en el Laboratorio de Investigación Fotovoltaica de la PUCP.	43
Figura 4.2 Errores medios del sesgo (MBE) para el espectrorradiómetro, el mini-modulo fotovoltaico y el piranómetro horizontal con respecto al piranómetro inclinado para días que presentaron eventos de OI, CS, y Clo.....	46
Figura 4.3 Comparación de las irradiancias POA, experimental GTI, y simulada GTI* para días de cielo claro (CS) en lima, Madrid y Berlín.	48
Figura 4.4 APE, k^* , y GTI en función del AOI para los días de CS mostrados en la figura anterior.	50
Figura 4.5 Días ejemplares en Lima, Madrid y Berlín, mostrando irradiancias GTI experimental y GTI* simulado para CS. Los círculos identifican los eventos de CS, Clo y OI para los que se mostrara su irradiancia espectral en la Figura 3.6.	51
Figura 4.6 Irradiancias espectrales correspondientes a los eventos de CS, Clo, y OI seleccionados en la Figura 3.4 para Lima, Madrid y Berlín.	52
Figura 4.7 Irradiancia experimental GTI y APE en función del tiempo, muestra que el APE y GTI son inversamente proporcionales para todos los eventos OI y Clo.....	53
Figura 4.8 APE en función de k^* muestra corrimiento al rojo para OI y corrimiento al azul para Clo.	54

Figura 4.9 (A) Valores medios diarios del APE para condiciones de CS, Clo, y OI con barras de error correspondientes a intervalos de confianza del 95 %. (B) Diferencia diaria entre los valores medios del APE para OI y Clo con respecto a CS.	56
Figura 4.10 (A) Diagrama de cajas del APE para condiciones de CS, OI, y Clo. (B) diagrama de cajas de las diferencias diarias entre los valores medios del APE para OI y Clo con respecto a CS.	58
Figura 5.1 (A) Irradiancia a lo largo de un día de cielo claro CS. (B) Profundidad óptica de las nubes presentes durante un día de cielo claro CS.	60
Figura 5.2 (A) Irradiancia a lo largo de un día de cielo nublado Clo. (B) Profundidad óptica de las nubes presentes durante un día de cielo nublado Clo.	61
Figura 5.3 Correlación cualitativa entre irradiancia GTI y la profundidad óptica de las nubes COD a lo largo de un día de cielo nublado Clo.	62
Figura 5.4 (A) Irradiancia a lo largo de un día con eventos de OI. (B) Profundidad óptica de las nubes presentes durante un día con eventos de sobreirradiación OI.	63
Figura 5.5 Correlación cualitativa entre irradiancia GTI y la profundidad óptica de las nubes COD a lo largo de un día con eventos de sobreirradiación OI.	64
Figura 6.1 Incremento de las irradiancias en las regiones UV, VIS, IR y total del evento de OI máxima con respecto al evento máximo de CS.	68
Figura 6.2 Decremento de las irradiancias en las regiones UV, VIS, IR y total del evento Clo mínimo con respecto al evento máximo de CS.	69
Figura 6.3 Incremento del APE en las regiones UV, VIS, IR de eventos de Clo con respecto a eventos de CS.	70
Figura 6.4 Decremento del APE en las regiones UV, VIS, IR de eventos de OI con respecto a eventos de CS.	71

1. Introducción

1.1. Antecedentes y justificación del tema de tesis

En 1968, Norris en su trabajo sobre la correlación de la radiación solar con las nubes [1] hace referencia al posible aumento de la cantidad total de la radiación que llega a la superficie terrestre, lo que haría imposible predecir la radiación solar a partir de la nubosidad. Este aumento de la radiación podría exceder la constante solar y que se debería a los reflejos en los bordes y lados de las nubes de cúmulos fragmentadas. A estos eventos, donde la radiación en la superficie de la Tierra fuera mayor a la de un día de cielo claro (sobreirradiación), o aun mayor a la constante solar (sobreirradiación extrema) se le conocía por "silver lining" y posteriormente se le dieron otros nombres, siendo el más utilizado el de reforzamiento por nube (CE, "Cloud Enhancement", por sus siglas en inglés). Investigaciones posteriores sobre el aumento excesivo de la irradiancia solar se realizaron con especial énfasis en la región del ultravioleta por los efectos que pudiera causar a nivel biológico, tanto en plantas como en humanos, podemos mencionar por ejemplo, los daños en las estructuras celulares de las plantas, y la fotoqueratitis y aumento del riesgo de cáncer de piel en humanos [2–14]. Así también se reportaron en la literatura científica varios eventos de sobreirradiación extrema a nivel mundial, con valores detectados cada vez más altos y mostrando que son más comunes y frecuentes de lo esperado [6, 15–22]. En 2012, Yordanov et al. [17, 20] atribuye los eventos de sobreirradiación a la dispersión hacia delante de la luz en nubes ópticamente delgadas (adyacentes al Sol) para ángulos dentro de 5° alrededor del disco solar. Estas nubes delgadas, forman una capa a través de la cual es posible observar el disco solar. Por otro lado, el desarrollo de los sistemas fotovoltaicos como una fuente alternativa de energía ha alcanzado niveles competitivos comparado con el uso de combustibles fósiles y gas natural, llegándose en la actualidad a instalarse centrales fotovoltaicas de gran magnitud a nivel mundial. Es a partir de aquí, que un profundo conocimiento de las condiciones de sobreirradiación ha ganado un creciente interés en la comunidad fotovoltaica no solo por su potencial técnico, sino que también por los efectos económicos que puede acarrear en la instalación de plantas generadoras con concentradores solares [23] y plantas fotovoltaicas. Pues estudios recientes han

mostrado que eventos de sobreirradiación que duran más de un minuto y a temperaturas ambiente mayores a los 30 °C, pueden afectar el funcionamiento de los sistemas de protección y sobrecargar los inversores, siempre y cuando el generador fotovoltaico no haya sido dimensionado adecuadamente durante su diseño e instalación [24–30]. Según Toretí Scarabelot et al. [29] los sistemas con inversores subdimensionados alcanzaron temperaturas de operación de hasta 80 °C, lo que podría reducir la vida útil de los componentes electrónicos del sistema. Además, los inversores subdimensionados con sobrecarga de irradiación no solo aumentan su temperatura, sino que, también reducen la generación de energía a valores aun menores que en modo de saturación, lo que significa una pérdida de la energía proporcionada por los eventos de sobreirradiación.

Pese a que ya han transcurrido casi 6 décadas desde el artículo de Norris [1] (1968) y más de una década desde el trabajo de Yordanov et al. [20] (2012), hasta la fecha, no se tienen definiciones adecuadas con respecto a los eventos de sobreirradiación y sobreirradiación extrema [16], ni tampoco se sabe las condiciones adecuadas para que estos eventos se produzcan; es decir, si se dan en presencia de nubes gruesas, delgadas o ambas. Precisamente, proponer algunas definiciones y evaluar las condiciones de los eventos de sobreirradiación es lo que se pretende con este trabajo de tesis, haciendo un estudio del impacto de los eventos de sobreirradiación sobre la distribución de la irradiación espectral, el incremento de la irradiación en las regiones ultravioleta, visible e infrarroja, y determinando el tipo de nubes presentes en estos eventos de sobreirradiación, tratando de llenar el vacío académico que existe al respecto.

1.2. Objetivos de la tesis

Este trabajo de tesis tiene como objetivo principal estudiar el impacto de los eventos de sobreirradiación en la distribución espectral en las ciudades de Lima (Perú), Madrid (España) y Berlín (Alemania), así como, identificar las condiciones y/o nubes presentes durante estos eventos de sobreirradiación en la ciudad de Lima.

Para el logro del objetivo principal planteado en este trabajo de tesis se han propuesto los objetivos específicos que se detallan a continuación:

- Identificar días de cielo claro, cielo nublado, y días con eventos de sobreirradiación a partir de los datos registrados en centros de investigación en Lima, Madrid y Berlín. Estos centros al encontrarse a diferentes latitudes, longitudes, y proximidad al mar, presentan también climas y condiciones atmosféricas diferentes, lo que permite que los resultados de este estudio tengan implicancias más globales.
- Ajustar la data experimental de la irradiación para días de cielo claro con estimaciones teóricas con el objetivo de aplicarlas a días con eventos de sobreirradiación y poder identificar los eventos de sobreirradiación, de cielo claro y cielo nublado.
- Definir el índice más adecuado para caracterizar la distribución de la irradiación espectral y utilizarlo para estudiar el impacto de los eventos de sobreirradiación y sobreirradiación extrema en la distribución espectral a nivel de la superficie terrestre.
- Conocer la profundidad óptica de las nubes en la ciudad de Lima utilizando datos satelitales proporcionados por el satélite GOES-16 de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, "*National Oceanic and Atmospheric Administration*", por sus siglas en inglés) y la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA, "*National Aeronautics and Space Administration*", por sus siglas en inglés) para los días que presentaron eventos de sobreirradiación.
- Correlacionar cualitativamente la irradiación solar con la profundidad óptica de las nubes, e Identificar el tipo de nubes presentes durante los eventos de sobreirradiación en la ciudad de Lima.
- Analizar las variaciones de la irradiación solar y del índice elegido para caracterizar la distribución espectral en las regiones del ultravioleta, visible e infrarrojo.
- Evaluar las hipótesis de sobreirradiación planteadas actualmente en la literatura científica.

1.3. Estructura de la tesis

Con el fin de servir como una guía en el estudio de los eventos de sobreirradiancia y sobreirradiancia extrema para nuevos investigadores, esta tesis doctoral se ha estructurado en siete capítulos, los cuales se describen a continuación.

El Capítulo 2 presenta algunos conceptos generales que son necesarios para un mejor entendimiento del concepto de sobreirradiancia y sobreirradiancia extrema, haciendo una diferencia entre condiciones de sobreirradiancia y eventos de sobreirradiancia. Se menciona también la necesidad de contar con mayor cantidad de información experimental para poder abordar completamente este tema y que esta fuera del alcance de esta tesis.

El Capítulo 3 trata sobre los datos experimentales que han sido utilizados para este trabajo de tesis, entre ellos, las irradiancias medidas en Lima, Madrid y Berlín, y la profundidad óptica de las nubes medidas para Lima. En la metodología, se presentan los métodos de extrapolación en las regiones ultravioleta e infrarrojo para los datos provenientes de los espectrorradiómetros, así como la aplicación de la biblioteca PVLIB Python para la simulación de la irradiancia estimada para cielo claro, que será fundamental para obtener la irradiancia simulada y distinguir los eventos de sobreirradiancia de los de cielo nublado y cielo claro. Los resultados obtenidos a partir de este capítulo se presentan en los tres capítulos siguientes.

El Capítulo 4 muestra parte de los resultados tratados en el capítulo tres. En particular muestra que el estudio de la sobreirradiancia se puede llevar a cabo solo utilizando la irradiancia espectral medida por espectrorradiómetros y que es necesario hallar una curva de irradiancia que se ajuste bastante bien a los datos experimentales, de manera que sea posible distinguir entre eventos de sobreirradiancia, nublados o cielo claro. Finalmente, se calcula la energía media fotónica para los eventos de sobreirradiancia, y se observa que todos los eventos de sobreirradiancia presentan un corrimiento al rojo en la distribución espectral.

El Capítulo 5 muestra también parte de los resultados del capítulo tres referido a las nubes presentes durante los eventos de sobreirradiancia. Se observa que existe una muy buena correlación cualitativa entre la irradiancia y la profundidad óptica de las nubes

durante los días con eventos de sobreirradiancia. Se muestra que, para Lima, todos los eventos de sobreirradiancia se produjeron en presencia de nubes gruesas, lo que reforzaría la hipótesis de que estos eventos de sobreirradiancia fueron producidos por reflexiones en los bordes y lados de las nubes, lo que sería congruente con el corrimiento al rojo obtenido en el capítulo anterior.

El Capítulo 6 muestra los resultados de analizar el incremento de la irradiancia y el decremento de la energía media fotónica de los eventos de sobreirradiancia en las regiones ultravioleta, visible e infrarrojo. En este caso, se observa un mayor incremento de la irradiancia en la región del infrarrojo, indicando que este incremento no puede ser resultado de la interacción con partículas de agua de las nubes.

En el Capítulo 7 se dan las conclusiones del trabajo de tesis en función a los resultados obtenidos en los capítulos anteriores. En resumen, podemos concluir que todos los eventos de sobreirradiancia presentan un corrimiento al rojo con respecto a los eventos de cielo claro, indicando que el incremento en la irradiancia global se debe principalmente al incremento de la componente directa. Además, en el caso de Lima todos los eventos de sobreirradiancia estudiados han sido detectados en presencia de nubes gruesas lo que nos permite afirmar que esto se debió a la reflexión en los bordes y lados de las nubes fragmentadas que dejan ver total o parcialmente el disco solar.

2. Conceptos generales

Este capítulo revisa algunos temas fundamentales para una mejor comprensión de este trabajo de tesis. Inicia con el estudio de la radiación solar y se verá que esta radiación puede ser abordada como la radiación de un cuerpo negro. Esta radiación que viaja en el espacio hasta antes de ingresar a la atmosfera terrestre se conoce como radiación extraterrestre. A partir de la irradiancia espectral extraterrestre es posible estimar la temperatura en la superficie del Sol mediante la ley de desplazamiento de Wien. Como la trayectoria de la órbita terrestre es una elipse con el Sol en uno de sus focos, la distancia entre la Tierra y el Sol varía a lo largo de un año, lo que hace que la radiación que llega a la Tierra sea máxima cuando la distancia Tierra-Sol es menor y es mínima cuando están más alejados. Pese a esta variación de la irradiancia, se define la constante solar como un valor representativo de la radiación solar antes de ingresar a la atmosfera terrestre. Cuando la radiación solar ingresa a la atmosfera, interactúa con esta, produciéndose una atenuación de la radiación que se conoce como extinción y/o atenuación, de manera que la irradiancia en la superficie terrestre es menor a la irradiancia extraterrestre. Pese a esta atenuación de la irradiancia solar, se han medido en la superficie irradiancias mayores a las esperadas para un día de cielo claro e incluso irradiancias mayores a la irradiancia extraterrestre, y que se conocen como eventos de sobreirradiación y sobreirradiación extrema respectivamente. Comprender un poco más sobre las condiciones y el proceso físico para la ocurrencia de estos eventos de sobreirradiación son el objetivo de este trabajo de tesis.

2.1. La radiación solar extraterrestre y la constante solar

La energía generada en el Sol se realiza por fusión nuclear, convirtiendo hidrogeno en helio, de manera que pierde masa a razón de 4 millones de toneladas de masa por cada segundo [31, 32]. La superficie del Sol se encuentra a unos 5770 grados Kelvin aproximadamente, siendo la fotosfera la capa que emite la mayor parte de la radiación solar. La radiación solar se da en todas las longitudes de onda, principalmente: la ultravioleta (UV, 10 nm - 400 nm), la visible (VIS, 400 nm – 700 nm) y la infrarroja (IR, 700 nm – 1 mm). De hecho, aproximadamente el 99 % de radiación solar se emite

entre los 300 nm y los 6000 nm, correspondiendo aproximadamente el otro 1 % a la radiación UV entre 120 nm y 300 nm. La radiación solar tarda en llegar a la superficie terrestre un aproximado de 8.3 minutos [32].

La unidad más utilizada para medir la radiación solar es la irradiancia, flujo radiativo, o potencia incidente por unidad de superficie; es decir, se mide en watts por metro cuadrado (W/m^2) [33].

Como se sabe, de acuerdo con la primera ley de Kepler, los planetas se mueven alrededor del Sol siguiendo orbitas elípticas encontrándose el Sol en uno de los focos de la elipse. En el caso de la Tierra, su excentricidad es baja, del orden de 0.0017 aproximadamente, siendo casi una trayectoria circular. La distancia máxima entre la Tierra y el Sol es de 152.1 millones de kilómetros aproximadamente y su distancia mínima es alrededor de 147.1 millones de kilómetros, por lo que la distancia media entre la Tierra y el Sol es de 149.6 millones de kilómetros, y es conocida como una unidad astronómica (AU, "*Astronomical Unit*", por sus siglas en inglés). Esta variación de la distancia entre la Tierra y el Sol durante el movimiento de traslación terrestre hace que la irradiancia solar total (TSI, "*Total Solar Irradiance*", por sus siglas en inglés) varíe también a lo largo del año. Esta variación no fue impedimento para definir lo que se conoce como "constante solar" (SC, "*Solar Constant*", por sus siglas en inglés), siendo esta, la energía media por unidad de tiempo y unidad de área a la distancia de una unidad astronómica (AU). La irradiancia total solar (TSI) también conocida como irradiancia extraterrestre con masa de aire cero (AM0, "*Air Mass zero*", por sus siglas en inglés) y sobre un plano perpendicular a la línea que une los centros del Sol y la Tierra, puede ser calculada aproximadamente usando la siguiente ecuación:

$$TSI(n) = SC \left[1 + 0.034 * \cos \left(\frac{2\pi * n}{365.25} \right) \right] \quad (2.1)$$

Donde n es el día del año ($1 \leq n \leq 365$) y SC es la constante solar ($1361.1 W/m^2$) de la cual hablaremos más adelante [31, 32, 34, 35].

Es importante aclarar que la irradiancia TSI o irradiancia extraterrestre se ve afectada también por el ciclo solar de 11 años y la cantidad de manchas solares. A mayor cantidad de manchas solares, mayor será la irradiancia TSI, mientras que cuando hay pocas manchas solares la irradiancia es menor.

2.1.1. El espectro solar extraterrestre

El espectro solar en la parte superior de la atmósfera, donde aún no ha interactuado con ninguna de las capas de la atmósfera, es conocido como el espectro solar extraterrestre (AM0). Este espectro extraterrestre, $M(\lambda, T)$ en $W/m^2/\mu m$, es muy similar al espectro continuo radiado por un cuerpo negro siguiendo la ley de radiación de Planck, que está dada por la siguiente ecuación:

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1 \right)} \quad (2.2)$$

Donde h es la constante de Planck ($6.626 \cdot 10^{-34}$ J s), c es la velocidad de la luz en el vacío, λ es la longitud de onda, k_B es la constante de Boltzmann ($1.380 \cdot 10^{-23}$ J/K), y T es la temperatura absoluta en grados Kelvin.

Este espectro continuo va desde la radiación UV (120 nm) hasta la radiación IR (6000 nm), aproximadamente. Las longitudes de onda correspondientes a los rayos X (0.1 nm – 10 nm) y las longitudes de onda IR mayores a los 6000 nm contribuyen de manera insignificante a la radiación total. Por otro lado, la radiación en el rango visible VIS que comprende desde el color violeta hasta el rojo va desde los 400 nm hasta los 700 nm. Finalmente, la radiación IR empezaría a partir de los 700 nm.

La radiación UV puede dividirse en tres subregiones debido a los efectos que produce en los seres vivos. Aunque esta subdivisión de la radiación UV es arbitraria y depende de la disciplina involucrada, es mayormente utilizada por los Fotobiólogos Ambientales. La primera subregión conocida como UV-C entre las longitudes de onda de 100 nm a

280 nm, la segunda subregión denominada UV-B entre 280 nm a 320 nm, y la tercera subregión llamada UV-A entre 320 nm y 400 nm. La subregión UV-C es altamente peligrosa para todos los seres vivos, pero felizmente no llega a la superficie terrestre debido a la absorción realizada por el ozono y el oxígeno atmosféricos. Por el contrario, la radiación UV que llega a la superficie terrestre corresponde a las subregiones UV-B y UV-A, con un 5 % y 95 % respectivamente. El UV-B daña el ADN y está directamente relacionado con: el cáncer de piel en humanos y el crecimiento en las plantas. Mientras que el UV-A se relaciona con el foto envejecimiento de la piel humana y la inducción de melanoma en peces [36–39].

En la Figura 2.1 se muestra el espectro extraterrestre AM0 de la radiación solar a partir de datos medidos en el espacio y que fueron publicados en el Apéndice del artículo de Gueymard del 2004 [35].

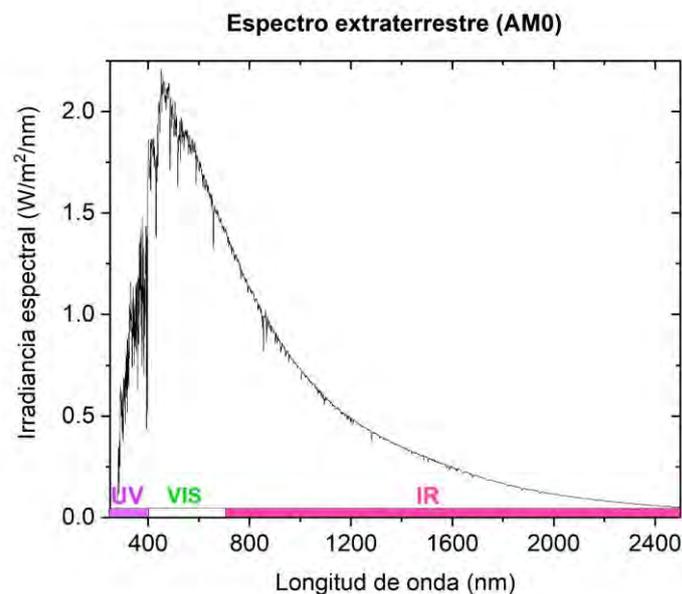


Figura 2.1 Irradiancia extraterrestre con datos medidos en el espacio.

En esta Figura 2.1, se puede observar la irradiancia espectral AM0 (W/m²/nm) en función de la longitud de onda (nm). El máximo de la irradiancia espectral AM0 ocurre aproximadamente en los 451 nm, y usando la ecuación de la ley de desplazamiento de Wien la temperatura del Sol correspondiente a esa irradiancia espectral sería de

alrededor de 6400 K. Cuantitativamente, la ley de desplazamiento de Wien está dada por la siguiente ecuación:

$$T = \frac{0.002898}{\lambda_{max}} \quad (2.3)$$

Donde λ_{max} es la posición del máximo en la curva de radiación; es decir, es la longitud de onda a la que un cuerpo negro radia con mayor intensidad a la temperatura T , en grados Kelvin.

2.1.2. La constante solar

La cantidad total de energía por segundo para todas las longitudes de onda que inciden perpendicularmente en un plano de una unidad de área, cuando el Sol se sitúa a una unidad astronómica de la Tierra, se le conoce como “constante solar” y que se abrevia como SC por sus siglas en inglés. Sin embargo, estrictamente hablando, esto no es una constante, ya que varía según la actividad solar, el ciclo solar, el número de manchas solares, llamaradas solares y las eyecciones de masa coronal.

Los primeros esfuerzos para determinar la constante solar corresponden a Johnson que en 1954 propuso un valor de 1396 W/m^2 [40]. Siguió otros investigadores y nuevos valores de la constante solar como de 1353 W/m^2 , y 1367 W/m^2 [34, 35, 41]. Recientemente, en 2018 Gueymard [34] realiza una reevaluación de la constante solar basándose en el estudio de una serie temporal de 42 años de la irradiancia solar total TSI, llegando a definir el valor de 1361.1 W/m^2 como la nueva constante solar.

Para hallar la constante solar, solo basta integrar el área debajo de la curva de la irradiancia espectral extraterrestre o AM0 (Figura 2.1). Como se mencionó anteriormente, el valor actual de la SC es de 1361.1 W/m^2 , lo que significa que 1 m^2 de área perpendicular a los rayos solares recibe una potencia de 1361.1 W cuando la distancia entre la Tierra y el Sol es de una unidad astronómica (AU).

2.2. La radiación solar a nivel de la superficie terrestre

2.2.1. Irradiancias medidas en la superficie terrestre

La radiación emitida por el Sol que atraviesa la atmosfera terrestre hasta llegar a la superficie de la Tierra, cualquiera sea su altitud, se analiza y cuantifica en forma de irradiancia o irradiación.

La irradiancia denotada por G se mide en W/m^2 , lo que significa que corresponde a la energía incidente por unidad de superficie y por unidad de tiempo. Mientras que la irradiación denotada por H corresponde a la energía recibida por unidad de superficie y por un periodo de tiempo determinado que en general es de una hora, midiéndose en $W h/m^2$ o bien, J/m^2 . En el presente trabajo de tesis solo se utilizará la irradiancia; a) obtenida directamente por los piranómetros y el mini-modulo fotovoltaico calibrado, y b) calculada a partir de la irradiancia espectral ($W/m^2/nm$) medida por los espectrorradiómetros utilizando el método de integración del trapecio.

La irradiancia que llega a la superficie terrestre luego de atravesar la atmosfera se clasifica en tres tipos: la irradiancia normal directa (DNI, "*Direct normal irradiance*", por sus siglas en inglés), la irradiancia horizontal difusa (DHI, "*Diffuse horizontal irradiance*", por sus siglas en inglés), y la irradiancia global horizontal (GHI, "*Global horizontal irradiance*", por sus siglas en inglés) [26, 32, 42, 43].

La DNI es la componente de la irradiancia que atraviesa la atmosfera sin ningún tipo de interacción o sin sufrir alteración alguna e incide en la superficie perpendicular a la dirección de los rayos solares. Se considera un ángulo de abertura; es decir, una anchura angular del Sol vista desde la Tierra de 0.5° . Esta irradiancia directa es la que produce las sombras [44, 45].

La DHI es la componente de la irradiancia que recibe un plano horizontal en la superficie terrestre y que no proviene de la DNI; es decir, proviene de todos los puntos de la bóveda celeste, debido a la interacción de la luz con la atmosfera y sus constituyentes. Estas interacciones pueden ser por: reflexión, refracción, difracción, absorción y dispersión. Una parte de esta radiación difusa regresa al espacio. Esta es la radiación presente en un día nublado. Esta irradiancia puede ser medida directamente por

piranómetros o indirectamente por espectrorradiómetros provistos con banda-de-sombra o con sistemas de sombra con seguimiento, que bloquea la DNI [32].

La GHI es la irradiancia global que recibe un plano horizontal en la superficie terrestre; es decir, es la suma de la componente difusa DHI y la proyección de la componente directa DNI sobre el plano horizontal, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$GHI = DNI * \cos(\theta_z) + DHI \quad (2.4)$$

Donde θ_z es el ángulo cenital solar. Esta irradiancia se mide experimentalmente con un piranómetro, o un espectrorradiómetro, ubicado sobre un plano horizontal de la superficie terrestre. La GHI es la irradiancia más comúnmente medida debido a sus aplicaciones prácticas en sistemas y plantas solares fotovoltaicas.

Además de las irradiancias DNI, DHI, y GHI, en la práctica, es necesario utilizar la irradiancia global inclinada (GTI, “Global tilted irradiance”, por sus siglas en inglés) que es equivalente a la GHI, pero sobre un plano inclinado, esto debido a que los sistemas fotovoltaicos deben ser orientados mirando al norte o al sur y con un ángulo de inclinación óptimo, según el hemisferio terrestre y la latitud en la que se encuentren, esto para un mejor aprovechamiento de la energía solar a lo largo de un año [46–49].

La GTI puede ser estimada de la GHI usando los modelos de transposición [50–52]. La precisión de la estimación de la GTI a partir de la GHI es función de los errores experimentales de la GHI y otros factores como el albedo del suelo, la cobertura de nubes, la turbidez de los aerosoles y el contenido de vapor de agua. A continuación, se muestra la ecuación de un modelo de transposición que como datos de entrada requiere de las tres irradiancias DNI, DHI, y GHI:

$$GTI = DNI * \cos(AOI) + DHI * R_d + \rho * GHI * R_r \quad (2.5)$$

Donde AOI es el ángulo de incidencia (por sus siglas en inglés) del rayo solar con respecto a la normal del plano inclinado, R_d es el factor de transposición difusa (vinculado a la

nubosidad y con mayor incertidumbre), ρ es el albedo del suelo y, R_r es el factor de transposición para la reflexión del suelo [50, 51].

La irradiancia GTI en la biblioteca de código abierto de PVLIB Python es conocida como irradiancia en el plano del arreglo (POA, "*Plane of Array*", por sus siglas en inglés). Precisamente, este trabajo de tesis se realiza fundamentalmente con datos de piranómetro y espectrorradiómetros inclinados que miden la GTI experimental, así como también las estimaciones de la irradiancia POA con la biblioteca PVLIB de Python.

2.2.2. Procesos de extinción de la radiación solar en la atmosfera terrestre

La radiación solar extraterrestre para llegar a la superficie de la Tierra debe atravesar las diferentes capas de la atmosfera (exosfera, termosfera, mesosfera, estratosfera y troposfera) interaccionando con cada una de ellas. Estas interacciones producen principalmente efectos atenuantes de la radiación, llamados procesos de extinción o agotamiento de la radiación [53–55]. Estos procesos de extinción son básicamente la absorción y la dispersión. Es importante mencionar que la reflexión de la radiación en la parte superior de las nubes, que hace que parte de la radiación extraterrestre regrese al espacio exterior es un caso especial de dispersión [54].

La absorción ocurre cuando la energía de un fotón es absorbida por la materia, en nuestro caso en particular se puede mencionar la absorción de la radiación por: el ozono (O_3), el oxígeno (O_2), el nitrógeno (N_2), el vapor de agua (H_2O) y, el dióxido de carbono (CO_2). El ozono absorbe casi por completo las longitudes de onda menores a 290 nm, y por encima de los 290 nm su absorción disminuye, hasta que a 350 nm ya casi no existe absorción. El oxígeno y el nitrógeno absorben en un amplio rango de longitudes de onda, principalmente en el rango visible. Finalmente, el vapor de agua y el dióxido de carbono absorben fuertemente en la región del infrarrojo haciendo que la transmisión de la radiación para longitudes de onda superiores a los 2500 nm sea muy baja [31, 32].

La dispersión es el proceso mediante el cual la radiación se ve obligada a desviarse de su trayectoria rectilínea. En el caso de la radiación solar existen la dispersión de Rayleigh y la dispersión de Mie. Debido a estos dos tipos de dispersión es que llega a la superficie terrestre la radiación difusa DHI [56–58].

La dispersión de Rayleigh [59, 60] es la dispersión de los fotones por partículas cuyas dimensiones son menores a la longitud de onda del fotón. Estas partículas pueden ser átomos o moléculas individuales. La dispersión de Rayleigh es inversamente proporcional a la longitud de onda elevada a la cuarta potencia, por lo que longitudes de onda más cortas como el azul se dispersaran mucho más que las longitudes más largas como el rojo. Esto explica el color azul del cielo, el color amarillo del Sol cuando se encuentra en el cenit y el color rojizo del Sol al amanecer y al atardecer.

La dispersión de Mie [57, 59, 61], por el contrario, es la dispersión de fotones por partículas cuyas dimensiones son mayores o iguales a la longitud de onda del fotón. Estas partículas pueden ser gotas de agua, cristales de hielo, y partículas de aerosol. La dispersión de Mie a diferencia de la dispersión de Rayleigh no es selectiva en la longitud de onda, de manera que todas las longitudes de onda se dispersan de manera similar con un fuerte patrón hacia adelante; es decir, en la dirección de propagación de la radiación. Esta dispersión de Mie es la causante de que las nubes se vean blancas o en una escala de grises.

En la Figura 2.2 se presentan las irradiancias espectrales, medidas por el espectrorradiómetro del Laboratorio de Investigación Fotovoltaica de la PUCP [62], para un día de cielo claro (en color rojo) y para un día de cielo nublado (en color azul). Estas irradiancias espectrales fueron medidas al mediodía aproximadamente. Además, se muestra la irradiancia espectral extraterrestre para mostrar la extinción de la radiación por absorción debido al ozono, al oxígeno y al vapor de agua en algunas bandas o regiones del espectro. En ambos casos, estas irradiancias espectrales corresponden a irradiancias máximas en sus respectivos días, puede ser calculada simplemente hallando el área debajo de cada irradiancia espectral. Luego se puede observar claramente que, para un cielo claro, la extinción de la radiación se debe, principalmente, a la absorción de la radiación por parte del ozono y del oxígeno, así como a la dispersión de Rayleigh. En general, asumiremos que la irradiancia máxima en un día de cielo claro es de aproximadamente 1000 W/m^2 , igual al definido en las condiciones de prueba estándar (STC, "Standar Test Conditions", por sus siglas en inglés) para módulos fotovoltaicos [20, 25, 26], la cual es bastante menor a la constante solar (1361.1 W/m^2). Por otro lado, para un cielo nublado la extinción de la radiación es alta, pues además de los procesos

de absorción y dispersión que ocurren en un cielo claro, ocurren también la absorción debida al vapor de agua y la reflexión de la radiación extraterrestre en el límite superior de la nube, lo que hace que la irradiancia en la superficie terrestre sea muy baja.

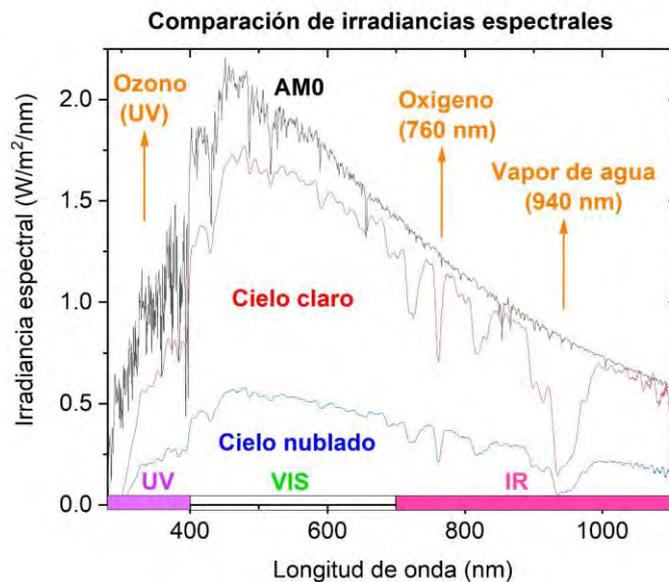


Figura 2.2 Comparación de las irradiancias espectrales de un día de cielo claro y cielo nublado con la irradiancia extraterrestre, mostrando algunos procesos de absorción debido al ozono, al oxígeno y al vapor de agua.

Hablando en términos de las irradiancias GHI, DNI, y DHI, para días de cielo claro (CS, "Clear Sky", por sus siglas en inglés) y días de cielo nublado (Clo, "Cloudy Sky", por sus siglas en inglés), se puede afirmar que la componente directa DNI en un día soleado es la componente dominante de la irradiancia global GHI, mientras que para un día completamente nublado la componente difusa DHI es la más dominante. Widen y Munkhammar en 2019 [31] mostraron que en un día de cielo claro la componente difusa DHI fue del 14.2 %, mientras que para un día completamente nublado, DHI fue del 99.7 %, indicando que la componente directa DNI fue prácticamente nula.

En resumen, la irradiancia esperada en la superficie terrestre debe ser menor o mucho menor que la constante solar, que como veremos, no se cumple durante los eventos de

sobreirradiancia extrema, que es motivo de este trabajo de tesis, y se discutirá más adelante.

En esta sección es pertinente también mencionar al concepto de masa de aire (AM, “Air Mass”, por sus siglas en inglés). Es una cantidad adimensional que indica la cantidad de atmosfera que la radiación solar debe atravesar antes de llegar a la superficie terrestre. Es un factor importante en la atenuación de la radiación solar durante el día, ya que es la responsable de la gran diferencia de la radiación solar que llega a la superficie al amanecer (o atardecer) y al medio día donde el Sol está en su máximo resplandor. Cuanto mayor sea la longitud de camino recorrido, mayor será la cantidad de partículas con que la luz tendrá que interactuar. Existen varias fórmulas para calcular la masa de aire AM, como las propuestas por Kasten en 1965, o Kasten y Young en 1989 [63], pero por cuestiones prácticas escribiremos la ecuación de la masa de aire AM con una aproximación de primer orden:

$$AM \approx \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (2.6)$$

Donde θ_z es el ángulo cenital en grados. De esta ecuación podemos fácilmente decir que cuando el Sol se encuentra perpendicular a la superficie terrestre ($\theta_z=0$), la longitud recorrida por los rayos solares será de una atmosfera, lo cual se conoce como AM 1.0. Por otro lado, si el ángulo cenital es de 60° los rayos solares recorrerán dos atmosferas, y se representara por AM 2.0.

2.3. Eventos de sobreirradiancia y sobreirradiancia extrema

Un evento de sobreirradiancia (OI, “Overirradiance”, por sus siglas en inglés) de manera no tan formal puede definirse como aquel evento donde, la radiación solar incidente en la superficie terrestre es mayor a la que se esperaría bajo condiciones de cielo claro (CS) totalmente despejado. Para que esto ocurra, deben existir condiciones del cielo

apropiadas para los eventos de sobreirradiación. Hasta la fecha, estas condiciones han sido relacionadas con la presencia de nubes.

Por otro lado, la observación de nubes con fines de predecir precipitaciones se debe remontar a la antigüedad. Posteriormente, la observación de la cobertura de nubes de manera sistemática y científica comenzó a tomar forma en el siglo XIX, gracias al avance del conocimiento en las ciencias Físicas. El desarrollo de instrumentos de medición y la estandarización de métodos y técnicas de observación han permitido registrar y sistematizar las observaciones de manera científica contribuyendo a la comprensión del clima y de la atmósfera. Posteriormente, los científicos buscaron comprender como es que la cobertura de nubes afecta a la radiación solar y en consecuencia a la temperatura. Para ello, dividieron el cielo en octavos y midieron la fracción del cielo cubierto de nubes en octas, así, por ejemplo, 0 octas para CS, mientras que 8 octas para cielo cubierto o cielo nublado (Clo). Se hicieron esfuerzos para relacionar entonces la cobertura de nubes con la radiación solar, hasta que Norris en 1968 [1] alertó que no podía hacerse este tipo de relación ya que, algunas veces la irradiancia en la superficie terrestre podría ser mayor incluso que la esperada para un cielo en condiciones de CS, siendo esta la primera vez que se reportó en la literatura científica lo que conocemos como sobreirradiación (OI). En 1992, Segal y Davis [2] observaron que la reflexión en nubes cúmulos causaba incrementos de la irradiancia solar al mediodía. Por otro lado, Estupiñán et al. en 1996 [3] mostraron que las nubes tipo cúmulos producían aumentos de la radiación UV-B bajo cielos parcialmente nublados cuando el haz solar directo no está obstruido.

Posteriormente a estos trabajos iniciados por Norris, muchos científicos han reportado eventos de OI a nivel mundial, más exactamente, han reportado eventos de sobreirradiación extrema (EOI, *“Extreme Overirradiance”*, por sus siglas en inglés) [6, 8, 11, 17–21, 24, 25, 29, 64–69], y que definiremos más adelante.

Pese a la gran cantidad de publicaciones científicas con respecto a los eventos de OI y EOI, aún faltan definiciones claras al respecto. Así lo manifiesta Gueymard en 2017 [16] cuando se refiere al concepto de reforzamiento de nubes, abreviado por CE, del inglés *“cloud enhancement”*, término muchas veces utilizado para referirse a los eventos de OI y EOI.

2.3.1. Condiciones de sobreirradiancia

Norris en 1968, no solo fue el primero en indicar que algunas veces la irradiancia en la superficie de la Tierra podría superar a la irradiancia esperada en condiciones de cielo claro, sino que, además, se debería a la reflexión de la irradiancia solar por las nubes de cúmulos fragmentadas. Desde ahí, muchos científicos se refirieron a este hecho, como “*cloud enhancement*” (CE), “*cloud lensing*”, “*overirradiance*” (OI), “*super irradiance*”, “*cloud edge*”, “*irradiance enhancement*”, y muchos términos más [5, 70–74].

En la actualidad existen dos hipótesis para que se presenten eventos de OI. La primera es que los eventos de OI se producen por reflexiones en los bordes de las nubes fragmentadas que permiten ver total o parcialmente el disco solar [28]. La segunda es que los eventos de OI se producen por una fuerte dispersión de Mie hacia adelante dentro de nubes delgadas que cubren el disco solar [20, 64]. Además, una combinación de ambas hipótesis también sería posible.

Por lo expuesto en el párrafo anterior, y considerando que la reflexión es un caso particular de dispersión, se puede afirmar que las condiciones necesarias para que se presenten eventos de sobreirradiancia es la presencia de nubes ópticamente gruesas o delgadas que cubran total o parcialmente el disco solar [11, 19, 24, 25, 75, 76]. Precisamente, esta afirmación es la que se evalúa en el presente trabajo de tesis; es decir, investigaremos si los eventos de OI se producen en presencia de nubes ópticamente gruesas o delgadas, y si estas son causadas por reflexiones o por la dispersión de Mie.

Un estudio más completo y definitivo requeriría de cámaras que registren el cielo y espectrorradiómetros que midan la irradiancia espectral directa (DNI), difusa (DHI) y global (GHI), lo cual está lejos del alcance de esta tesis. Además, por razones prácticas y aplicación a los sistemas fotovoltaicos convendría tener todas estas irradiancias para los ángulos de inclinación correspondientes a la latitud del lugar en estudio.

Finalmente, el reforzamiento por albedo (AE, “*Albedo Enhancement*”, por sus siglas en inglés) mencionado por Gueymard [16, 68], albedo del suelo o reflexión del suelo, no se toma en cuenta en este trabajo, ya que al aplicar el filtro por el ángulo de incidencia

(AOI, “*angle of incidence*”, por sus siglas en inglés) ($AOI < 30^\circ$), se espera haber minimizado su contribución a los eventos de OI.

2.3.2. Eventos de sobreirradiancia

Como se mencionó anteriormente, aun no existen definiciones claras ni consenso para el estudio de la OI, como lo demuestra Gueymard en [16, 68], al presentar tres diferentes criterios al respecto:

- 1) que la irradiancia global horizontal (GHI) sea mayor a un sol (1000 W/m^2)
- 2) que el índice de claridad (KT, “*Clearness index*”) sea mayor a 0.8
- 3) que el índice de claridad (KT) sea mayor a 1.0

donde, el índice de claridad (KT) corresponde a la razón entre la irradiancia global horizontal (GHI) y la irradiancia extraterrestre horizontal (ETH, “*Extraterrestrial Horizontal Irradiance*”, por sus siglas en inglés).

En este trabajo, se definirá a un evento de OI, como aquel en el cual la irradiancia solar medida en la superficie terrestre es superior a la irradiancia estimada para condiciones de CS [11, 16, 20, 24, 29, 65, 67, 68, 77, 78]. Para ello, definiremos el índice de cielo claro (k) de la siguiente manera:

$$k = \frac{GHI}{GHI^*} \quad (2.7)$$

Donde GHI (W/m^2) es la irradiancia medida en la superficie terrestre y GHI^* (W/m^2) es la irradiancia simulada para CS.

Ahora, diremos que un evento de OI es aquel donde $k > 1$. Pero por razones prácticas, considerando incertidumbres inherentes a la medida y a los cálculos, y para asegurarnos de que se trata de un evento de OI, en esta tesis, exigiremos que $k > 1.05$; es decir, consideraremos un margen de error del 5 %.

De manera similar, diremos que un evento de cielo nublado (Clo) es aquel donde se verifica que $k < 1$, y por razones prácticas similares a la OI, exigiremos que se cumpla que $k < 0.95$ [79].

Por otro lado, si $k = 1$, o mejor si, $0.95 \leq k \leq 1.05$, entonces hablaremos de eventos de cielo claro (CS).

Según la ecuación (2.7), y por lo explicado en los párrafos anteriores, se puede concluir que es de vital importancia obtener una adecuada estimación de la irradiancia simulada GHI*. Con lo que se podrá distinguir claramente entre los eventos o valores de irradiancia que corresponden a OI, Clo, y CS. Precisamente, en este trabajo de tesis se presenta una metodología propia para lograr este objetivo.

Es importante mencionar que, en este trabajo de tesis, en vez de las irradiancias horizontales, se ha trabajado con las irradiancias inclinadas, debido a que en general los sistemas fotovoltaicos instalados a nivel mundial tienen ángulos de inclinación respecto a la superficie terrestre según la latitud a la que se encuentren.

Finalmente, es importante mencionar que solo es de interés práctico estudiar los eventos de OI mayores a un sol; es decir, 1000 W/m^2 , puesto que eventos con irradiancias mayores a un sol, pueden afectar el rendimiento y, por ende, la producción total de energía de los sistemas fotovoltaicos. En tal sentido, se dejan atrás los eventos de OI que se producen tanto al amanecer como al atardecer, por ejemplo, ya que estos pueden mostrar valores altos del índice de cielo claro k , pero tener irradiancias bastante bajas. Esto se logra filtrando los datos por el ángulo de incidencia AOI.

2.3.3. Eventos de sobreirradiación extrema (EOI)

Tomando como ejemplo el índice de claridad de la atmósfera (KT) (*clearness index*) y utilizando como nivel de referencia a la constante solar (SC), diremos que un evento de sobreirradiación extrema EOI es aquel donde la irradiancia experimental medida en la superficie terrestre es mayor a la constante solar (1361.1 W/m^2) [34]; es decir que, si $GHI > SC$, entonces se tendrá un evento de EOI [24, 25, 79].

De manera similar se puede definir para el caso de la irradiancia global inclinada GTI.

Es necesario hacer notar que todo evento de EOI [8, 16–19, 22, 25] es un evento de OI, pero dar una definición para este caso particular es importante ya que los eventos de EOI no solo afectan la producción de energía de los sistemas fotovoltaicos, debido a que los inversores entran en modo de protección por sobrecarga limitando o desconectando la energía, sino que también pueden afectar su funcionamiento en caso no se haya dimensionado adecuadamente al inversor. Las variaciones bruscas de irradiancia causarían variaciones también bruscas en la potencia de entrada del inversor, produciendo sobrecalentamiento y hasta daños permanentes que llevarían pérdidas económicas de consideración. Además, estudios recientes han demostrado que condiciones de OI que duran más de un minuto y a temperaturas ambiente superiores a los 30 °C pueden afectar el funcionamiento de los sistemas de protección, como calentar y dañar los fusibles, y provocar sobrecargas en los inversores [24–29, 80].

2.3.4. Estado actual y desafíos pendientes referidos a sobreirradiancia

Hace más de 5 décadas que se ha descubierto el fenómeno de la sobreirradiancia, pero hasta la fecha no existen definiciones claras ni consensuadas al respecto. Empezar a formalizar algunos conceptos facilitaría su estudio y comprensión.

Ahora que el cambio de la matriz energética se está impulsando a nivel mundial [81–83] se hace necesario comprender el origen de las condiciones necesarias para que se produzcan los eventos de OI y EOI con el fin de minimizar los efectos de daños en las plantas de energía fotovoltaica y para un mejor aprovechamiento de este fenómeno, en el caso de plantas concentradoras solares.

Es necesario contar con más información experimental de la ocurrencia de eventos de OI y EOI, tales como: irradiancias espectrales globales, directas y difusas en los planos horizontal e inclinado, así como de imágenes del cielo para cuantificar la cobertura de nubes, e incluir datos e imágenes satelitales como la profundidad óptica de nubes, la profundidad óptica de aerosoles, tamaño de gotas, y otras que permitan comprender este fenómeno [24, 68, 84]. Precisamente en este trabajo, se explorará la correlación entre la irradiancia y la profundidad óptica de las nubes.

Reducir los tiempos de muestreo de todo tipo de datos experimentales asociados a los eventos de OI y EOI, como por ejemplo que las irradiancias espectrales sean medidas cada segundo [20, 24, 80], en especial porque cuando un evento de OI es más extremo, menor será su tiempo de duración. De igual manera, para los datos satelitales que prometen ser importantes para su comprensión.

Los resultados de analizar la mayor cantidad de datos experimentales contribuirán a desarrollar mejores modelos de transferencia radiativa que permitan simular de manera más adecuada la ocurrencia de los eventos de OI y EOI.

Faltan estudios para analizar las distribuciones espectrales en las regiones UV, VIS, e IR durante los eventos de OI y sus implicancias en los sistemas biológicos.



3. Bases de datos y metodología

En esta parte del trabajo, dedicado a la metodología, se presenta las fuentes de los datos experimentales que se puede resumir en tres. Tenemos primero a las irradiancias: irradiancia global horizontal (GHI) e irradiancia global inclinada (GTI) medida por piranómetros EKO MS-80 y la irradiancia global inclinada (GTI) medida por un mini-modulo fotovoltaico policristalino calibrado, en el rango de 280 nm a 4000 nm, ubicados en la ciudad de Lima, Perú. En segundo lugar, mencionamos a la irradiancia espectral solar medidas por tres espectrorradiómetros que miden en el rango de 300 nm a 1100 nm, ubicados en las ciudades de Lima en Perú, Madrid en España, y Berlín en Alemania. Finalmente, en tercer lugar, la profundidad óptica de las nubes medido por el satélite geoestacionario GOES-16 de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) y la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA), ambas instituciones pertenecientes a los Estados Unidos de América.

Es importante mencionar, que también se tenían datos de irradiancia de Madrid y Berlín, pero estos datos provenientes de los piranómetros no estaban sincronizados con los datos de sus respectivos espectrorradiómetros, por lo que para esta tesis se decidió trabajar solamente con datos provenientes de los tres espectrorradiómetros ubicados en cada ciudad, Lima, Madrid y Berlín. La sincronización entre los datos del piranómetro y del espectrorradiómetro en cada ciudad era de vital importancia por cuanto en esta tesis se calcula la energía media fotónica (APE, "*Average Photon Energy*", por sus siglas en inglés) la cual debe corresponder exactamente a un valor de irradiancia (GTI). La solución a este problema se pudo conseguir trabajando sólo con los datos de los espectrorradiómetros, pero incluyendo los métodos de extrapolación en las regiones del ultravioleta e infrarrojo para cubrir el rango total de los 280 nm a los 4000 nm [85, 86].

Por lo expuesto, se presenta también, todo el tratamiento digital de los datos de la irradiancia espectral ($W/m^2/nm$) provenientes de los espectrorradiómetros en el rango de 300 nm a 1100 nm para obtener la irradiancia (W/m^2) en el rango de 280 nm a 4000 nm usando los métodos de extrapolación de la irradiancia espectral solar en las regiones del ultravioleta (UV) e infrarrojo (IR). La irradiancia calculada de esta manera

puede luego compararse con la irradiancia teórica estimada para condiciones de CS por la biblioteca PVLIB del lenguaje de programación Python [87–90] (<https://pypi.org/project/pvlib/> , consultado el 08 de junio de 2024). Sin embargo, la estimación obtenida por el PVLIB subestima o sobreestima la irradiancia solar dependiendo de la estación y del día del año, por lo que es necesario buscar otra curva de irradiancia que se ajuste mejor a los datos experimentales. Para resolver este dilema, se realizó un ajuste lineal entre los datos experimentales para cielo claro (CS) y sus correspondientes estimaciones por el PVLIB, lo que permite generar una nueva curva de irradiancia que se ajusta bastante bien a la obtenida de los datos experimentales, y sirve para diferenciar entre las diferentes condiciones del cielo, como son: cielo claro (CS), sobreirradiación (OI) y cielo nublado (Clo).

Luego de poder diferenciar los datos de CS, OI y Clo, podemos concentrarnos en analizar la irradiancia y la energía media fotónica dentro del rango de 350 nm a 1050 nm, así como en los rangos UV (350 nm - 400 nm), VIS (400 nm - 700 nm), e IR (700 nm - 1050 nm), considerando solamente los datos medidos por el espectrorradiómetro.

Finalmente, se obtuvo los datos de la profundidad óptica de las nubes (COD, “*Cloud Optical Depth*”, por sus siglas en inglés) del satélite GOES-16 mediante un algoritmo en Python y se hizo la conversión del tiempo coordinado universal (UTC, “*Universal Time Coordinate*”, por sus siglas en inglés) al tiempo local de Lima para poder conocer el tipo de nubes presentes durante las diferentes condiciones del cielo, en particular, durante las condiciones de sobreirradiación OI y sobreirradiación extrema EOI.

3.1. Datos experimentales de irradiancia

Para validar los eventos de sobreirradiación OI y sobreirradiación extrema EOI detectados en la ciudad de Lima, se analizaron 7 meses de datos de irradiancia solar, de octubre de 2019 a abril de 2020. Para ello se utilizaron dos piranómetros clase A, EKO MS-80, uno para medir la irradiancia global horizontal (GHI^P) y el otro para medir la irradiancia global inclinada (GTI^P) inclinado 20 ° con respecto a la horizontal. Así mismo, se midió la irradiancia global con un mini-modulo fotovoltaico policristalino calibrado

que tiene el mismo ángulo de inclinación que el piranómetro inclinado (20°). Los piranómetros miden la irradiancia global en W/m^2 , mientras que el mini-modulo fotovoltaico policristalino provee información en Voltios que puede ser correlacionada con la irradiancia solar global del piranómetro inclinado, ya que ambos tienen el mismo ángulo de inclinación.

Todos estos instrumentos se encuentran ubicados en el Laboratorio de Investigación Fotovoltaica de la Sección Física en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), en la ciudad de Lima, en Perú, cuya latitud y longitud son de -12.07° , y -77.08° , respectivamente [62, 91]. En tal sentido, todos los instrumentos están orientados mirando hacia el Norte y con un ángulo azimutal de 0° .

Para calibrar el mini-modulo fotovoltaico policristalino se determina la correlación entre el mini-modulo fotovoltaico y el piranómetro inclinado usando el método de mínimos cuadrados (MMC) y los datos para un día soleado o de CS. Esta calibración se recomienda hacer periódicamente y siempre que ocurran días de cielo claro.

3.2. Datos experimentales de irradiancia espectral

En el presente trabajo de tesis se han analizado también dos años de datos de la irradiancia espectral de tres ciudades diferentes como son Lima, Madrid y Berlín. En Lima, Perú, los datos analizados van desde mayo de 2019 hasta mayo de 2021. En Madrid, España, los datos analizados van desde enero de 2016 hasta diciembre de 2017, y finalmente, los datos analizados de Berlín, Alemania, van desde enero de 2019 hasta diciembre de 2020. Lima se encuentra en el hemisferio sur terrestre a baja latitud, mientras que Madrid y Berlín se encuentran en el hemisferio norte a media latitud. En Lima y Berlín, la irradiancia espectral fue medida por un espectrorradiómetro EKO MS-711 cuyo rango espectral va desde los 300 nm hasta los 1100 nm, con resolución óptica FWHM < 7 nm y con una precisión en la longitud de onda de ± 0.2 nm. Por el contrario, en Madrid, la irradiancia espectral fue medida por un espectrorradiómetro EKO MS-700 cuyo rango espectral también va desde los 300 nm hasta los 1100 nm, pero con resolución óptica FWHM < 10 nm y con una precisión en la longitud de onda de ± 0.3 nm. En Lima, el espectrorradiómetro se encuentra ubicado en

el Laboratorio de Investigación Fotovoltaica de la PUCP, mirando al norte, con un ángulo de inclinación de 20° con la horizontal, un ángulo azimutal de 0° , y un tiempo de muestreo de 40 segundos aproximadamente. Una vista de los instrumentos del Laboratorio de Investigación Fotovoltaica de la PUCP puede verse en la Figura 3.1. En Madrid, el espectrorradiómetro se encuentra ubicado en el Laboratorio del Grupo de Investigación IDEA de la Universidad de Jaén en España, siendo $+40.33^\circ$ y -3.77° su latitud y longitud respectivamente. El espectrorradiómetro está mirando hacia el sur, con un ángulo de inclinación de 30° con la horizontal, un ángulo azimutal de 180° , y un tiempo de muestreo de 300 segundos aproximadamente. En Berlín, el espectrorradiómetro se encuentra ubicado en el Laboratorio del Helmholtz Zentrum Berlin für Materialien und Energie, siendo $+52.43^\circ$ y $+13.52^\circ$ su latitud y longitud respectivamente. El espectrorradiómetro está mirando hacia el sur, con un ángulo de inclinación de 35° con la horizontal, un ángulo azimutal de 180° , y un tiempo de muestreo de 300 segundos.



Figura 3.1 Laboratorio de Investigación Fotovoltaica de la Sección de Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.

En la Tabla 3.1 se resume la información relevante con respecto a los tres espectrorradiómetros.

Tabla 3.1 Ubicación geográfica y datos relevantes de los espectrorradiómetros.

Ciudad	Latitud (°)	Longitud (°)	Espectrorradiómetro	Angulo de inclinación (°)	Angulo azimutal (°)	Intervalo de muestreo (s)
Lima	-12.07	-77.08	EKO MS-711	20	0	40
Madrid	40.33	-3.77	EKO MS-700	30	180	300
Berlín	52.43	13.52	EKO MS-711	35	180	300

Los espectrorradiómetros proveen la distribución espectral de la irradiancia solar en $W/m^2/nm$, por cuanto para obtener la irradiancia global en W/m^2 se requiere aplicar un método de integración numérica que, en nuestro caso, es el método del trapecio. Los tres espectrorradiómetros fueron calibrados durante los periodos de tiempo de los datos utilizados para este estudio. En el caso de Lima, los valores de la irradiancia global extrapolada en la región del IR han sido comparados con las medidas realizadas por los dos piranómetros EKO MS-80 y por el mini-modulo fotovoltaico policristalino calibrado, mencionados en la sección 3.1., cuyos resultados fueron presentados en un primer artículo publicado en 2021 [22]. En esta tesis, se volverá a presentar este resultado, pero aplicando los dos métodos de extrapolación; es decir, no solo la extrapolación en el IR como en [22] sino que también, la extrapolación en el UV, el cual se ha aplicado en el segundo artículo publicado en 2023 [79]. Estas técnicas de extrapolación se discuten en la siguiente sección 3.3.

Es importante mencionar que este estudio trata de entender la fenomenología de los eventos de sobreirradiancia (OI) por lo que los datos utilizados son independientes de la época y las fechas en que fueron registradas. Además, nuestro estudio también es independiente del hemisferio terrestre y la latitud, resultados que se publicaron en julio del 2023 [79]. Esta independencia se debe principalmente a la metodología propuesta en esta tesis, donde el impacto de la OI sobre la distribución espectral se realiza con respecto al espectro de CS de ese mismo día y en el mismo lugar, y con datos provenientes del mismo espectrorradiómetro.

3.3. Extrapolación de datos espectrales para irradiancia

Los espectrorradiómetros EKO MS-711 y EKO MS-700 tienen un rango espectral que va desde los 300 nm hasta los 1100 nm, lo cual no es suficiente si se quiere comparar con la irradiancia medida por un piranómetro estándar, como se desarrolla en este trabajo de Tesis, con la irradiancia estimada teóricamente para condiciones de cielo claro (CS). En ambos casos el rango de longitud de onda va desde los 280 nm hasta los 4000 nm. Para resolver este problema, se aplicó dos métodos de extrapolación, uno para ampliar el rango hasta los 280 nm según Neves et al. [85] y el otro para ampliar hasta los 4000 nm según Martin y Ruiz [86]. En resumen, la extrapolación de Neves et al. se realiza en el ultravioleta (UV) mientras que, la extrapolación de Martin y Ruiz es para el infrarrojo (IR). De esta manera, la irradiancia global inclinada (GTI) en W/m^2 obtenido a partir de los datos experimentales, se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación (3.1):

$$GTI = \frac{\int_{280}^{350} E^*(\lambda) d\lambda}{\int_{350}^{400} E^*(\lambda) d\lambda} \int_{350}^{400} E(\lambda) d\lambda + \int_{350}^{1050} E(\lambda) d\lambda + \frac{\int_{1050}^{4000} E^*(\lambda) d\lambda}{\int_{700}^{1050} E^*(\lambda) d\lambda} \int_{700}^{1050} E(\lambda) d\lambda \quad (3.1)$$

donde $E(\lambda)$ es la irradiancia espectral medida por el espectrorradiómetro y $E^*(\lambda)$ es la irradiancia espectral de referencia AM1.5G en $W/m^2/nm$. En un primer artículo [22] se demuestra que el método de extrapolación de Martin y Ruiz [86], en la región del IR, ya era una aproximación bastante buena, con una diferencia de solo 6.4 % a la irradiancia global inclinada (GTI) medida por un piranómetro con el mismo grado de inclinación y sincronizado con el espectrorradiómetro. En el segundo artículo [79] se mejoró esta aproximación hasta una diferencia de 6.1 % incluyendo el método de extrapolación de Neves et al. [85] en el UV, permitiendo identificar los eventos de cielo claro (CS), sobreirradiación (OI), y nublado (Clo).

3.4. Identificación de condiciones de cielo claro, nublado y sobreirradiancia

Ahora que se tiene el procedimiento para hallar la irradiancia global inclinada (GTI) obtenida a partir de los datos experimentales medidos por el espectrorradiómetro, es necesario contar con una curva de irradiancia global inclinada simulada (GTI*) que se aproxime bastante bien a los datos GTI experimentales, para los eventos y las condiciones de cielo claro (CS). De esta manera, será posible diferenciar entre eventos en condiciones de sobreirradiancia (OI) y nublados (Clo).

Otro desafío que se resolvió proviene del hecho de que las características del cielo en cada lugar son propias y muy particulares, así que no solo dependen de su latitud, longitud, o altitud, motivo por el cual, los modelos teóricos para estimar la irradiancia en condiciones de cielo claro (CS) no pueden aplicarse en general. La mayoría de las veces, estas estimaciones sobreestiman y en otras subestiman la GHI y con ello la GTI, debido a que esta se obtiene a partir de un modelo de transposición de la GHI a la GTI. Se planteó una alternativa de ajuste a los datos experimentales, lo que se mostrará a continuación.

3.4.1. Irradiancia estimada por la biblioteca PVLIB Python

Python es un lenguaje de programación ampliamente usado en el mundo científico y académico debido a que ofrece muchas bibliotecas que pueden ser utilizadas en el desarrollo de software, ciencia de datos e inteligencia artificial. En particular, en este trabajo se ha utilizado la biblioteca PVLIB Python, que es una herramienta de código abierto con funciones y clases que tienen por objetivo implementar modelos relevantes de referencia para la energía solar, como son por ejemplo, algoritmos para la posición solar, irradiancia de cielo claro (CS), transposición de irradiancia a un plano inclinado, y otros que conforman un ecosistema creciente de herramientas de código abierto para la energía solar [90].

En particular se utiliza primero la herramienta para estimar la irradiancia global horizontal (GHI) para cielo claro (CS), y luego la herramienta de transposición de la

irradiancia para hallar la irradiancia en el plano del arreglo (POA, por sus siglas en inglés); es decir, estimar la irradiancia para el mismo plano de inclinación sobre el cual se encuentran los espectrorradiómetros (20 °, 30 °, 35 °, para Lima, Madrid y Berlín respectivamente) con respecto a la horizontal [92, 93].

Para poder utilizar las funciones de la biblioteca PVLIB Python, primero se debe instalar de acuerdo con la configuración del sistema que se esté utilizando para el lenguaje de programación Python. Para más información ingrese al siguiente enlace:

https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/user_guide/installation.html

(consultado el 08 de junio de 2024)

En particular, para poder descargar el programa en Python que permite estimar la irradiancia global horizontal (GHI) y luego transponer este a la irradiancia en el plano del arreglo (POA) podemos ingresar a la página web de PVLIB PYTHON:

<https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/>

(consultado el 08 de junio de 2024)

Ubicado en la página anterior, se puede encontrar la pestaña de “Galería de Ejemplo” (Example Gallery), cuyo enlace es el siguiente:

<https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/gallery/index.html>

(consultado el 08 de junio de 2024)

En esta página web se puede encontrar una serie de ejemplos de la funcionalidad de PVLIB. Entre los ejemplos podemos encontrar los de “Transposición de Irradiancia” (Irradiance Transposition), y entre ellos tenemos el de “GHI para Transposición POA” (GHI to POA Transposition). Haciendo clic en ese botón ingresaremos a la página donde se encuentra el algoritmo de “GHI to POA Transposition”:

https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/gallery/irradiance-transposition/plot_ghi_transposition.html#sphx-glr-gallery-irradiance-transposition-plot-ghi-transposition-py

(consultado el 08 de junio de 2024)

En esta última página web, se encuentra también un botón que permite descargar el código en Python.

Este código muestra el uso de la función “pvlib.location.Location.get_clear_sky()” para generar los datos de irradiancia para cielo claro (CS), y de la función “pvlib.irradiance.get_total_irradiance()” para transponer los datos GHI a irradiancia en el plano del arreglo (POA).

El código anterior, permite obtener la irradiancia global GHI y POA cada 10 minutos, para una zona horaria definida, una latitud y longitud determinadas, así como la fecha exacta y los ángulos de inclinación y azimutal.

En la sección 3.2, Tabla 3.1, se dieron los valores de la latitud, longitud, ángulo de inclinación, y ángulo azimutal que deben ser utilizados para adecuar el algoritmo “GHI to POA Transposition” a nuestro caso. Además de estos valores, es necesario incluir las zonas horarias (GMT, “Greenwich Mean Time”, por sus siglas en inglés) de Lima, Madrid y Berlín, como se muestra en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2 Datos de zona horaria para adecuar el algoritmo “ghi to poa transposition”.

Ciudad	Zona horaria (GMT)
Lima	-5
Madrid	+1
Berlín	+1

Por otro lado, la fecha y los tiempos para los cuales se debe estimar la irradiancia en el plano del arreglo (POA) deben ser tomados del archivo de datos del espectrorradiómetro ya que nuestra idea es comparar la irradiancia GTI obtenida a partir de los datos experimentales con la irradiancia estimada POA obtenida teóricamente por el PVLIB; es decir, fue necesario modificar el algoritmo “GHI to POA Transposition” para lograr este objetivo.

En este algoritmo se hizo las modificaciones necesarias para obtener el ángulo de incidencia (AOI) que permitió filtrar la información y apreciar de mejor manera el impacto de las condiciones de OI sobre la distribución espectral.

3.4.2. Irradiancia simulada para identificación de las condiciones del cielo

Como se mencionó anteriormente, las estimaciones teóricas subestiman o sobreestiman la GHI, y además al hallar el POA mediante un modelo de transposición hace evidente que este no tendrá una buena aproximación con los datos experimentales GTI para condiciones de CS, debido a las incertidumbres que presentan los modelos de transposición según lo manifestó Gueymard en 2017 [68].

El procedimiento que se planteó para obtener la irradiancia global inclinada simulada (GTI^*) y que se ajusta mejor a cualquier conjunto de datos en condiciones de CS, consiste en realizar un ajuste lineal entre los datos experimentales GTI para condiciones de CS y sus correspondientes estimaciones para el POA. La pendiente y el intercepto hallado mediante este ajuste lineal nos permite obtener la GTI^* (GTI simulada) y está definida por la ecuación (3.2):

$$GTI^* = \frac{POA - b}{m} \quad (3.2)$$

donde b es el intercepto y m la pendiente del ajuste lineal.

Ahora, para poder distinguir los datos de OI, Clo y CS, se define el índice de cielo-claro-inclinado k^* (tilted-clear-sky index) por la ecuación (3.3):

$$k^* = \frac{GTI}{GTI^*} \quad (3.3)$$

Las ecuaciones (3.2) y (3.3), fueron presentadas en el artículo que se publicó en julio del 2023 [79]. Para ello, se tomó en cuenta publicaciones anteriores de Zamora et al. y

Lohmann [69, 94]. Se estableció que los eventos de sobreirradiancia (OI) son aquellos donde $k^* > 1.05$, mientras que para los casos de cielo nublado Clo $k^* < 0.95$. Para cualquier otro valor del índice de cielo-claro-inclinado k^* ($0.95 \leq k^* \leq 1.05$), se considera que se trata de datos correspondientes a cielo claro (CS).

A continuación, en la Figura 3.2, se muestra el diagrama de flujo que es un resumen grafico de todo el procedimiento expuesto en los dos párrafos anteriores; es decir, desde la obtención del GTI*, hasta la identificación de los eventos OI, Clo, y CS, para cualquier día en general.

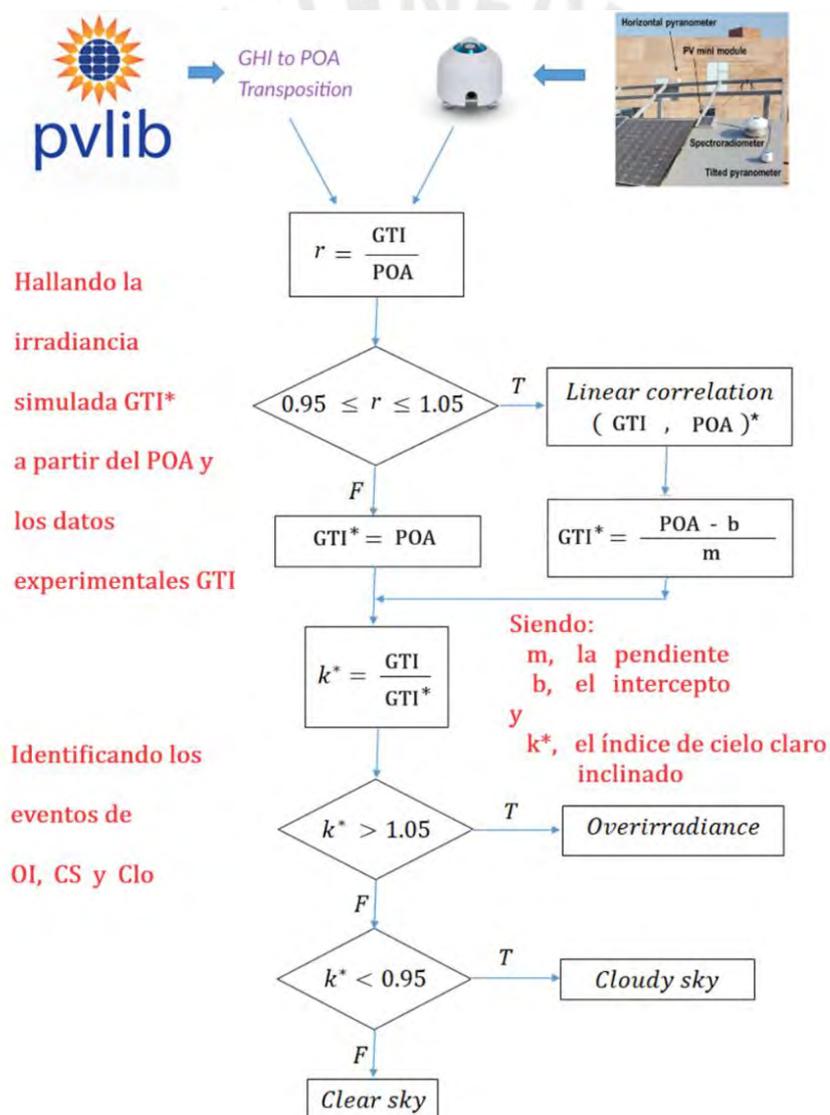


Figura 3.2 Diagrama de flujo de la irradiancia simulada y la identificación de los eventos de OI, Clo y CS.

En la primera parte del diagrama de flujo de la Figura 3.2, la comparación entre la GTI y la POA se realiza para saber si durante ese día existieron eventos de CS. De ser este el caso, se separan todos estos eventos para hallar la correlación lineal con sus correspondientes estimados del POA. La correlación lineal proporciona la pendiente y el intercepto que son necesarios para obtener la irradiancia simulada GTI*. Por otro lado, de no existir eventos de CS durante el día, entonces la GTI* es directamente la POA, indicando que, para un día totalmente nublado, solo queda aceptar la estimación del POA como referencial para ese día en condiciones de CS.

En la segunda parte del diagrama de flujo de la Figura 3.2, se define el índice de cielo-claro-inclinado k^* como la comparación entre la GTI y la GTI*, este con la finalidad de identificar y clasificar los eventos de OI, CS, y Clo.

3.5. Análisis del espectro solar

Ahora que se puede distinguir entre los datos que corresponden a condiciones de OI, CS y Clo, se requiere entender cuál es el impacto sobre la distribución espectral y la irradiancia de las condiciones de OI y Clo con respecto a CS. Se calcula la irradiancia (GTI) y la energía media fotónica (APE) para el espectro total medido por el espectrorradiómetro (350 nm – 1050 nm), y para las regiones: UV (350 nm – 400 nm), VIS (400 nm – 700 nm), e IR (700 nm – 1050 nm).

La energía media fotónica (APE) entre los 350 nm y 1050 nm, es el índice más ampliamente utilizado y que caracteriza la distribución de la irradiancia espectral [95–98]. Este índice fue propuesto por Jardine et al. en el 2002 [99] y sirve para describir cuantitativamente un espectro; es decir, si el espectro tiene un corrimiento al rojo o al azul con respecto a otro espectro de referencia que usualmente es el espectro estándar AM1.5G [100, 101]. El APE en electrón voltios [eV] se calcula mediante la siguiente ecuación (3.4):

$$APE = \frac{\int_{350}^{1050} E(\lambda) d\lambda}{q \int_{350}^{1050} \Phi(\lambda) d\lambda}; \quad \Phi(\lambda) = \frac{E(\lambda)}{hc/\lambda} \quad (3.4)$$

donde $E(\lambda)$ es la irradiancia espectral medida por el espectrorradiómetro en $[W/m^2/nm]$, q es la carga del electrón en $[eV]$, $\Phi(\lambda)$ es la densidad del flujo de fotones en $[fotones/m^2/s/nm]$ y, hc/λ en $[J]$ es la relación de Planck Einstein [100–102].

Para el espectro estándar AM1.5G el APE es de 1.878 eV, como fue calculado por Minemoto et al. en 2007 [103]. Lamentablemente, este valor no sirve de referencia para nuestro trabajo. En primer lugar, porque el APE en Lima en condiciones de cielo claro (CS) es mayor a 1.880 eV por encontrarse más cerca del ecuador terrestre [91], y en segundo lugar y más importante aún, es que los espectros de referencia corresponderán a eventos de cielo claro (CS), los que serán comparados con los eventos de sobreirradiancia (OI) y los eventos nublados (Clo), todos correspondientes a un mismo día.

Por otro lado, integrando la irradiancia espectral en el rango 350 nm – 1050 nm, calcularemos la irradiancia global inclinada total (GTI^{TOT}) en $[W/m^2]$; es decir, mediante la ecuación (3.5):

$$GTI^{TOT} = \int_{350}^{1050} E(\lambda) d\lambda \quad (3.5)$$

Esta irradiancia GTI^{TOT} , solo se calcula a partir de los datos del espectrorradiómetro en el rango de 350 nm hasta 1050 nm, a diferencia de la GTI experimental que además está extrapolada en las regiones UV e IR; es decir, su rango va desde los 280 nm hasta los 4000 nm.

De manera análoga a las ecuaciones (3.4) y (3.5), se calculará la energía media fotónica y la irradiancia para la región del ultravioleta (UV) que ha sido medido por el espectrorradiómetro; es decir en el rango 350 nm - 400 nm. Para ello se utilizará las siguientes ecuaciones:

$$APE^{UV} = \frac{\int_{350}^{400} E(\lambda) d\lambda}{q \int_{350}^{400} \Phi(\lambda) d\lambda}; \quad \Phi(\lambda) = \frac{E(\lambda)}{hc/\lambda} \quad (3.6)$$

que representa la energía media fotónica en el UV en [eV], y

$$GTI^{UV} = \int_{350}^{400} E(\lambda) d\lambda \quad (3.7)$$

es la irradiancia global inclinada en la región del UV en [W/m²].

Y de manera similar se puede escribir las ecuaciones para las regiones visible (VIS) e infrarrojo (IR):

$$APE^{VIS} = \frac{\int_{400}^{700} E(\lambda) d\lambda}{q \int_{400}^{700} \Phi(\lambda) d\lambda}; \quad \Phi(\lambda) = \frac{E(\lambda)}{hc/\lambda} \quad (3.8)$$

$$GTI^{VIS} = \int_{400}^{700} E(\lambda) d\lambda \quad (3.9)$$

$$APE^{IR} = \frac{\int_{700}^{1050} E(\lambda) d\lambda}{q \int_{700}^{1050} \Phi(\lambda) d\lambda}; \quad \Phi(\lambda) = \frac{E(\lambda)}{hc/\lambda} \quad (3.10)$$

$$GTI^{IR} = \int_{700}^{1050} E(\lambda) d\lambda \quad (3.11)$$

3.6. Datos satelitales de la Profundidad Óptica de Nubes

Ahora que se puede distinguir entre las diferentes condiciones del cielo y diferenciar los eventos de OI, CS y Clo, es importante conocer el tipo de nubes (gruesas o delgadas) que estuvieron presentes durante los eventos de OI. Esta información podría determinar si los eventos de OI fueron producidos por un reforzamiento de la reflexión en los bordes de las nubes (CE) o por una fuerte dispersión directa de Mie (FMS, “*Forward Mie Scattering*”, por sus siglas en inglés), o por ambas en un sentido más general.

La primera posible causa CE se debería a nubes gruesas, mientras que la FMS ocurriría con nubes delgadas. Precisamente, para decir si una nube es gruesa o delgada basta recurrir al concepto de la profundidad óptica de la nube (COD), donde la COD, es una cantidad adimensional que mide la reducción de la luz o la energía transmitida a través de la nube debido a la interacción entre la luz y las partículas de la nube formadas por la condensación del vapor de agua. Estas partículas pueden ser cristales de hielo y/o gotas de agua microscópicas de diferentes tamaños. Cuanto más grandes sean las partículas, entonces, mayor será la COD de la nube. Una nube con COD menor a 3 se considerará delgada, mientras que si el COD es mayor o igual a 3 se considerará gruesa.

Para Lima, los datos de la COD pueden obtenerse del satélite geoestacionario GOES-16, el cual pertenece a la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) y la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA), ambas instituciones de los Estados Unidos de Norte América. El objetivo principal del GOES-16 es observar la superficie terrestre y su atmósfera, por lo que cuenta con un instrumento llamado el Advanced Baseline Imager (ABI) que captura imágenes completas del disco terrestre cada 10 minutos y con una resolución espacial máxima de 2 km. El instrumento ABI cuenta con 16 bandas espectrales: dos de ellas en la región visible, cuatro en la región del infrarrojo cercano, y diez en el infrarrojo.

Los datos satelitales pueden ser solicitados en línea al Archive Information Request System (AIRS), cuya página web es la siguiente:

<https://www.ncdc.noaa.gov/airs-web/search>

(consultado el 08 de junio de 2024)

En esta página web, en la caja para “Select GOES R Series Dataset”, se debe elegir “ABI L2+ Product Data”, luego definir las fechas de inicio y fin, así como la hora de inicio y fin de los datos a solicitar. Además, se deben hacer otras selecciones que en nuestro caso se detallan en la siguiente Tabla 3.3:

Tabla 3.3 Selección para solicitar datos del COD en la página web de AIRS.

Lista	Product Type	ABI Channel	ABI Scan Sector	Satellite
Selección	COD	---	F	G16

Luego de realizar la selección según lo indicado en la Tabla 3.3, deberá confirmar los archivos que requiere y dar una dirección de correo electrónico (e-mail) donde se enviarán los datos solicitados.

En la Tabla 3.3, en la Lista “ABI Channel” no seleccionamos ningún canal, pues el sistema elige el canal por defecto para el COD.

Los datos solicitados llegarán en un par de días a más tardar al correo electrónico antes indicado y luego se tiene un máximo 4 días para descargarlo. En cada archivo recibido se encuentra una imagen completa del disco terrestre en formato netCDF4 correspondiente a 10 minutos de observación. Cada archivo tiene un peso aproximado de 7 MB.

Las imágenes satelitales del COD se encuentran en los archivos solicitados. En cada imagen/archivo se encuentra el COD de todo el disco terrestre observado por el GOES-16. Por lo tanto, para obtener el COD de una ubicación determinada bastará conocer la latitud y longitud del lugar. Como dijimos, esta imagen se encuentra en formato netCDF4, el cual puede ser leído usando una biblioteca de Python, el cual debe ser instalado previamente (GOES package). Una vez instalada la biblioteca anterior, esta puede ser importada para ser utilizada en un programa Python (`import netCDF4`).

A continuación, en la Figura 3.3 se muestra la imagen del 23 de marzo de 2020, observada desde las 17:50 hasta las 18:00 UTC (12:50 hasta 13:00 hora de Lima). Como

se aprecia, esta imagen muestra el disco completo de la superficie terrestre y no es una imagen en el rango visible, por lo que no es una fotografía estándar de la Tierra vista desde el satélite. En esta imagen no es posible identificar las zonas geográficas de la superficie terrestre, ni mucho menos los países que son observados por el satélite. En esta imagen cada píxel está asociada a un valor promedio de la profundidad óptica de las nubes (COD) presentes sobre la superficie terrestre en ese intervalo de tiempo de 10 minutos.

Para obtener la profundidad óptica de las nubes (COD) se ha desarrollado un programa en Python donde los datos de entrada importantes corresponden a las coordenadas geográficas del espectrorradiómetro utilizado; es decir, para el caso de Lima: -12.07° y -77.08° , para la latitud y la longitud respectivamente.

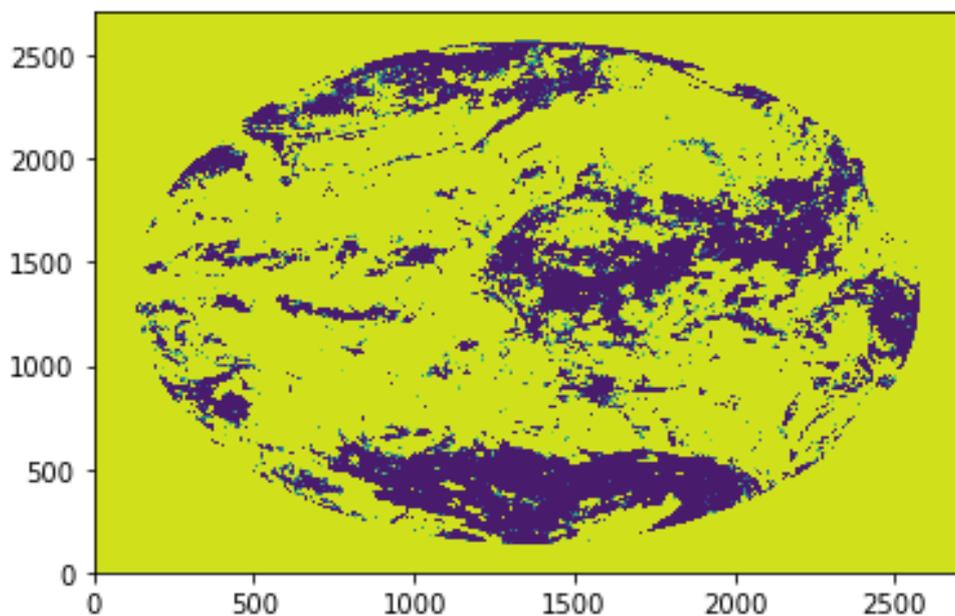


Figura 3.3 Imagen en formato netCDF4 del GOES 16 obteniendo datos del COD para todo el disco terrestre observado.

Como se indicó antes, todas las imágenes satelitales están en el tiempo universal coordinado (UTC), por lo que es necesario desarrollar un programa que nos permita convertir la hora UTC al tiempo local; es decir a la hora en Lima, Perú. Esto es necesario ya que queremos correlacionar los valores de la GTI experimental y la COD promedio

medida por el satélite. Además, se hace imprescindible que asignemos este valor del COD a un instante de tiempo exacto en la hora local de Lima, pues recordemos que el satélite ha observado la atmosfera terrestre durante un intervalo de 10 minutos. Por lo tanto, se hallará la hora promedio desde el instante en que el satélite empezó a medir hasta el instante en que termino de hacerlo, considerando la hora de Lima.



4. Sobreirradiancia y su impacto en la distribución espectral

4.1. Introducción

En este capítulo se detallarán los eventos de sobreirradiancia extrema (EOI) detectados en la ciudad de Lima en Perú, y que fue el inicio para este trabajo de tesis doctoral. Se mostrará la muy buena correlación entre las medidas de la irradiancia obtenidas a partir de piranómetros, mini modulo fotovoltaico y espectrorradiómetro. Esta correlación será cuantificada mediante el coeficiente de correlación de Pearson, el análisis de la raíz del error cuadrático medio (RMSE, "*Root Mean Square Error*", por sus siglas en inglés), y del error medio del sesgo (MBE, "*Mean Bias Error*", por sus siglas en inglés), lo que prueba que un espectrorradiómetro puede ser utilizado para hallar la irradiancia global si aplicamos convenientemente los métodos de extrapolación en la región del UV como del IR. Luego, haciendo uso solo de datos provenientes de espectrorradiómetros, y su irradiancia espectral, se analizará el impacto de los eventos de sobreirradiancia sobre la distribución espectral en bajas y medias latitudes como son Lima, y Madrid y Berlín respectivamente.

4.2. Sobreirradiancia extrema

Este trabajo de tesis doctoral data sus inicios luego de la observación experimental del evento de sobreirradiancia extrema (EOI) del 23 de marzo del 2020 en la ciudad de Lima. Como ya se dijo, un evento de EOI es aquel donde la irradiancia global horizontal o inclinada medida en la superficie terrestre es mayor a la constante solar ($\sim 1361.1 \text{ W/m}^2$) [34], siendo esta constante solar, la irradiancia media en el cinturón ecuatorial medida por los satélites fuera de la atmosfera terrestre con masa de aire igual a cero (AM0) [35]. Por tanto, como se dijo en el primer capítulo, la constante solar no es una constante en el sentido de la Física, es un promedio que depende de varios factores, entre ellos: la temperatura del Sol, la distancia del Sol a la Tierra, las manchas solares, entre otras. Es así que algunos investigadores consideran el valor de 1367 W/m^2 como la constante solar, valor que se utilizó al publicar el primer artículo [22].

En la Tabla 4.1 se muestra eventos de sobreirradiancia extrema EOI ocurridos entre octubre de 2019 y abril de 2020. Los valores más altos de irradiancia global fueron medidos por ambos piranómetros; inclinado (GTI^P) y Horizontal (GHI^P), y son los valores del GTI^P los que se muestran. El valor más alto de EOI que hemos reportado en Lima se realizó con el piranómetro inclinado, siendo de 1543 W/m^2 el 23 de marzo de 2020 después del mediodía. Esto corresponde a más del 13 % por encima de la constante solar y más del 54 % de la irradiancia esperada para cielo claro CS en Lima que sería aproximadamente de 1000 W/m^2 . Se puede observar también que estos eventos de EOI ocurren alrededor del mediodía solar; es decir, cuando el Sol se encuentra más alto sobre la superficie terrestre. Además, se muestra también el número de eventos de EOI que han sido observados cada día, indicando que en un día se pueden observar varios eventos de EOI y aún más eventos de sobreirradiancia OI, entendiéndose que estos eventos de OI son aquellos donde la irradiancia medida en la superficie terrestre es mayor a la irradiancia esperada teóricamente en condiciones de cielo claro CS. Por tanto, debido a las altas irradiancias, los eventos o condiciones de OI deben ser estimados convenientemente para realizar un buen dimensionamiento de los inversores y fusibles de seguridad en la instalación de los sistemas fotovoltaicos, y así aprovechar de manera óptima la energía solar evitando daños en los circuitos electrónicos por sobrecalentamiento o corto circuito.

Tabla 4.1 Eventos de EOI ($>1361.1 \text{ W/m}^2$) en Lima desde octubre de 2019 hasta abril de 2020.

Día	Numero de EOI detectados por día	Mas alto valor de EOI (W/m^2)	Hora de ocurrencia del EOI
23_Mar_2020	2	1543	12:48:56
13_Ene_2020	5	1472	12:08:32
25_Oct_2019	8	1479	12:14:21

La Figura 4.1 ilustra las irradiancias medidas por todos los instrumentos durante el 23 de marzo de 2020. Como se observa, los valores del piranómetro inclinado y del mini-modulo fotovoltaico policristalino son más próximos, por cuanto el mini-modulo fotovoltaico ha sido calibrado usando de referencia el piranómetro inclinado. En

general, el piranómetro horizontal da medidas más bajas que el mini-modulo fotovoltaico y siempre medidas inferiores al piranómetro inclinado, lo cual es de esperarse, pues el ángulo de inclinación es para obtener una máxima irradiancia por parte del piranómetro. Por otro lado, la irradiancia extrapolada obtenida a partir del espectrorradiómetro inclinado es menor a los del piranómetro inclinado y del mini-modulo fotovoltaico. Es importante mencionar que cuando se aplicó solamente el método de extrapolación en la región del IR, método de Martin y Ruiz [86], la irradiancia extrapolada para el evento de EOI fue de 1444 W/m^2 , como fue reportado en [22]. Ahora, incluyendo el método de extrapolación en la región del UV, método de Neves et al. [85]; es decir, usando la ecuación de extrapolación completa (3.1), la irradiancia extrapolada para el EOI llegó a 1449 W/m^2 , indicándonos que el método de extrapolación en el UV no aporta significativamente al valor de la irradiancia global.

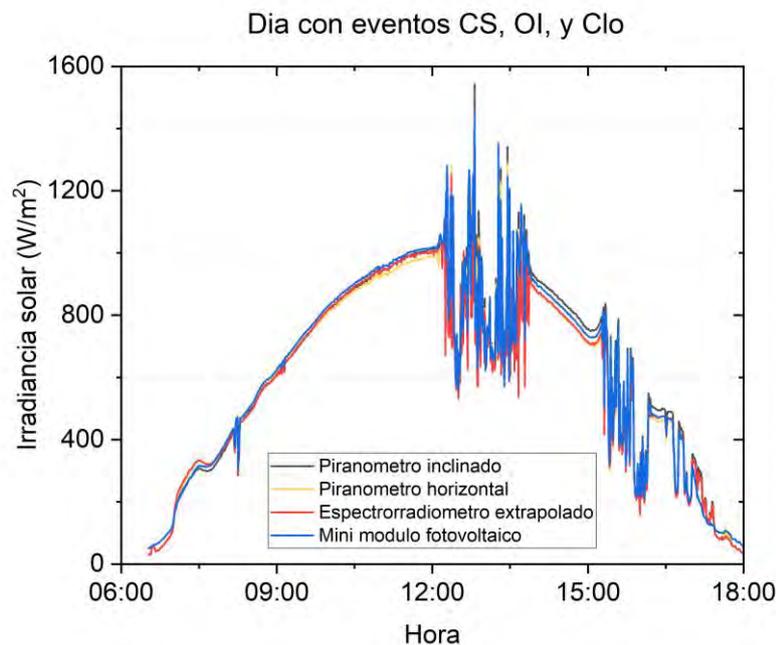


Figura 4.1 Irradiancias medidas el 23 de marzo de 2020 por cuatro instrumentos diferentes en el Laboratorio de Investigación Fotovoltaica de la PUCP.

La información más relevante que se puede obtener de la Figura 4.1 es que todos los instrumentos detectaron el evento de EOI y además todos midieron una irradiancia

mayor a la constante solar. Es importante mencionar también que las ligeras diferencias en el valor de la irradiancia medida por cada uno de los instrumentos puede deberse a que todos ellos no miden exactamente al mismo tiempo; es decir, en el mismo instante, sino de manera secuencial dentro de un intervalo que va de 1 a 3 segundos, tiempo en que el evento de EOI puede cambiar. Finalmente, la diferencia entre la irradiancia medida por el piranómetro inclinado y el espectrorradiómetro puede deberse a que estos tienen una respuesta espectral diferente y además que, en los métodos de extrapolación en el IR y UV, se usó la irradiancia espectral estándar (AM1.5G) como referencia, lo cual puede ser adecuado para latitudes medias, pero no para latitudes bajas como es el caso de Lima.

En la Figura 4.1 se observa también que en diferentes intervalos de tiempo existen condiciones de sobreirradiación; es decir, donde la irradiancia experimental es mayor a la irradiancia esperada. En este trabajo, solo estamos interesados en aquellas condiciones o eventos donde la irradiancia experimental es mayor a un sol (1000 W/m^2) y no sobreirradiaciones menores a este valor, ya que no son relevantes y además no afectan de manera alguna a los sistemas fotovoltaicos, como por ejemplo los detectados después de las 15:00 horas. En este sentido, nuestro intervalo de interés se encuentra entre las 12:00 y las 14:00 horas, donde la sobreirradiación llega a los 1543 W/m^2 , y un evento nublado alcanza los 549 W/m^2 , haciendo una diferencia de casi 1000 W/m^2 . Estas variaciones tan abruptas y bruscas en el tiempo pueden causar problemas en los sistemas fotovoltaicos. Finalmente, este tipo de eventos y condiciones de sobreirradiación han sido reportados a nivel mundial en la literatura científica, por lo que pueden observarse en todo lugar independientemente de su latitud, longitud, y altitud.

Para cuantificar la correlación entre el piranómetro inclinado (GTIP) y los otros tres instrumentos utilizados para construir la Figura 4.1, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson, la raíz del error medio cuadrático (RMSE), y el error medio del sesgo (MBE). El coeficiente de Pearson es una medida de la dependencia lineal entre dos variables, la RMSE mide la raíz de la diferencia cuadrática media entre dos medidas y el MBE mide la diferencia media entre dos medidas, ambas medidas son independientes.

Aquí, la variable de referencia es la medida realizada por el piranómetro inclinado (GTI^P). Los resultados de estas comparaciones se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Coeficiente de Pearson, RMSE, y MBE entre las medidas realizadas por los instrumentos utilizados para la Figura 3.1 tomando como referencia al piranómetro inclinado.

Piranómetro inclinado (GTI^P) como referencia	Espectrorradiómetro extrapolado (GTI)	Mini-modulo FV (GTI^{MM})	Piranómetro horizontal (GHI^P)
Pearson	0.987	0.983	0.998
RMSE (W/m^2)	53.8	59.9	24.8
MBE (W/m^2)	16.9	17.4	11.0

La Tabla 4.2, muestra que la correlación de los datos de los piranómetros inclinado y horizontal es mucho mejor que la correlación entre el piranómetro inclinado y el espectrorradiómetro extrapolado, y este a su vez mejor, que la correlación entre el piranómetro inclinado y el mini-modulo fotovoltaico. Esto puede deberse al hecho de que ambos piranómetros tienen respuestas espectrales similares a la irradiancia solar, a diferencia del espectrorradiómetro y del mini-modulo fotovoltaico. A pesar de esta diferencia entre el espectrorradiómetro y los otros instrumentos, es importante indicar que su coeficiente de correlación de Pearson con el piranómetro inclinado es bastante alto y cercano a la unidad. Por otro lado, los errores RMSE y MBE del espectrorradiómetro extrapolado son incluso menores a los del mini-modulo fotovoltaico.

Para tener la certeza de que todo este trabajo puede realizarse solo con datos medidos por los espectrorradiómetros se ha calculado los coeficientes de correlación de Pearson, el RMSE y el MBE para algunos días en Lima que han presentado eventos de OI, CS y Clo simultáneamente, de manera que podía aplicarse la metodología expuesta en el capítulo 3, en particular, la sección 3.4.2, donde se obtiene la irradiancia simulada GTI^* . Estos cálculos, han demostrado un alto valor promedio del coeficiente de correlación de Pearson llegando a 0.991, y un valor promedio del RMSE de $45.3 W/m^2$. Similarmente se cumple para los valores del MBE, que por razones de análisis y una mejor presentación se muestra en la Figura 4.2.

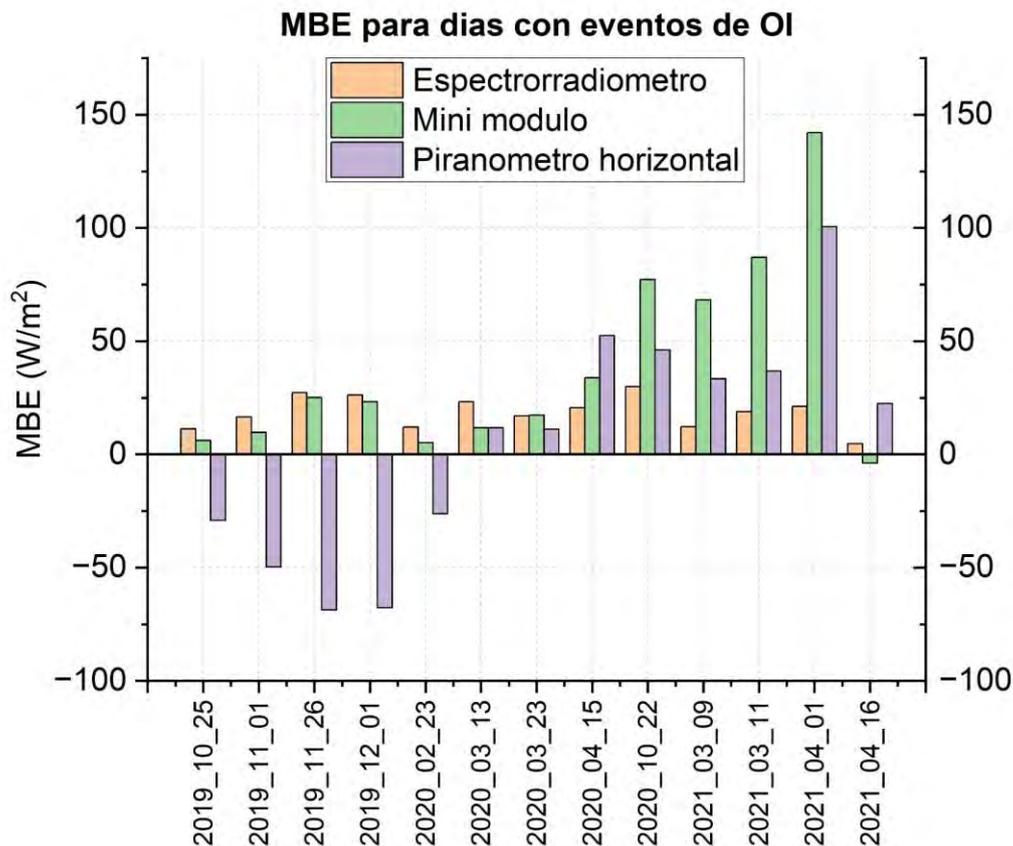


Figura 4.2 Diagrama de barras de errores medios del sesgo (MBE) para el espectrorradiómetro, el mini-modulo fotovoltaico y el piranómetro horizontal con respecto al piranómetro inclinado para días que presentaron eventos de OI, CS, y Clo.

La Figura 4.2, muestra que el error medio del sesgo MBE para el espectrorradiómetro es aceptable y en general sus valores son mejores que los obtenidos por el mini-modulo fotovoltaico y por el piranómetro horizontal. Es interesante notar que en ciertas épocas del año el error medio del sesgo del piranómetro horizontal es negativo, lo que indica que en ciertas épocas del año la irradiancia medida por el piranómetro horizontal es relativamente mayor a la medida por el piranómetro inclinado. Podemos observar también que el 23 de marzo del 2020, el MBE del espectrorradiómetro comienza a ser menor que el MBE del mini-modulo fotovoltaico y a partir de allí, esta tendencia va en aumento durante el año 2020 y el 2021.

Precisamente, el 11 de marzo del 2020 la Organización Mundial de la Salud (OMS) declara el inicio de la pandemia mundial por COVID-19. Se menciona este hecho porque

una vez iniciada la pandemia todas las personas estuvimos confinadas a nuestros hogares, y no había acceso a las universidades del Perú. Como consecuencia de este confinamiento obligado, no se pudo realizar la limpieza semanal de los instrumentos del Laboratorio de Investigación Fotovoltaica de la PUCP. Así que, lo que muestra la Figura 4.2 es muy probablemente el polvo acumulado en los instrumentos, resultando el mini-modulo el más afectado, puesto que al ser plano el polvo se asienta más fácilmente y su acumulación debe ser mayor que en el espectrorradiómetro y en los piranómetros cuyas superficies son semiesféricas y de menor área eficaz que el mini-modulo fotovoltaico.

Además, en esta figura queda claro que las irradiancias calculadas por el espectrorradiómetro, pese a la extrapolación en los rangos UV e IR, siempre es menor que las irradiancias medidas por el piranómetro inclinado. Esto nos deja como conclusión, que es necesario desarrollar métodos de extrapolación más adecuados para las latitudes bajas como la ciudad de Lima, cuya distribución espectral difiere más a la del espectro AM1.5G.

Finalmente, por los resultados anteriores se puede afirmar que, para el fin de identificar condiciones de sobreirradiancia y analizar su distribución espectral, es posible trabajar solamente con datos de espectrorradiómetro en lugares donde no existan datos de irradiancia medidos por piranómetros o donde las medidas de los piranómetros y espectrorradiómetros no estén sincronizados, como es el caso que pasaremos a estudiar en las ciudades de Madrid y Berlín.

4.3. Días de cielo claro

De aquí en adelante se aplicará toda la metodología expuesta en el capítulo 3, usando los datos experimentales proveídos por los espectrorradiómetros ubicados en Lima, Madrid, y Berlín. Todo el tratamiento digital de datos se realizó exclusivamente con el lenguaje de programación Python, usando el IDE Spyder y/o el entorno interactivo Jupyter Notebook, ambos de Anaconda. Mientras que, para la visualización de los resultados, gráficos y figuras, se utilizó el software OriginPro-2023, de OriginLab Corporation.

Se entiende que un día de CS es aquel que se encuentra despejado y sin nubes. Durante un día de CS, la irradiancia inicia desde 0 W/m^2 aproximadamente (Sol en el horizonte), y empieza a aumentar continuamente hasta llegar a un máximo aproximado de 1000 W/m^2 exactamente cuando el Sol se encuentra en su punto más alto sobre la superficie, y luego empieza a decrecer también continuamente hasta su valor inicial de 0 W/m^2 . Esto se asemeja a una parábola con su vértice en la parte superior, lo que se mostrara a continuación a partir de los datos experimentales y simulados [104–106].

En la Figura 4.3, se muestra la comparación de las gráficas de irradiancias GTI, GTI* y POA, como función del tiempo, para días con condiciones de CS en Lima, Madrid y Berlín. Como recordaremos del capítulo 3, la GTI es la irradiancia experimental extrapolada obtenida gracias a la ecuación (3.1), la GTI* es la irradiancia simulada obtenida mediante la ecuación (3.2), mientras que POA es la irradiancia obtenida directamente de la biblioteca PVLIB Python. Como se puede observar, las irradiancias, experimental GTI y simulada GTI*, se correlacionan bastante bien gracias a la metodología propuesta anteriormente.

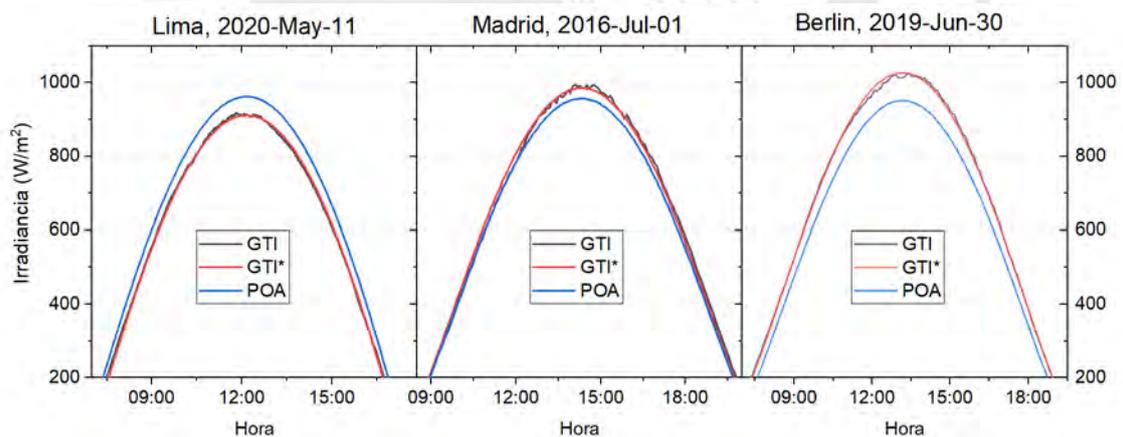


Figura 4.3 Comparación de las irradiancias POA, experimental GTI, y simulada GTI* para días de cielo claro (CS) en lima, Madrid y Berlín.

La Figura 4.3, muestra que la irradiancia POA sobreestima (como en el caso de Lima) o subestima (como en los casos de Madrid y Berlín) a la irradiancia experimental, lo que justifica la metodología planteada para obtener la irradiancia simulada GTI*. Estas

subestimaciones o sobreestimaciones hechas por el PVLIB se dan en cualquier lugar a lo largo del año debido principalmente a los cambios de estación o época del lugar, y a las condiciones atmosféricas propias de cada sitio. Por ejemplo, el gráfico de Lima corresponde al 11 de mayo, fecha que se aproxima al inicio del invierno en el hemisferio sur, mientras que el gráfico de Berlín, corresponde al 30 de junio, día que se aproxima al inicio del verano en el hemisferio norte.

Finalmente, se hace notar que la diferencia entre las irradiancias GTI y POA se incrementa de manera proporcional al valor de la irradiancia, observándose la mayor diferencia entre sus valores máximos.

Ahora que ya se ha obtenido la irradiancia simulada GTI* que se ajusta bastante bien a la irradiancia experimental GTI, se puede continuar con la identificación de los diferentes eventos de OI y Clo que pueden presentarse a lo largo de un día cualquiera, siempre que en ese día se presenten condiciones de CS. Estas condiciones de CS son muy importantes por cuanto nos ayudara a ajustar linealmente estos datos experimentales con sus correspondientes obtenidos por el PVLIB, y así, obtener la irradiancia simulada GTI*.

Ahora, para estimar el impacto del ángulo de incidencia AOI, y con este, de la masa de aire AM sobre la energía media fotónica APE, se ha desarrollado la Figura 4.4. En esta figura, el APE, el índice de cielo-claro-inclinado k^* , y la irradiancia experimental GTI se grafican en función del ángulo de incidencia AOI para los mismos días de CS presentados en la Figura 4.3.

En todos los lugares, Lima, Madrid y Berlín, los días de CS muestran que tanto el APE como el GTI decrecen a medida que el AOI se incrementa. Esto se debe a que mayores valores del AOI corresponden a más altos valores de la masa de aire AM, y consecuentemente una mayor absorción y dispersión de fotones, lo que da como resultado una menor irradiancia y menos fotones de alta energía. Por otro lado, el índice de cielo-claro-inclinado k^* permanece relativamente cerca de la unidad y se encuentra limitado dentro de 1.00 ± 0.05 , como se espera para un día de CS.

En la Figura 4.4, para distinguir de mejor manera el impacto de la sobreirradiación OI sobre el APE, se debe minimizar el impacto de otras variables como el ángulo de incidencia AOI. Para ello, se limitó la ventana de observación para AOI menores a 30° .

Precisamente, las variaciones del APE para AOI menores a 30° son de ~ 3 meV para Lima y Madrid, mientras que es de ~ 2 meV para Berlín, como lo indican las líneas de color naranja. Por tanto, se puede asumir que para AOI menores a 30° el impacto que tiene el cambio de la masa de aire AM sobre la distribución espectral es despreciable. Así dentro de este rango se permite un análisis adecuado del impacto de los eventos de sobreirradiación a la distribución espectral.

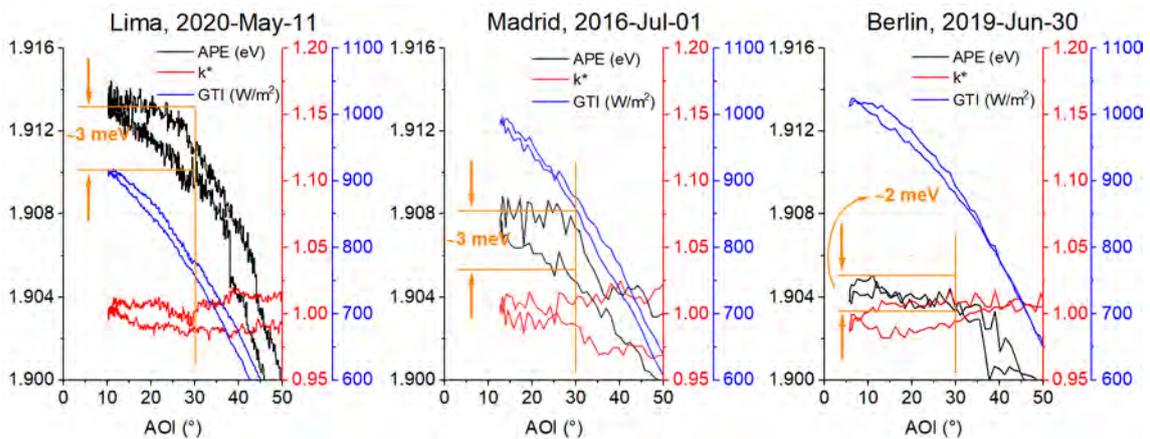


Figura 4.4 APE, k^* , y GTI en función del AOI para los días de CS mostrados en la figura anterior.

4.4. Días con condiciones de cielo claro, nublado y sobreirradiación

La Figura 4.5 muestra las irradiancias, experimental GTI y simulada GTI*, para días con condiciones de CS, Clo y OI, en Lima, Madrid y Berlín. En todos los casos, las irradiancias mostradas son mayores a los 400 W/m^2 . Nótese que las irradiancias, experimental GTI y simulada GTI* se ajustan bastante bien para las condiciones de CS.

La distinción entre condiciones de CS, Clo, y OI se basa en el índice de cielo-claro-inclinado k^* que se ha definido en la ecuación (3.3). Los valores de la irradiancia experimental GTI con k^* 5 % por encima de la irradiancia simulada GTI* corresponden a condiciones de OI, mientras aquellos con k^* 5 % por debajo de la irradiancia simulada GTI* corresponderá a condiciones de Clo. Y los valores que se encuentren entre el ± 5 % serán considerados como condiciones de CS.

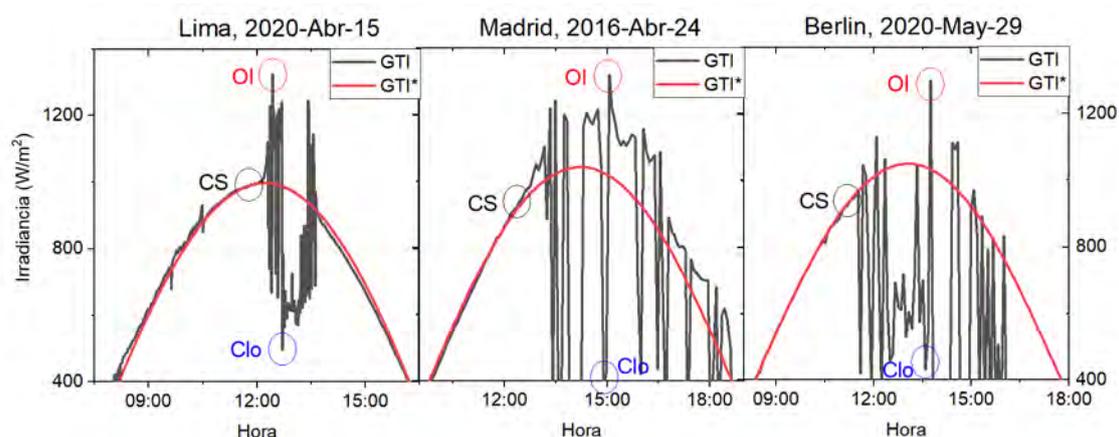


Figura 4.5 Días ejemplares en Lima, Madrid y Berlín, mostrando irradiancias GTI experimental y GTI* simulado para CS. Los círculos identifican los eventos de CS, Clo y OI para los que se mostrara su irradiancia espectral en la Figura 4.6.

La Figura 4.6 muestra las irradiancias espectrales correspondientes a los eventos de CS, Clo, y OI marcados como ejemplos en la Figura 4.5. En todos los lugares, Lima, Madrid y Berlín, la irradiancia espectral de los eventos de OI es mayor a la irradiancia espectral de los eventos de CS a lo largo de todo el rango espectral (350 nm a 1050 nm). El mayor incremento puede observarse dentro de los rangos visible VIS e infrarrojo IR; es decir, en el intervalo de 400 nm a 1050 nm. Esto podría explicar por qué el valor del APE para condiciones de OI es menor que para condiciones de CS. Por otro lado, se puede observar también que en el evento de cielo nublado Clo, el decremento de la irradiancia espectral dentro del rango ultravioleta UV (350 nm a 400 nm) con respecto al evento de CS es bastante alto, indicando posiblemente que la absorción de la radiación UV es proporcional al grosor de las nubes, estudio que se deja de lado por no tratarse del objetivo de este trabajo de tesis, y que podría ser abordado en otro estudio.

Finalmente, la Figura 4.6 muestra también varias bandas de absorción del vapor de agua, siendo la principal aquella que se encuentra centrada en 940 nm, y una fuerte banda del oxígeno centrada en 760 nm. La absorción por parte del oxígeno y del vapor de agua se ve que es proporcional al valor de la irradiancia espectral en sus respectivas longitudes de onda.

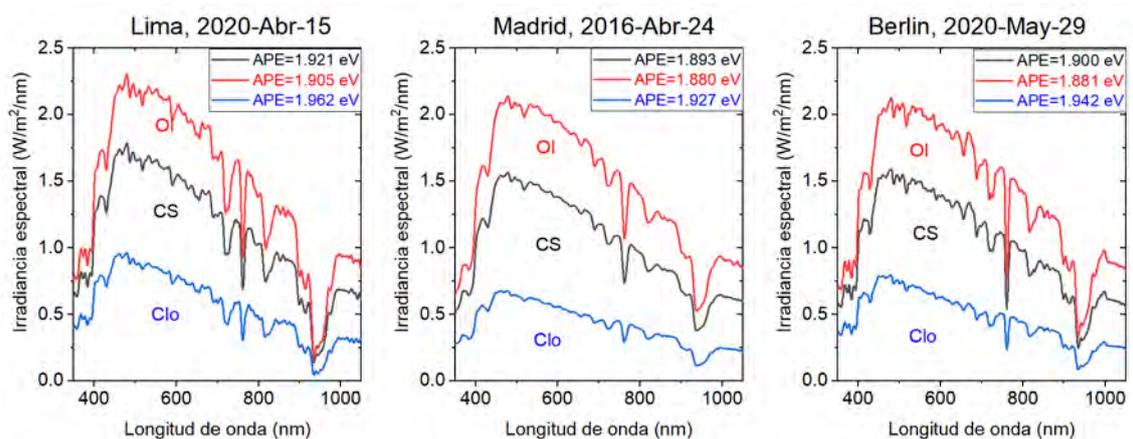


Figura 4.6 Irradiancias espectrales correspondientes a los eventos de CS, Clo, y OI seleccionados en la Figura 4.5 para Lima, Madrid y Berlín.

4.5. Impacto de la OI sobre la distribución espectral

En la Figura 4.7, se muestran la irradiancia experimental GTI y el APE en función del tiempo para valores del AOI menores a 30° . Para días con condiciones de CS, Clo, y OI en Lima, Madrid, y Berlín, las variaciones del APE para CS permanecen por debajo de los ~ 3 meV en la ventana del AOI elegido ($\text{AOI} < 30^\circ$). Se puede observar que para las condiciones de OI el APE decrece, mientras que para las condiciones de Clo el APE se incrementa. Conviene aclarar que los valores más bajos del APE corresponden a los eventos de sobreirradiación extrema EOI, el cual muestra un claro corrimiento al rojo (red-shift) con respecto al APE de CS. Por el contrario, las condiciones de cielo nublado Clo presentan un corrimiento al azul (blue-shift) con respecto al APE de CS, desde que su APE es mayor que el de CS. Esta última observación corrobora el resultado obtenido por Paudyal et al. y Neves et al. [100, 107].

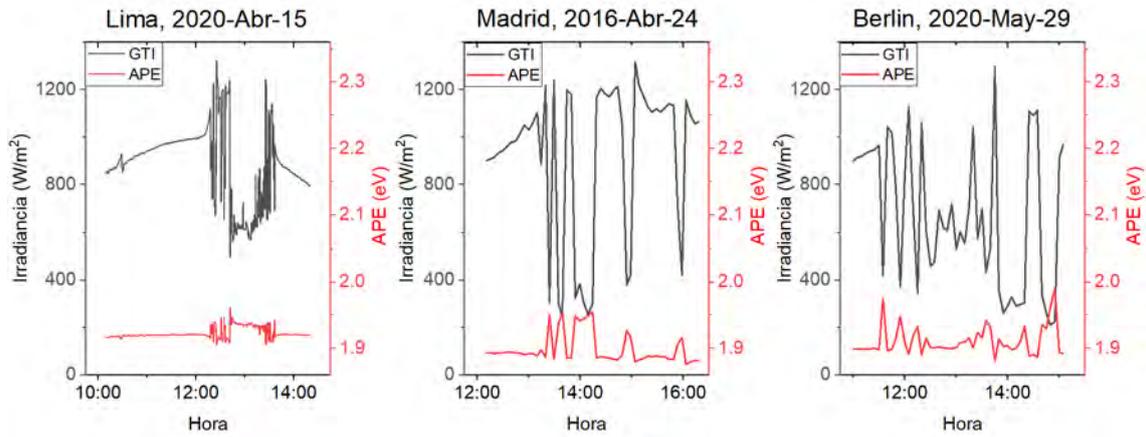


Figura 4.7 Irradiancia experimental GTI y APE en función del tiempo, muestra que el APE y GTI son inversamente proporcionales para todos los eventos OI y Clo.

En la Figura 4.8 se muestra el APE en función del índice de cielo-claro-inclinado k^* para condiciones de CS, Clo, y OI, considerando los AOI menores a 30° . El conjunto entero de todas las gráficas del APE en función de k^* para todos los días con condiciones de CS, Clo, y OI en Lima, Madrid y Berlín, se presentan en los Anexos A.1, A.2, y A.3. El rango de valores del APE para condiciones de cielo nublado Clo (en azul) es generalmente más extenso que el rango de condiciones de OI (en rojo). Esto debido a que la irradiancia en condiciones Clo puede caer mucho más de lo que las condiciones de OI pueden aumentar con respecto a las condiciones de CS, como se muestra en la Figura 4.8 y Figura 4.7 para Madrid, por ejemplo.

En resumen, las condiciones de sobreirradiancia muestran un corrimiento al rojo proporcional al índice de cielo-claro-inclinado k^* . Curiosamente, existe una relación casi lineal inversa entre los valores del APE y k^* para Lima y Madrid; es decir, a valores altos del APE le corresponden valores bajos de k^* , y el APE disminuye a medida que el k^* aumenta. Este comportamiento casi lineal es consistente para casi todos los días analizados para Lima, como puede verse en el Anexo A.1, y mostrando solo algunos días con una ligera gran dispersión de los valores del APE para condiciones Clo, pero raramente llegando a valores de k^* por debajo de 0.4. Mientras que, para Madrid muchos de los días en el Anexo A.2 muestran una dispersión mayor del APE para las condiciones Clo, particularmente para valores de k^* menores a 0.4. En la Figura 4.8, para Berlín, la relación casi lineal entre el APE y k^* es solo aparente para el caso de

condiciones de OI, mas no así, para el caso de condiciones Clo donde los valores del APE están más dispersos. En el Anexo A.3, este comportamiento es observado con mayor frecuencia en Berlín. Para resolver esta discrepancia de la relación del APE y k^* para condiciones Clo se requiere un análisis más exhaustivo del tipo de nubes presentes durante estos eventos, lo cual está fuera del alcance de este trabajo de tesis.

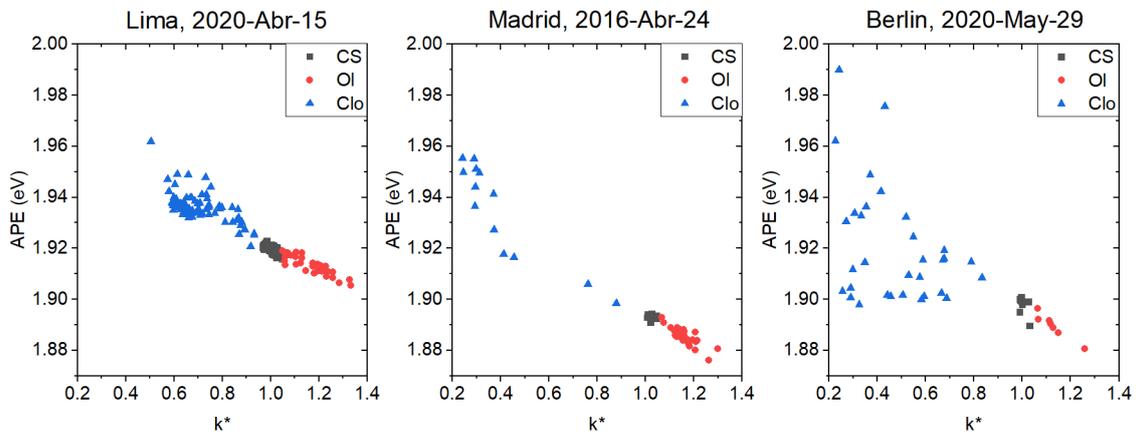


Figura 4.8 APE en función de k^* muestra corrimiento al rojo para OI y corrimiento al azul para Clo.

Durante las condiciones de OI, el índice de cielo-claro-inclinado k^* es un indicador de la intensidad del reforzamiento de la irradiancia (CE). La relación cuasi lineal antes mencionada indica que a mayor reforzamiento de la irradiancia mayor será el corrimiento al rojo (red-shift) de la distribución espectral. Una explicación para este corrimiento al rojo puede ser que la condición de OI refuerza predominantemente la componente directa de la irradiancia global [16]. En 2017, Kirn y Topic [108] midieron la distribución espectral de las componentes difusa y directa del espectro solar global, demostrando que presentan un corrimiento al azul y un corrimiento al rojo respectivamente. Por tanto, un refuerzo predominante de la componente directa debe ser la causa del corrimiento al rojo en la irradiancia espectral global durante los eventos y las condiciones de OI.

A continuación, se analiza la reproducibilidad y las estadísticas del desplazamiento al azul y al rojo durante las condiciones de Clo y OI en Lima, Madrid, y Berlín

respectivamente. En todos los casos se observan relaciones cuasi lineales similares entre el APE y el k^* como en la Figura 4.8. La Figura 4.9 (A) muestra los valores medios del APE con un intervalo de confianza del 95 % de todos los días que presentaron condiciones de CS, Clo, y OI simultáneamente durante un día y con ángulos de incidencia AOI menores a los 30 °. El número de días con condiciones de OI fue considerablemente mayor que el presentado aquí.

Sin embargo, para seguir la metodología y el procedimiento propuesto anteriormente, se limitó el análisis a los días que mostraron condiciones de CS, Clo, y OI dentro de la ventana de observación ($AOI < 30^\circ$), ya que se requiere datos de CS para obtener la GTI* con la metodología propuesta. Por tanto, se descartaron los días con condiciones de OI donde no había condiciones de CS, o que tuvieran muy pocos eventos de CS que no permitieran hacer una estadística aceptable para este trabajo. Es importante mencionar que, como los eventos de OI suelen producirse durante periodos muy cortos, es posible que no se pudieran observar durante la medición, especialmente en Madrid y Berlín, donde el periodo de medición fue de 5 minutos. Sin embargo, los días que se han trabajado con datos de CS, Clo, y OI son suficientes para el análisis estadístico.

En la Figura 4.9 (A), los valores medios del APE y sus intervalos de confianza para las condiciones CS, Clo, y OI no se superponen, excepto en algún par de casos, lo que indica que los respectivos APE desplazados al azul y al rojo son estadísticamente diferentes del APE para CS. Por otro lado, los valores medios del APE para CS varían como es de esperarse según la estación y por tanto, según el día del año, como lo mostraron Jardine y Minemoto [99, 103], pero siempre permanecen por debajo del valor medio de Clo, y por encima del valor medio de OI.

Con respecto a los valores del APE para las condiciones de CS en cada una de las ciudades, como se muestra en la Figura 4.9 (A), en promedio, el APE en Lima es mayor que los valores del APE en Madrid y Berlín, lo que puede atribuirse a la mayor proximidad de Lima a la línea ecuatorial terrestre y, por lo tanto, la masa de aire en general es menor alrededor del mediodía. Por otro lado, la dispersión y el valor medio del APE para condiciones de cielo nublado Clo son mayores para Berlín y Madrid que para Lima, lo cual puede deberse a condiciones atmosféricas específicas de cada lugar,

como el tipo de nubes, entre otras, y que está más allá del alcance de este trabajo de tesis.

La Figura 4.9 (B) muestra la diferencia (ΔAPE) entre los APE medios de OI y CS, así como entre los APE medios de Clo y CS respectivamente para Lima, Madrid, y Berlín. Un valor de ΔAPE positivo indica un corrimiento al rojo (red-shift), mientras que un ΔAPE negativo corresponde a un corrimiento al azul (blue-shift) del espectro solar.

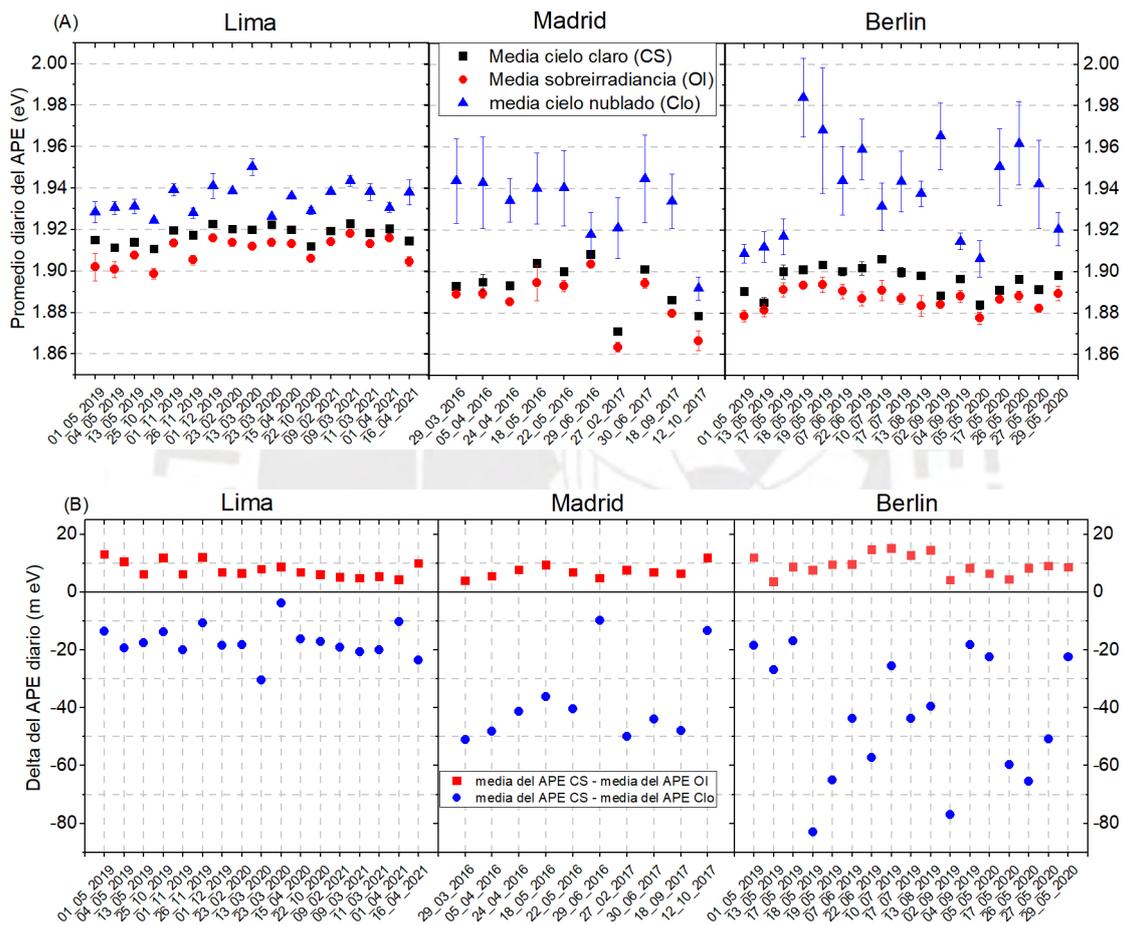


Figura 4.9 (A) Valores medios diarios del APE para condiciones de CS, Clo, y OI con barras de error correspondientes a intervalos de confianza del 95 %. (B) Diferencia diaria entre los valores medios del APE para OI y Clo con respecto a CS.

Las condiciones de cielo nublado Clo en Madrid tienden a desplazar el espectro solar hacia el azul más que en Lima, mientras que en Berlín el corrimiento al azul esta más disperso, e incluso algunos días muestran un corrimiento más intenso al azul entre los

tres lugares estudiados. Para Lima, la diferencia ΔAPE para CS-Clo muestra solo una pequeña variabilidad del tipo de nubes para todos los días observados.

La Figura 4.10, resume las estadísticas del análisis espectral a lo largo del trabajo experimental. En la Figura 4.10 (A), los diagramas de caja representan la distribución estadística de los valores del APE para cada ciudad presentados en la Figura 4.9 (A), para los días con condiciones de CS, OI, y Clo, y para ángulos de incidencia AOI menores a 30° . El valor medio del APE para CS en Lima es mayor que en Madrid y Berlín debido a su proximidad al ecuador terrestre. El corrimiento hacia el azul de los valores medios del APE para condiciones Clo no difieren considerablemente entre cada lugar, por lo tanto, pueden ser independientes del APE para CS. Sin embargo, la dispersión de los valores del APE para condiciones Clo varía considerablemente en cada lugar. Esta gran dispersión de los valores del APE para las condiciones Clo podría representar la variedad de los tipos de nubes, nubosidad y otros factores atmosféricos propios de cada lugar. Por otro lado, el corrimiento hacia el rojo de los valores medios del APE para condiciones OI parecen depender de los valores medios del APE para condiciones de CS en cada lugar.

La Figura 4.10 (B) muestra los diagramas de caja de la diferencia del APE (ΔAPE) diario mostrado en la Figura 4.9 (B), y la Tabla 4.3 resume el ΔAPE medio. El ΔAPE medio para las condiciones Clo en Lima es el más pequeño, lo que indica el menor desplazamiento hacia el azul y una dispersión insignificante. Madrid y Berlín muestran un ΔAPE medio similar para las condiciones Clo. El ΔAPE medio para las condiciones Clo en Berlín es más del doble que el de Lima, lo que indica que las condiciones nubladas Clo en Berlín provocan un considerable desplazamiento hacia el azul de la irradiancia global del CS. Es interesante observar que la ΔAPE media para condiciones de OI es bastante similar en los tres lugares, con 8, 7 y 9 meV para Lima, Madrid y Berlín respectivamente, lo que sugiere que las causas de estos eventos de OI son de naturaleza semejante y, por lo tanto, independiente de cada lugar. Esto se puede apreciar en la Tabla 4.3.

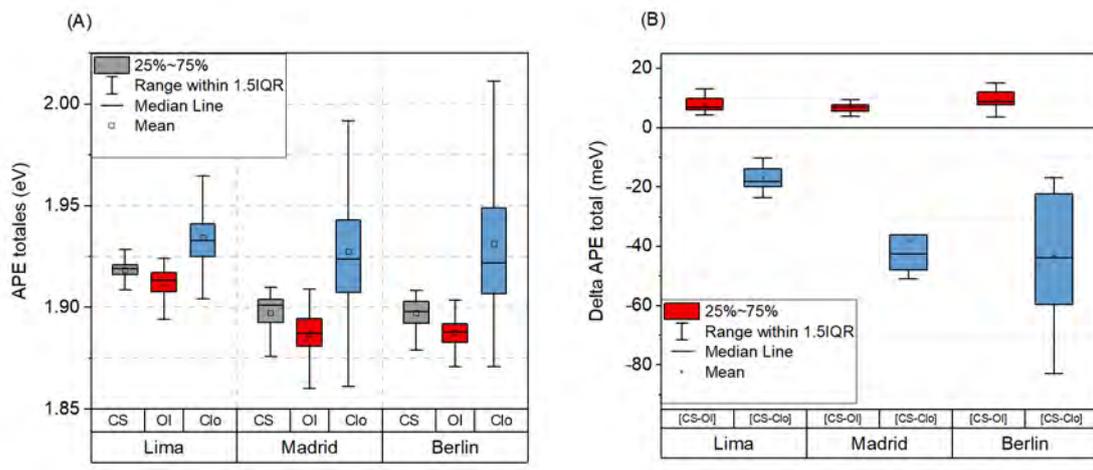


Figura 4.10 (A) Diagrama de cajas del APE para condiciones de CS, OI, y Clo. (B) diagrama de cajas de las diferencias diarias entre los valores medios del APE para OI y Clo con respecto a CS.

Tabla 4.3 Valores medios de las diferencias del APE para OI y Clo con respecto a CS.

	Lima	Madrid	Berlín
Mean[ΔAPE(CS-Clo)] (meV)	-17	-38	-43
Mean[ΔAPE(CS-OI)] (meV)	8	7	9

5. Sobreirradiancia y nubes presentes

5.1. Introducción

En este capítulo, aplicaremos toda la metodología expuesta en el capítulo 3, donde los datos experimentales corresponden al satélite GOES-16. Como en el capítulo anterior, todo el tratamiento digital de datos se realizó exclusivamente con el lenguaje de programación Python, usando el IDE Spyder y/o el entorno interactivo Jupyter Notebook, ambos de Anaconda. Mientras que, para la visualización de los resultados, gráficos y figuras, se realizaron con el software OriginPro-2023.

5.2. Profundidad óptica de nubes (COD)

Los eventos de sobreirradiancia OI han sido asociados a la presencia de nubes, como fuera reportado por primera vez por Norris en 1968 [1]. En esa misma lógica, ahora en este trabajo se pretende saber la correlación entre los eventos de OI y las nubes presentes durante dichos eventos. Por tanto, ahora en esta sección, se identificará los tipos de nubes presentes durante los eventos de OI. Los tipos de nubes a los que nos referimos es si las nubes son delgadas ($COD < 3$) o gruesas ($COD \geq 3$). Hacer este análisis es importante por cuanto las nubes delgadas están asociadas a hipótesis que sugieren que los eventos de OI son producto de la dispersión de Mie, mientras que otra hipótesis sustenta que los eventos de OI son productos de reflexiones en los bordes de las nubes. Aún más, se postula también que una combinación de estos procesos sería la causa de los eventos de OI. Para dilucidar esta interrogante, se empezará analizando la COD para días de CS, luego para los días de cielo nublado Clo, para finalmente terminar con la COD durante los días con eventos de OI.

Como ejemplo de un día soleado se analizó el 20 de abril del 2020. Durante este día la irradiancia espectral fue medida por el espectrorradiómetro del Laboratorio de Investigación Fotovoltaica de la PUCP. Como puede apreciarse en la Figura 5.1 (A), el día corresponde efectivamente a un día de CS debido al buen comportamiento de la curva de la irradiancia GTI a lo largo del día. Esta curva de irradiancia GTI se ve muy bien comportada y aparentemente sin perturbaciones. Pero si ahora observamos la

Figura 5.1 (B), veremos que antes del mediodía y casi hasta las 15:00 p.m. el satélite GOES-16 ha registrado la presencia de nubes. Estas nubes, según las consideraciones mencionadas anteriormente, corresponderían a nubes delgadas, las que como se aprecia en Figura 5.1 (A) no afecta al buen comportamiento de la curva de irradiancia de ese día, y en esas horas.

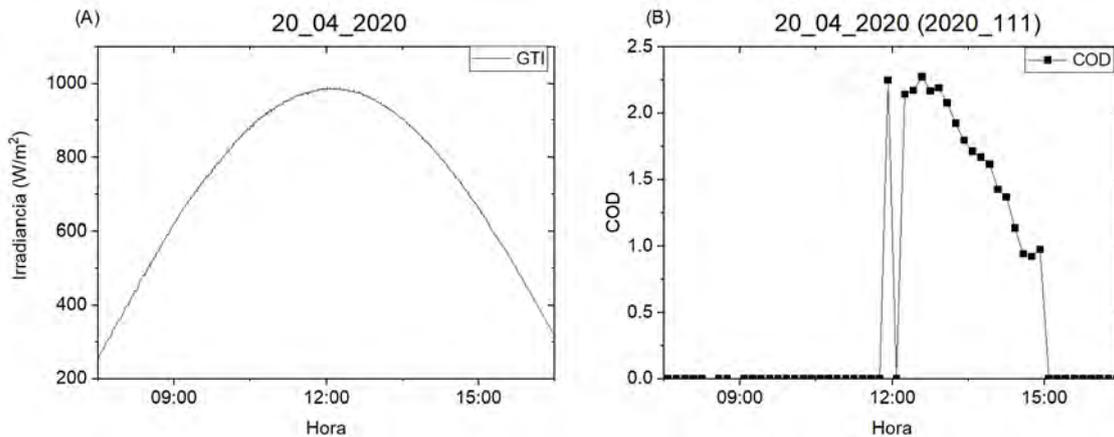


Figura 5.1 (A) Irradiancia a lo largo de un día de cielo claro CS. (B) Profundidad óptica de las nubes presentes durante un día de cielo claro CS.

La presencia de las nubes delgadas cerca al mediodía mostrada en la Figura 5.1 (B), no produjeron ningún evento de sobreirradiación, indicando que, o dichas nubes no se interpusieron entre la línea recta que une el disco solar y el espectrorradiómetro, o que las resoluciones tan distintas entre el espectrorradiómetro y el satélite no definen exactamente la irradiancia detectada por el espectrorradiómetro, o tal vez que las nubes delgadas con valores del COD menores o iguales a 2.25 no causan eventos de OI. Se puede plantear esta última hipótesis puesto que dichas nubes delgadas estuvieron presentes por cerca de tres horas, desde el mediodía hasta las 3:00 p.m. Horas antes y después, el COD es cero, indicativo de que se trata de un día perfecto de CS. Vale la pena mencionar que los valores del COD mostrados en la Figura 5.1 (B) corresponden a las mismas latitud y longitud donde se ubica el espectrorradiómetro. Por lo tanto, las irradiancias espectrales corresponden también a las horas en que las nubes delgadas estuvieron presentes. Responder estas hipótesis están lejos del alcance de este trabajo

de tesis puesto que no se cuenta con imágenes del cielo durante estos momentos, y se alienta a nuevos estudios para abordar estas interrogantes.

Pasemos ahora a analizar el COD de las nubes presentes durante un día de cielo nublado Clo. Para ello se elige por ejemplo el 22 de junio del 2020. En la Figura 5.2 (A) se muestran las irradiancias experimentales GTI y simulada GTI*. La irradiancia simulada GTI* se utiliza aquí como referencia de un día de CS y facilitarnos el análisis. Como se observa, según la irradiancia simulada GTI* para un día de CS la irradiancia máxima habría llegado a un poco más de los 800 W/m², pero al estar nublado la irradiancia experimental GTI esta alrededor de los 300 W/m². Si ahora observamos la Figura 5.2 (B) para esas horas de máxima irradiancia la COD tiene un valor aproximado de 20; es decir, nubes demasiado gruesas, lo que explica por qué la irradiancia GTI difiere bastante de la irradiancia GTI*. Es necesario hacer notar, que la irradiancia simulada GTI* para el 22 de junio del 2020 esta 20 % por debajo de la irradiancia estándar de 1000 W/m², y esto debido a que es invierno en la ciudad de Lima y se tienen las irradiancias más bajas del año. Si a esto se suman las nubes presentes en esta época, es fácil demostrar porque es la época más fría en esta ciudad.

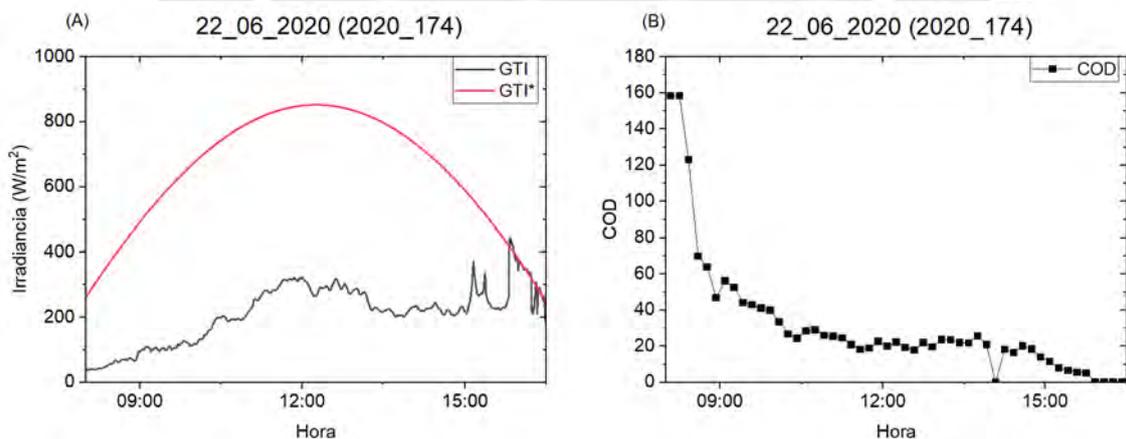


Figura 5.2 (A) Irradiancia a lo largo de un día de cielo nublado Clo. (B) Profundidad óptica de las nubes presentes durante un día de cielo nublado Clo.

Observando el extremo derecho de la Figura 5.2 (B) nos damos cuenta de que el COD cerca de las 16:00 p.m. es cero, indicándonos que correspondería a un cielo despejado

o CS. Esto tiene sentido si para el mismo intervalo de tiempo observamos la Figura 5.2 (A), donde los valores de la irradiancia experimental GTI parece coincidir con la irradiancia simulada GTI*.

La Figura 5.3, muestra en un solo gráfico la irradiancia experimental GTI y la COD en función de la hora del día. Esto para apreciar de mejor manera la correlación cualitativa existente entre estas dos magnitudes, GTI y COD. Aquí podemos apreciar que, durante las primeras horas, el COD es bastante alto (~ 160) por lo que la irradiancia GTI es menor a los 50 W/m^2 , incluso a las 9:00 a.m. la irradiancia no supera los 100 W/m^2 . Es indudable que la COD es inversamente proporcional a la GTI; es decir que, a mayores valores del COD, se tendrán irradiancias GTI más bajas. Además, como ya vimos, cuando la COD sea próximo a cero entonces las irradiancias coincidirán con los valores de irradiancia simulados GTI* correspondientes a un día de CS, como se aprecia en la última hora mostrada en la Figura 5.3.

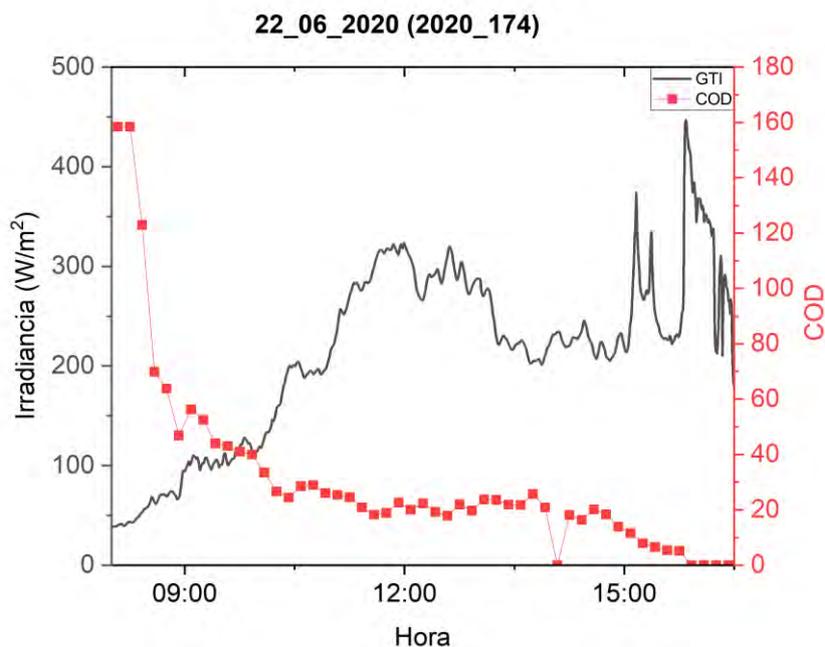


Figura 5.3 Correlación cualitativa entre irradiancia GTI y la profundidad óptica de las nubes COD a lo largo de un día de cielo nublado Clo.

Ahora que ya se ha visto los tipos de nubes que pueden presentarse tanto en condiciones de cielo claro CS como en condiciones de cielo nublado Clo, se pasa a analizar los tipos de nubes que se presentan en días con eventos de sobreirradiancia (OI).

En la Figura 5.4 (A) se muestran las irradiancias: experimental GTI y simulada GTI*. Se puede apreciar que cerca al mediodía los eventos de sobreirradiancia OI se hacen presentes, y se van alternando abruptamente con eventos de cielo nublado Clo, por al menos dos horas. Antes y después de este intervalo de tiempo (~ 2 horas), las condiciones del cielo correspondían a CS, por lo que las irradiancias experimentales GTI y simulada GTI* se ajustan bastante bien.

En la Figura 5.4 (B) se muestra la COD de las nubes presentes a lo largo del 23 de marzo del 2020 registrado por el satélite GOES-16. Podemos apreciar que entre el medio día y las 14:00 p.m. existe la presencia de nubes con COD mayores a 5, claro indicativo que se trata de nubes ópticamente gruesas. Además, antes y después del mencionado intervalo en el párrafo anterior, la COD de las nubes es cero, indicando que se encuentra en condiciones de CS. Así es que la Figura 5.4 (A) y la Figura 5.4 (B) parecen correlacionarse bastante bien.

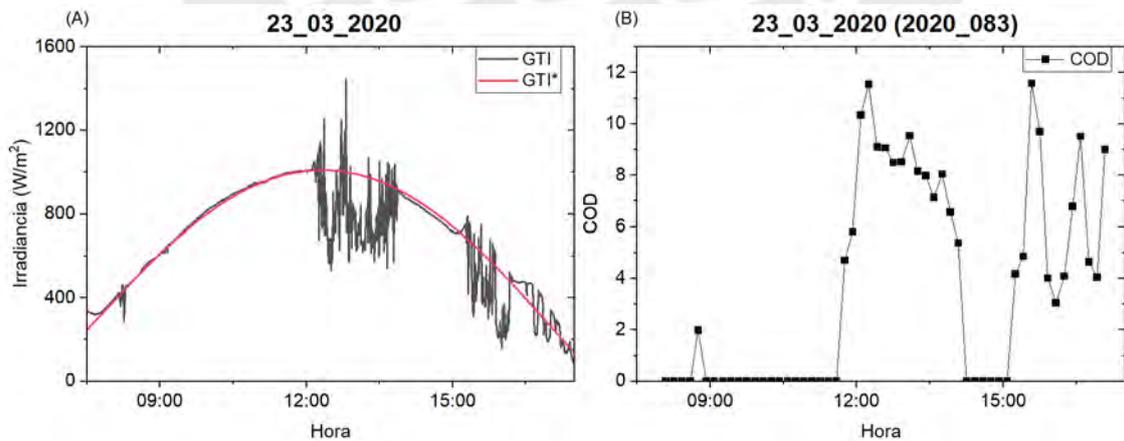


Figura 5.4 (A) Irradiancia a lo largo de un día con eventos de OI. (B) Profundidad óptica de las nubes presentes durante un día con eventos de sobreirradiancia OI.

5.3. Irradiancia experimental y profundidad óptica de nubes para días con eventos de sobreirradiación

Para apreciar de mejor manera la correlación entre la irradiación experimental GTI y la COD durante un día con eventos de OI, se grafican en una misma figura a estas dos magnitudes en función de la hora local en la ciudad de Lima. Precisamente la Figura 5.5 muestra la irradiación y el COD en función del tiempo. A simple vista se observa una buena correspondencia entre ambas magnitudes. El COD es cero cuando el cielo está en condiciones de CS, y en cuanto se presentan los eventos de OI, los valores del COD se incrementan abruptamente pasando a valores mayores a 5, lo que demuestra la presencia de nubes ópticamente gruesas.

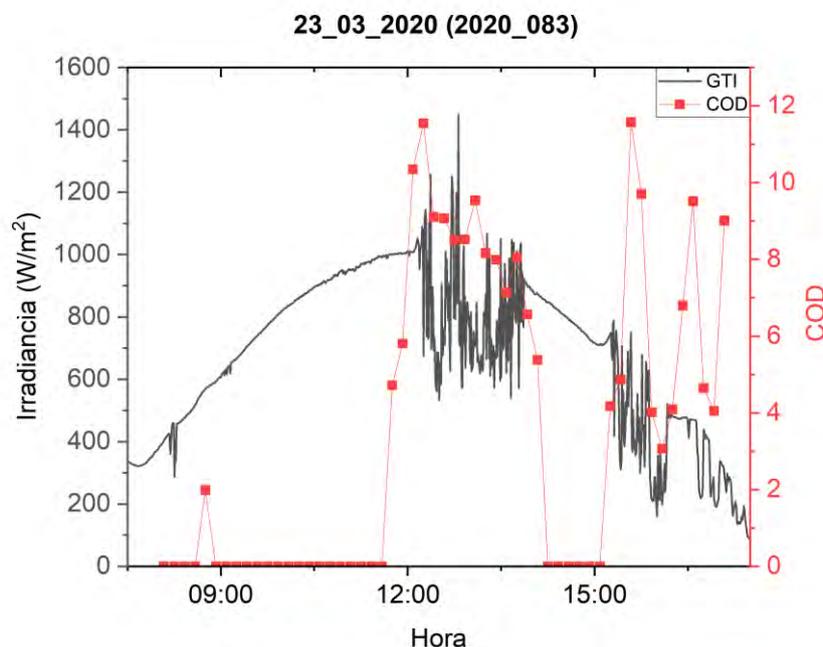


Figura 5.5 Correlación cualitativa entre irradiación GTI y la profundidad óptica de las nubes COD a lo largo de un día con eventos de sobreirradiación OI.

Recordemos que el satélite toma imágenes durante 10 minutos, y como resultado nos da el promedio de lo medido en ese intervalo; es decir, en ese intervalo de 10 minutos, nubes de diferentes espesores ópticos podrían haber pasado sobre el espectrorradiómetro, pero estas nubes tendrían que estar fragmentadas o tener

volúmenes finitos dejando espacios claros entre ellas. No podría tratarse de nubes extensas que cubran el cielo totalmente, pues de ser así, la distribución de la irradiancia espectral tendría que presentar un corrimiento al azul (blue-shift) como se vio en las secciones anteriores. Así, la única posibilidad para tener eventos de OI, es que las nubes presentes en esos instantes tendrían que ser gruesas y con espacios vacíos entre ellas que permitieran ver total o parcialmente el disco solar. Mas aún, las COD de las nubes en realidad, serían mayores a las que nos proporciona el satélite GOES-16 ya que estaría promediando con valores de cero o próximos a cero, lo que haría que el promedio baje significativamente. De ser este el caso, el reforzamiento de la irradiancia GTI se debería a la reflexión en los bordes de las nubes de la componente directa mas no así de la irradiancia difusa.

Además, volviendo a la Figura 4.9 (A), se observa que en ningún caso los valores medios del APE de los eventos OI nunca están por encima de los valores medios del APE para las condiciones de CS; es decir nunca se presentó un corrimiento al azul (blue-shift). En el Anexo B, se muestran figuras similares a la obtenida anteriormente (Figura 5.5) para todos los días con eventos de sobreirradiación observados en Lima; es decir, para todos los días mostrados en la Figura 4.9 (A).

6. Sobreirradiancia en las regiones ultravioleta, visible e infrarrojo

6.1. Introducción

Con el fin de entender las causas de los eventos de OI, se empieza a analizar lo que ocurre con las irradiancias en los rangos ultravioleta (UV), visible (VIS) e infrarrojo (IR). Para ello se construye la Tabla 6.1, con eventos de OI, CS, y Clo ocurridos en la ciudad de Lima, que han sido seleccionados con la intención de conocer en que rango del espectro se produce principalmente el reforzamiento de la irradiancia.

Tabla 6.1 Días y horas exactas de las irradiancias espectrales de OI, CS y Clo seleccionadas para el análisis de la irradiancia y la energía media fotónica en las regiones UV, VIS, e IR.

<i>Nro.</i>	<i>Día</i>	<i>Hora de OI</i>	<i>Hora de CS</i>	<i>Hora de Clo</i>
1	2019_May_01	12:20:11	11:38:33	12:13:31
2	2019_May_04	13:20:12	12:10:11	13:21:51
3	2019_May_13	11:31:52	12:53:32	11:28:32
4	2019_Oct_25	12:14:21	10:57:41	12:16:02
5	2019_Nov_01	11:04:21	12:22:42	11:09:22
6	2019_Nov_26	12:11:51	11:31:51	12:23:31
7	2019_Dic_01	12:03:31	12:01:51	12:19:22
8	2020_Feb_23	12:11:51	13:20:43	12:26:52
9	2020_Mar_13	13:00:49	12:18:56	13:15:11
10	2020_Mar_23	12:48:56	11:53:56	12:52:04
11	2020_Abr_15	12:25:49	11:56:26	12:42:04
12	2020_Oct_22	12:50:59	11:42:44	12:48:29
13	2021_Feb_09	12:25:22	12:39:07	12:26:37
14	2021_Mar_09	13:02:52	12:55:59	13:04:44
15	2021_Mar_11	12:19:07	12:04:07	12:19:44
16	2021_Abr_01	11:40:22	11:59:44	11:55:22
17	2021_Abr_16	12:48:29	12:51:37	12:41:37

Para esta parte del análisis se han seleccionado las irradiancias espectrales de los eventos máximos de OI, las irradiancias espectrales de los eventos mínimos de cielo nublado Clo, y las irradiancias espectrales de los eventos máximos de CS, ocurridos en cada uno de los días presentados en la Figura 4.9 (A) para la ciudad de Lima. Esta selección se hizo con la finalidad de comparar las diferencias más resaltantes entre los eventos OI, CS, y Clo. Las horas exactas de las irradiancias espectrales seleccionadas para este fin también se muestran en Tabla 6.1.

También se ha hecho uso de la ecuación (3.5) para hallar la irradiancia solo en el rango de 350 nm a 1050 nm (GTI^{TOT}); es decir sin aplicar los métodos de extrapolación, así como las irradiancias en los rangos UV (GTI^{UV}), VIS (GTI^{VIS}), e IR (GTI^{IR}) mediante las ecuaciones: (3.7), (3.9), y (3.11) respectivamente. De esta manera, se utilizan solamente los datos medidos por el espectrorradiómetro, de manera que las comparaciones se ajusten más a la realidad. Es importante aclarar que las comparaciones se hacen siempre con respecto a los eventos de CS, y son expresadas en tantos por ciento para facilitar su análisis.

6.2. Variación de las irradiancias de los eventos de sobreirradiancia y nublado con respecto al cielo claro

La Figura 6.1 muestra los incrementos en tantos por ciento de las irradiancias GTI^{TOT} , GTI^{UV} , GTI^{VIS} , y GTI^{IR} de los eventos de OI con respecto a los eventos de CS. El mayor incremento porcentual de la irradiancia se observa en la región del IR, mientras que un menor incremento se tiene en la región del UV. Por otro lado, el incremento en la región VIS es bastante próximo al incremento de la irradiancia global total GTI^{TOT} . Este comportamiento es similar para todos los días con eventos de OI analizados. En todos los días se puede observar que el incremento de la irradiancia en la región IR es aproximadamente el doble que el incremento en la región del UV; es decir, si en la región del UV hay un incremento de 25 %, entonces en la región del IR el incremento llega al 50 %, lo que explica el corrimiento al rojo (red-shift).

Como el vapor de agua de las nubes absorbe en el UV y mucho más en el IR (debido a las vibraciones moleculares), entonces se puede concluir que el incremento de la irradiancia en estas regiones se debe a que no ha interactuado con la nube y que muy probablemente la irradiancia extra ha atravesado por las aberturas o espacios libres entre las nubes. Nuevamente, este hecho refuerza la idea de que la OI se debe a un reforzamiento de la irradiancia global debido a la componente “directa” de esta, mas no así, a la irradiancia difusa. Se indica “directa”, haciendo referencia a la irradiancia directa que incide en los bordes de las nubes y se refleja hacia la superficie terrestre de manera que al llegar a la superficie contribuye a la componente directa.

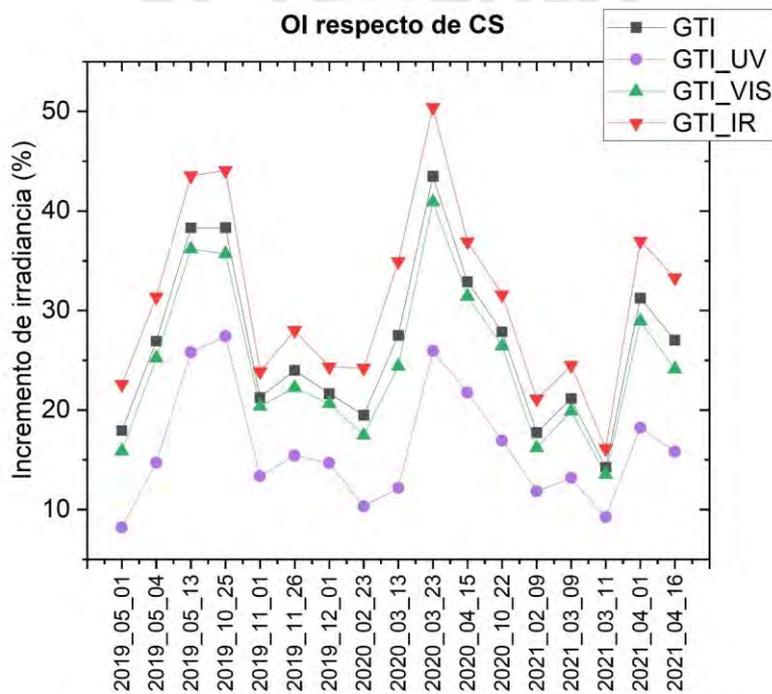


Figura 6.1 Incremento de las irradiancias en las regiones UV, VIS, IR y total del evento de OI máxima con respecto al evento máximo de CS.

Por el contrario, la Figura 6.2 muestra los decrementos en tantos por ciento de las irradiancias GTI^{TOT} , GTI^{UV} , GTI^{VIS} , y GTI^{IR} de los eventos de cielo nublado Clo con respecto a los eventos de CS. El mayor decremento porcentual de la irradiancia se observa en la región del IR, mientras que un menor decremento se tiene en la región del UV; es decir, en un cielo nublado existe mayor absorción en el IR que en el UV, y esto explicaría su

corrimiento al azul (blue-shift). La disminución significativa de la radiación en el rango UV y más aún en el rango IR, confirman que el vapor de agua es un buen absorbente en estas regiones, principalmente en la banda centrada en los 940 nm, región en que mide el espectrorradiómetro. La banda centrada en 940 nm está relacionada con transiciones rotacionales y vibracionales del vapor de agua. Finalmente, el decremento en la región VIS es bastante próximo al decremento de la irradiancia global total GTI^{TOT} . Resumiendo, tanto en el incremento de la irradiancia OI respecto de CS, y en el decremento de la irradiancia de Clo respecto de CS, la irradiancia en la región VIS es bastante similar a su correspondiente irradiancia global total GTI^{TOT} ; es decir, los incrementos y decrementos de la irradiancia son mejor observadas en las regiones UV e IR.

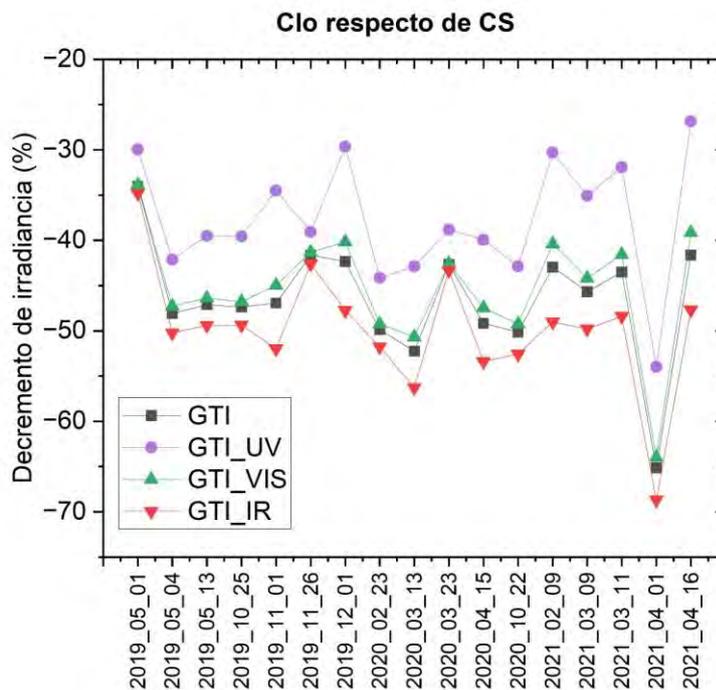


Figura 6.2 Decremento de las irradiancias en las regiones UV, VIS, IR y total del evento Clo mínimo con respecto al evento máximo de CS.

6.3. Variación de la energía media fotónica de eventos de sobreirradiación y nublado con respecto de cielo claro

Continuando con el propósito de entender las causas de los eventos OI, se empezará a analizar lo que ocurre con las energías medias fotónicas en los rangos ultravioleta

UV (APE^{UV}), visible VIS (APE^{VIS}) e infrarrojo IR (APE^{IR}). De esta manera se espera conocer en que rango del espectro se produce una mayor variabilidad de la energía media fotónica y si esta es significativamente diferente.

Como ya se ha visto, en condiciones de cielo nublado (Clo) el APE muestra un corrimiento al azul (blue-shift); es decir, el APE para Clo es mayor que para CS, lo que significa que el APE se incrementa. Por esta razón, la Figura 6.3 muestra el incremento porcentual del APE de los eventos Clo con respecto a los CS. Aquí se puede observar que en la región del UV este incremento es prácticamente nulo, indicando que la energía media fotónica APE de los fotones que atraviesan las nubes es muy similar a la de CS, pero en menor cantidad, ya que la Figura 6.2 muestra un decremento de la irradiancia en la región UV.

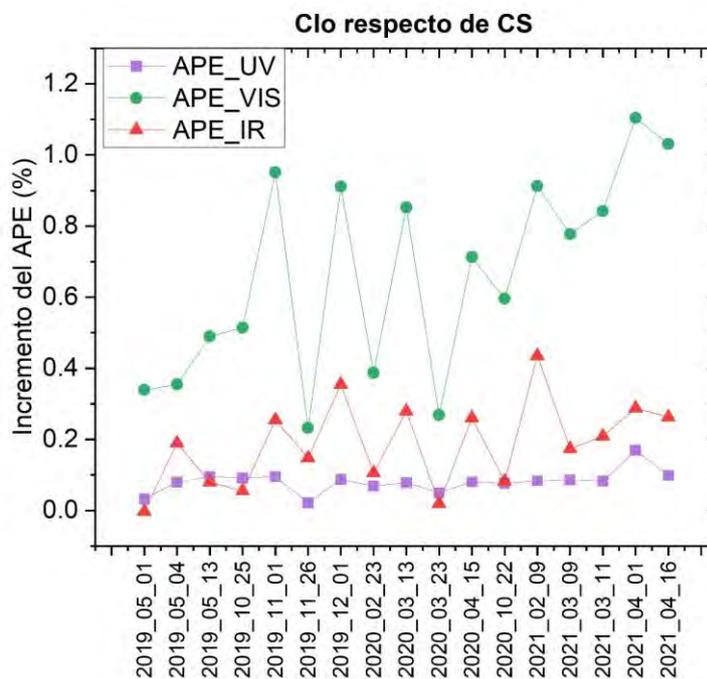


Figura 6.3 Incremento del APE en las regiones UV, VIS, IR de eventos de Clo con respecto a eventos de CS.

Por otro lado, aunque el incremento porcentual de la energía media fotónica en el VIS (APE^{VIS}) es mayor que en el IR, ambos incrementos porcentuales no son significativos ya que son menores o iguales al 1 %. En resumen, aunque existe una disminución de la

irradiancia en todas las regiones del espectro las energías medias fotónicas en todas las regiones no varían significativamente.

De manera similar, la Figura 6.4 muestra que los decrementos porcentuales del APE en los eventos de OI respecto de CS no son significativos en ninguna de las regiones del espectro: UV, VIS, e IR. El APE presenta una ligera variabilidad en el UV (menor en promedio al 0.05 %), y un poco más variable en el VIS, pero sin importancia alguna, pues no excede del 0.6 %. Es así, que el análisis se debe enfocar en la variación de la cantidad de irradiancia más que en la variación de la energía media de los fotones (APE).

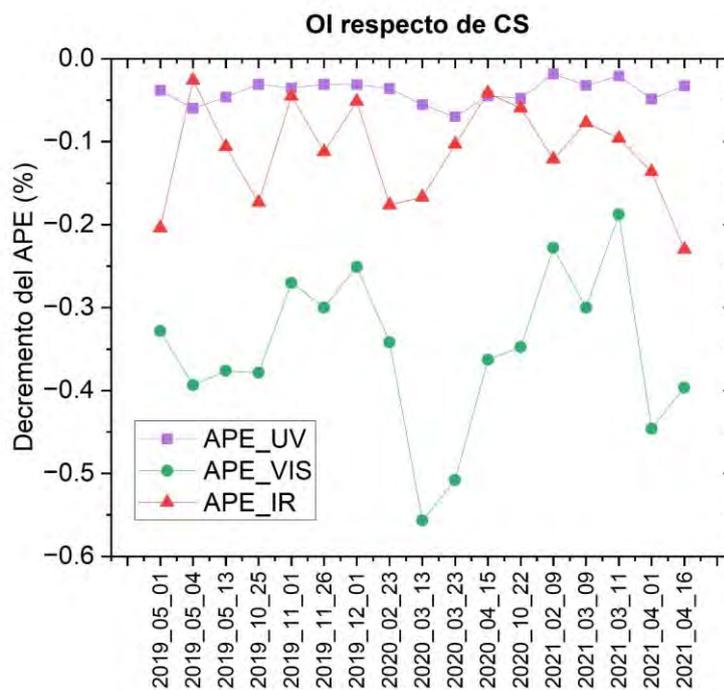


Figura 6.4 Decremento del APE en las regiones UV, VIS, IR de eventos de OI con respecto a eventos de CS.

7. Conclusiones y recomendaciones

El objetivo principal de este trabajo de tesis propuesto en el capítulo 1 se ha cumplido dentro del conjunto de datos disponibles, dando respuesta a los objetivos específicos planteados pero que aún quedan preguntas que resolver en trabajos futuros. Para ello es necesario desarrollar proyectos de investigación orientados directamente a comprender las condiciones y los eventos de sobreirradiancia, registrando todos los datos necesarios como: irradiancias espectrales globales, directas y difusas en los planos horizontales e inclinados, así como imágenes del cielo durante los eventos de sobreirradiancia. De manera que todos estos datos estén sincronizados y tengan tiempos de muestreo de al menos un segundo [24, 80]. Además, como se mostró en este trabajo, es importante contar con datos satelitales de la profundidad óptica de las nubes, y se recomienda incluir otros datos como; el tamaño de partículas de agua, y la profundidad óptica de aerosoles.

A partir de los resultados expuestos en el capítulo 4, podemos sacar las siguientes conclusiones:

- a) La OI se puede estudiar solo con datos provenientes de espectrorradiómetros puesto que exhibe una alta correlación con datos de piranómetros y además, tiene un valor aceptable del RMSE.
- b) Es posible obtener la irradiancia simulada GTI* con la metodología propuesta en esta tesis para poder diferenciar entre los eventos OI, Clo, y CS.
- c) El valor de la irradiancia de los eventos de OI es inversamente proporcional al APE, siendo los eventos EOI los de menor APE, lo que explica su corrimiento al rojo (red-shift).
- d) La irradiancia de los eventos Clo es directamente proporcional al APE; es decir, cuanto más nublado mayor es su APE, lo que explica su corrimiento al azul (blue-shift).
- e) El comportamiento de los eventos OI y Clo es similar en Lima, Madrid, y Berlín, independientemente de su ubicación en la superficie terrestre.

- f) En condiciones y eventos de cielo nublado (Clo) la irradiancia global está constituida casi totalmente por la irradiancia difusa [31], por lo que esta irradiancia difusa debe ser azul.

A partir de los resultados obtenidos en el capítulo 5 podemos concluir que:

- g) Según nuestra definición de nubes delgadas ($COD < 3$), la presencia de nubes delgadas detectadas por el satélite no son condiciones suficientes para que se produzcan eventos de OI, como se demostró, a pesar de tener presencia de nubes delgadas por alrededor de tres horas, la irradiancia detectada solo correspondió a un día de cielo claro, sin perturbación alguna.
- h) La correlación cualitativa entre la irradiancia experimental GTI y la profundidad óptica de las nubes COD es muy buena para Lima, a pesar de que el satélite solo provee un solo valor del COD cada 10 minutos.
- i) Todos los días con eventos de OI estudiados en Lima han tenido presencia de nubes gruesas, lo que asociado a su corrimiento al rojo permite concluir que todos estos eventos han sido producidos por reflexiones en los bordes y los lados de nubes cúmulos fragmentadas, incrementando la componente directa de la irradiancia global.

Finalmente, en base a los resultados del capítulo 6, podemos reafirmar que:

- j) El incremento de la irradiancia global se debe principalmente al incremento de la irradiancia en la región IR, lo que indicaría que se trata de un incremento de la irradiancia directa, ya que, para los eventos nublados, la absorción en el infrarrojo es mayor produciendo su corrimiento al azul y haciendo que la irradiancia difusa sea la componente predominante de la irradiancia global.
- k) Por otro lado, se concluye también que la variación del APE en los eventos de OI y Clo con respecto a los de CS no son relevantes ya que en promedio se encuentran alrededor del 1 %, existiendo una mayor variación en la región del visible.

En resumen, las condiciones necesarias para que se produzcan eventos de OI es la presencia de nubes gruesas fragmentadas con $COD > 3$. Los eventos de OI se deben a reflexiones en los bordes y lados de las nubes fragmentadas que incrementan la

componente directa de la irradiancia global. Los eventos de OI presentan un corrimiento al rojo directamente proporcional a su irradiancia global, y este incremento se debe al aumento de la radiación en la región del infrarrojo. Todos estos resultados parecen ser independientes de la latitud (bajas o medias) y las condiciones meteorológicas propias de cada lugar.

Se requieren realizar más estudios con respecto a las condiciones de OI, para probar si la presencia de nubes delgadas puede originar eventos de OI mediante la dispersión directa de Mie incrementando la componente difusa de la irradiancia global, o si, además de las nubes delgadas es necesario contar con algunos requisitos más, como por ejemplo, el tamaño de las partículas constituyentes de la nube.

Para realizar una correlación cuantitativa entre la irradiancia global y la profundidad óptica de la nube sería necesario contar con datos sincronizados y de preferencia con tiempos de muestreo satelital menores a los 10 minutos.

Un estudio más completo requiere también la medida sincronizada de las irradiancias globales, directas y difusas con frecuencias de muestreo de al menos 1 segundo.

Con los resultados obtenidos en este trabajo se pueden mejorar los programas de simulación de transferencia radiativa tanto para condiciones de CS, Clo y OI.

Con datos satelitales de la profundidad óptica de las nubes en tiempo real podría ser posible anticipar la ocurrencia de eventos de sobreirradiación.

Estimar adecuadamente los eventos de OI pueden mejorar el dimensionamiento de los inversores y de los sistemas de seguridad para la instalación de las plantas fotovoltaicas.

8. Bibliografía

- [1] Norris DJ. Correlation of solar radiation with clouds. *Solar Energy* 1968; 12: 107–112.
- [2] Segal M, Davis J. The Impact of Deep Cumulus Reflection on the Ground-Level Global Irradiance. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 1992; 31: 217–222.
- [3] Estupiñán JG, Raman S, Crescenti GH, et al. Effects of clouds and haze on UV-B radiation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 1996; 101: 16807–16816.
- [4] Mayer B, Kylling A, Madronich S, et al. Enhanced absorption of UV radiation due to multiple scattering in clouds: Experimental evidence and theoretical explanation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 1998; 103: 31241–31254.
- [5] Gu L, Fuentes JD, Garstang M, et al. Cloud modulation of surface solar irradiance at a pasture site in southern Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology* 2001; 106: 117–129.
- [6] Piacentini RD, Cede A, Bárcena H. Extreme solar total and UV irradiances due to cloud effect measured near the summer solstice at the high-altitude desertic plateau Puna of Atacama (Argentina). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 2003; 65: 727–731.
- [7] Parisi AV, Downs N. Variation of the enhanced biologically damaging solar UV due to clouds. *Photochem Photobiol Sci* 2004; 3: 643–647.
- [8] Piacentini RD, Salum GM, Fraidenraich N, et al. Extreme total solar irradiance due to cloud enhancement at sea level of the NE Atlantic coast of Brazil. *Renewable Energy* 2011; 36: 409–412.
- [9] Mateos D. Cloud modulation of shortwave and ultraviolet solar irradiances at surface. *Opt Pura Apl* 2012; 45: 29–32.
- [10] Feister U, Cabrol N, Häder D. UV Irradiance Enhancements by Scattering of Solar Radiation from Clouds. *Atmosphere* 2015; 6: 1211–1228.
- [11] Tiba C, Silva Leal S da. Enhancement of UV Radiation by Cloud Effect in NE of Brazil. *International Journal of Photoenergy* 2017; 2017: e8107435.
- [12] Calbó J, Pagès D, González J-A. Empirical studies of cloud effects on UV radiation: A review. *Reviews of Geophysics*; 43. Epub ahead of print 2005. DOI: 10.1029/2004RG000155.
- [13] Calbó J, González J-A, Badosa J, et al. How large and how long are UV and total radiation enhancements? *AIP Conference Proceedings* 2017; 1810: 110002.
- [14] McKenzie R, Liley B, Kotkamp M, et al. Peak UV: Spectral contributions from cloud enhancements. *AIP Conference Proceedings* 2017; 1810: 110008.

- [15] do Nascimento LR, de Souza Viana T, Campos RA, et al. Extreme solar overirradiance events: Occurrence and impacts on utility-scale photovoltaic power plants in Brazil. *Solar Energy* 2019; 186: 370–381.
- [16] Gueymard CA. Cloud and albedo enhancement impacts on solar irradiance using high-frequency measurements from thermopile and photodiode radiometers. Part 1: Impacts on global horizontal irradiance. *Solar Energy* 2017; 153: 755–765.
- [17] Almeida MP, Zilles R, Lorenzo E. Extreme overirradiance events in São Paulo, Brazil. *Solar Energy* 2014; 110: 168–173.
- [18] de Andrade RC, Tiba C. Extreme global solar irradiance due to cloud enhancement in northeastern Brazil. *Renewable Energy* 2016; 86: 1433–1441.
- [19] Yordanov GH, Saetre TO, Midtgård O-M. Extreme overirradiance events in Norway: 1.6 suns measured close to 60°N. *Solar Energy* 2015; 115: 68–73.
- [20] Yordanov GH, Midtgård O-M, Saetre TO, et al. Overirradiance (cloud enhancement) events at high latitudes. In: *2012 IEEE 38th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) PART 2*. 2012, pp. 1–7.
- [21] Yordanov GH, Saetre TO, Midtgård O-M. 100-millisecond Resolution for Accurate Overirradiance Measurements. *IEEE Journal of Photovoltaics* 2013; 3: 1354–1360.
- [22] Zamalloa Jara MA, Berg H, Conde LA, et al. Extreme Overirradiance events and their spectral distribution in Lima, Peru. *J Phys: Conf Ser* 2021; 1841: 012006.
- [23] Ruiz-Arias J, Gueymard C. Solar Resource for High-Concentrator Photovoltaic Applications. In: *Green Energy and Technology*. 2015, pp. 261–302.
- [24] Braga M, de Oliveira AKV, Burnham L, et al. Solar Over-Irradiance Events: Preliminary Results from a Global Study. In: *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. 2020, pp. 2764–2770.
- [25] do Nascimento LR, de Souza Viana T, Campos RA, et al. Extreme solar overirradiance events: Occurrence and impacts on utility-scale photovoltaic power plants in Brazil. *Solar Energy* 2019; 186: 370–381.
- [26] Järvelä M, Lappalainen K, Valkealahti S. Characteristics of the cloud enhancement phenomenon and PV power plants. *Solar Energy* 2020; 196: 137–145.
- [27] Järvelä M, Valkealahti S. Operation of a PV Power Plant during Overpower Events Caused by the Cloud Enhancement Phenomenon. *Energies* 2020; 13: 2185.
- [28] Ruther R, Nascimento LR do, Campos RA. Performance assessment issues in utility-scale photovoltaics in warm and sunny climates. *Renew Energy Environ Sustain* 2017; 2: 35.
- [29] Toreti Scarabelot L, Arns Rampinelli G, Rambo CR. Overirradiance effect on the electrical performance of photovoltaic systems of different inverter sizing factors. *Solar Energy* 2021; 225: 561–568.

- [30] Wang B, Jiang S, Tan Z. Analysis of photovoltaic system under over-irradiation conditions in arid climate. *International Journal of Green Energy* 2023; 20: 465–476.
- [31] Widén J, Munkhammar J. *Solar Radiation Theory*. Uppsala University. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.33063/diva-381852.
- [32] Korevaar MAN, Korevaar MAN. *Measuring Solar Irradiance for Photovoltaics*. IntechOpen. Epub ahead of print 26 August 2022. DOI: 10.5772/intechopen.105580.
- [33] Pinker RT. Surface Radiative Fluxes. In: Njoku EG (ed) *Encyclopedia of Remote Sensing*. New York, NY: Springer, pp. 806–815.
- [34] Gueymard CA. A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of spaceborne observations. *Solar Energy* 2018; 168: 2–9.
- [35] Gueymard CA. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Solar Energy* 2004; 76: 423–453.
- [36] Madronich S, Flocke S. Theoretical Estimation of Biologically Effective UV Radiation at the Earth's Surface. In: Zerefos CS, Bais AF (eds) *Solar Ultraviolet Radiation*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997, pp. 23–48.
- [37] Diffey BL. Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. *Phys Med Biol* 1991; 36: 299–328.
- [38] Polefka TG, Meyer TA, Agin PP, et al. Effects of solar radiation on the skin. *J Cosmet Dermatol* 2012; 11: 134–143.
- [39] Seuma JMC, Vilardell F, Gari E. Fotocarcinogénesis cutánea y respuesta inmune. *FMC - Formación Médica Continuada en Atención Primaria* 2023; 30: 1–13.
- [40] Johnson FS. THE SOLAR CONSTANT. *J Meteor* 1954; 11: 431–439.
- [41] Thekaekara MP. Solar energy outside the Earth's atmosphere. *Solar Energy* 1973; 14: 109–127.
- [42] Bright JM. Introduction to synthetic solar irradiance. *Synthetic Solar Irradiance* 2021; 1–32.
- [43] Chapter 1. Terms and Definitions - Solar Energy Forecasting and Resource Assessment [Book], <https://www.oreilly.com/library/view/solar-energy-forecasting/9780123971777/xhtml/CHP001.html> (accessed 21 August 2024).
- [44] Ruiz-Arias JA, Gueymard CA, Cebecauer T. Direct normal irradiance modeling: Evaluating the impact on accuracy of worldwide gridded aerosol databases. Casablanca, Morocco, p. 190013.
- [45] Blanc P, Espinar B, Geuder N, et al. Direct normal irradiance related definitions and applications: The circumsolar issue. *Solar Energy* 2014; 110: 561–577.
- [46] Chen XM, Li Y, Zhao BY, et al. Are the optimum angles of photovoltaic systems so important? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2020; 124: 109791.

- [47] Chinchilla M, Santos-Martín D, Carpintero-Rentería M, et al. Worldwide annual optimum tilt angle model for solar collectors and photovoltaic systems in the absence of site meteorological data. *Applied Energy* 2021; 281: 116056.
- [48] Danandeh MA, Mousavi G. SM. Solar irradiance estimation models and optimum tilt angle approaches: A comparative study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018; 92: 319–330.
- [49] Yoshida S, Ueno S, Kataoka N, et al. Estimation of global tilted irradiance and output energy using meteorological data and performance of photovoltaic modules. *Solar Energy* 2013; 93: 90–99.
- [50] Lave M, Hayes W, Pohl A, et al. Evaluation of Global Horizontal Irradiance to Plane-of-Array Irradiance Models at Locations Across the United States. *IEEE Journal of Photovoltaics* 2015; 5: 597–606.
- [51] Gueymard C. *From global horizontal to global tilted irradiance: How accurate are solar energy engineering predictions in practice?* 2008.
- [52] Mahachi T, Rix AJ. Evaluation of irradiance decomposition and transposition models for a region in South Africa Investigating the sensitivity of various diffuse radiation models. In: *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 3064–3069.
- [53] Chiron de la Casinière A, Cachorro Revilla VE. *La radiación solar en el sistema tierra-atmósfera*, <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/42812> (2008, accessed 21 August 2024).
- [54] Günther M, Janotte N, Mezrhab A, et al. *Solar Radiation*. 2011.
- [55] *Fundamentals of Solar Radiation*. *Routledge & CRC Press*, <https://www.routledge.com/Fundamentals-of-Solar-Radiation/Wald/p/book/9780367725921> (accessed 21 August 2024).
- [56] Gouesbet G, Ambrosio LA. Rayleigh limit of generalized Lorenz-Mie theory for on-axis beams and its relationship with the dipole theory of forces. Part II: Non-dark axisymmetric beams of the second kind and dark axisymmetric beams, including a review. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 2021; 273: 107836.
- [57] Jackèl D, Walter B. Modeling and Rendering of the Atmosphere Using Mie-Scattering. *Computer Graphics Forum* 1997; 16: 201–210.
- [58] Chiron de la Casinière A, Cachorro Revilla VE. *La radiación solar en el sistema tierra-atmósfera*, <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/42812> (2008, accessed 24 November 2022).
- [59] Niskanen I, Forsberg V, Zakrisson D, et al. Determination of nanoparticle size using Rayleigh approximation and Mie theory. *Chemical Engineering Science* 2019; 201: 222–229.
- [60] Korkin S, Yang E-S, Spurr R, et al. Revised and extended benchmark results for Rayleigh scattering of sunlight in spherical atmospheres. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 2020; 254: 107181.

- [61] Quirantes A, Bernard S. Light scattering by marine algae: two-layer spherical and nonspherical models. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 2004; 89: 311–321.
- [62] Conde LA, Angulo JR, Sevillano-Bendezú MÁ, et al. Spectral effects on the energy yield of various photovoltaic technologies in Lima (Peru). *Energy* 2021; 223: 120034.
- [63] Kasten F, Young AT. Revised optical air mass tables and approximation formula. *Appl Opt, AO* 1989; 28: 4735–4738.
- [64] Thuillier G, Perrin J-M, Keckhut P, et al. Local enhanced solar irradiance on the ground generated by cirrus: Measurements and interpretation. *Journal of Applied Remote Sensing*; 7. Epub ahead of print 25 June 2013. DOI: 10.1117/1.JRS.7.073543.
- [65] Tapakis R, Charalambides AG. Enhanced values of global irradiance due to the presence of clouds in Eastern Mediterranean. *Renewable Energy* 2014; 62: 459–467.
- [66] Feister U, Cabrol N, Häder D. UV Irradiance Enhancements by Scattering of Solar Radiation from Clouds. *Atmosphere* 2015; 6: 1211–1228.
- [67] Inman RH, Chu Y, Coimbra CFM. Cloud enhancement of global horizontal irradiance in California and Hawaii. *Solar Energy* 2016; 130: 128–138.
- [68] Gueymard CA. Cloud and albedo enhancement impacts on solar irradiance using high-frequency measurements from thermopile and photodiode radiometers. Part 2: Performance of separation and transposition models for global tilted irradiance. *Solar Energy* 2017; 153: 766–779.
- [69] Zamora Zapata M, Wu E, Kleissl J. Irradiance Enhancement Events in the Coastal Stratocumulus Dissipation Process. In: *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019*. Santiago, Chile: International Solar Energy Society, pp. 1–8.
- [70] Wirth G, Lorenz E, Spring A, et al. Modeling the maximum power output of a distributed PV fleet. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2015; 23: 1164–1181.
- [71] Chicco G, Cocina V, Di Leo P, et al. Error Assessment of Solar Irradiance Forecasts and AC Power from Energy Conversion Model in Grid-Connected Photovoltaic Systems. *Energies* 2016; 9: 8.
- [72] Pecenak ZK, Mejia FA, Kurtz B, et al. Simulating irradiance enhancement dependence on cloud optical depth and solar zenith angle. *Solar Energy* 2016; 136: 675–681.
- [73] Quiroz J, Cameron C. *Technical analysis of prospective photovoltaic systems in Utah*. SAND2012-1366, 1036004.
- [74] Zehner M, Weigl T, Hartmann M, et al. *Energy Loss Due to Irradiance Enhancement*. 2011.

- [75] Ruther R, Nascimento LR do, Campos RA. Performance assessment issues in utility-scale photovoltaics in warm and sunny climates. *Renew Energy Environ Sustain* 2017; 2: 35.
- [76] Castillejo-Cuberos A, Escobar R. Detection and characterization of cloud enhancement events for solar irradiance using a model-independent, statistically-driven approach. *Solar Energy* 2020; 209: 547–567.
- [77] Ramgolam YK, Soyjaudah KMS. Enhanced Insolation and Global Irradiance in Near-tropic Region. In: *Proceedings of the EuroSun 2014 Conference*. Aix-les-Bains, France: International Solar Energy Society, pp. 1–7.
- [78] Venkatakrishnamoorthy T, Reddy GU. Cloud enhancement of NOAA multispectral images by using independent component analysis and principal component analysis for sustainable systems. *Computers & Electrical Engineering* 2019; 74: 35–46.
- [79] Zamalloa-Jara MA, Sevillano-Bendezú MÁ, Ulbrich C, et al. Overirradiance conditions and their impact on the spectral distribution at low- and mid-latitude sites. *Solar Energy* 2023; 259: 99–106.
- [80] Martins GL, Mantelli SL, Rütther R. Evaluating the performance of radiometers for solar overirradiance events. *Solar Energy* 2022; 231: 47–56.
- [81] Hassan Q, Viktor P, J. Al-Musawi T, et al. The renewable energy role in the global energy Transformations. *Renewable Energy Focus* 2024; 48: 100545.
- [82] Ugarteche O, de León C, García J. China and the energy matrix in Latin America: Governance and geopolitical perspective. *Energy Policy* 2023; 177: 113435.
- [83] Vazquez L, Majanne Y, Castro M, et al. Energy System Planning towards Renewable Power System: Energy Matrix Change in Cuba by 2030. *IFAC-PapersOnLine* 2018; 51: 522–527.
- [84] Järvelä M, Järvelä M. Cloud Enhancement Phenomenon : Characteristics of overirradiance events and their effect on photovoltaic power generation.
- [85] Neves G, Vilela W, Pereira E, et al. Spectral impact on PV in low-latitude sites: The case of southeastern Brazil. *Renewable Energy* 2021; 164: 1306–1319.
- [86] Martín N, Ruiz JM. A new method for the spectral characterisation of PV modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 1999; 7: 299–310.
- [87] Holmgren W, Andrews R, Lorenzo A, et al. *PVLIB Python* 2015. 2015.
- [88] Holmgren WF, Groenendyk DG. An open source solar power forecasting tool using PVLIB-Python. In: *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. Portland, OR, USA: IEEE, pp. 0972–0975.
- [89] Stein J, Holmgren W, Forbess J, et al. *PVLIB: Open source photovoltaic performance modeling functions for Matlab and Python*. 2016.
- [90] Holmgren WF, Hansen CW, Stein JS, et al. Review of Open Source Tools for PV Modeling. In: *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy*

Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC), pp. 2557–2560.

- [91] Sevillano-Bendezú MA, Khenkin M, Nofuentes G, et al. Predictability and interrelations of spectral indicators for PV performance in multiple latitudes and climates. *Solar Energy* 2023; 259: 174–187.
- [92] Lave M, Hayes W, Pohl A, et al. Evaluation of Global Horizontal Irradiance to Plane-of-Array Irradiance Models at Locations Across the United States. *IEEE Journal of Photovoltaics* 2015; 5: 1–10.
- [93] Stein JS, Holmgren WF, Forbess J, et al. PVLIB: Open Source Photovoltaic Performance Modeling Functions for Matlab and Python. 6.
- [94] Lohmann GM. Irradiance Variability Quantification and Small-Scale Averaging in Space and Time: A Short Review. *Atmosphere* 2018; 9: 264.
- [95] Paudyal BR, Imenes AG. Analysis of spectral irradiance distribution for PV applications at high latitude. In: *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. 2020, pp. 1834–1841.
- [96] Louwen A, de Waal AC, van Sark WGJHM. Evaluation of different indicators for representing solar spectral variation. In: *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. 2016, pp. 0133–0137.
- [97] Nofuentes G, Gueymard CA, Aguilera J, et al. Is the average photon energy a unique characteristic of the spectral distribution of global irradiance? *Solar Energy* 2017; 149: 32–43.
- [98] Nofuentes G, Gueymard CA, Caballero JA, et al. Experimental Evaluation of a Spectral Index to Characterize Temporal Variations in the Direct Normal Irradiance Spectrum. *Applied Sciences* 2021; 11: 897.
- [99] Jardine CN, Gottschalg R, Betts T, et al. *Influence of Spectral Effects on the Performance of Multijunction Amorphous Silicon Cells*. 2002.
- [100] Paudyal BR, Imenes AG. Analysis of spectral irradiance distribution for PV applications at high latitude. In: *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. 2020, pp. 1834–1841.
- [101] Minemoto T, Nakada Y, Takahashi H, et al. Uniqueness verification of solar spectrum index of average photon energy for evaluating outdoor performance of photovoltaic modules. *Solar Energy* 2009; 83: 1294–1299.
- [102] Norton M, Amillo AMG, Galleano R. Comparison of solar spectral irradiance measurements using the average photon energy parameter. *Solar Energy* 2015; 120: 337–344.
- [103] Minemoto T, Toda M, Nagae S, et al. Effect of spectral irradiance distribution on the outdoor performance of amorphous Si/thin-film crystalline Si stacked photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2007; 91: 120–122.
- [104] Şen Z, Tan E. Simple models of solar radiation data for northwestern part of Turkey. *Energy Conversion and Management* 2001; 42: 587–598.

- [105] Okogbue EC. A Parabolic Model Presentation of Solar Radiation Data at a Tropical Site, Ile-Ife, Nigeria. *Journal of Meteorology and Climate Science* 2012; 10: 22–28.
- [106] Feng Y, Cui N, Chen Y, et al. Development of data-driven models for prediction of daily global horizontal irradiance in Northwest China. *Journal of Cleaner Production* 2019; 223: 136–146.
- [107] Neves GM, Vilela WA, Pereira EB, et al. INFLUÊNCIA DO ESPECTRO SOLAR EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SOB CÉU LIMPO, CÉU PARCIALMENTE NUBLADO E CÉU NUBLADO. *Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS*, <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/257> (2018, accessed 13 September 2022).
- [108] Kirn B, Topic M. Diffuse and direct light solar spectra modeling in PV module performance rating. *Solar Energy* 2017; 150: 310–316.



9. Publicaciones

Publicación en revistas:

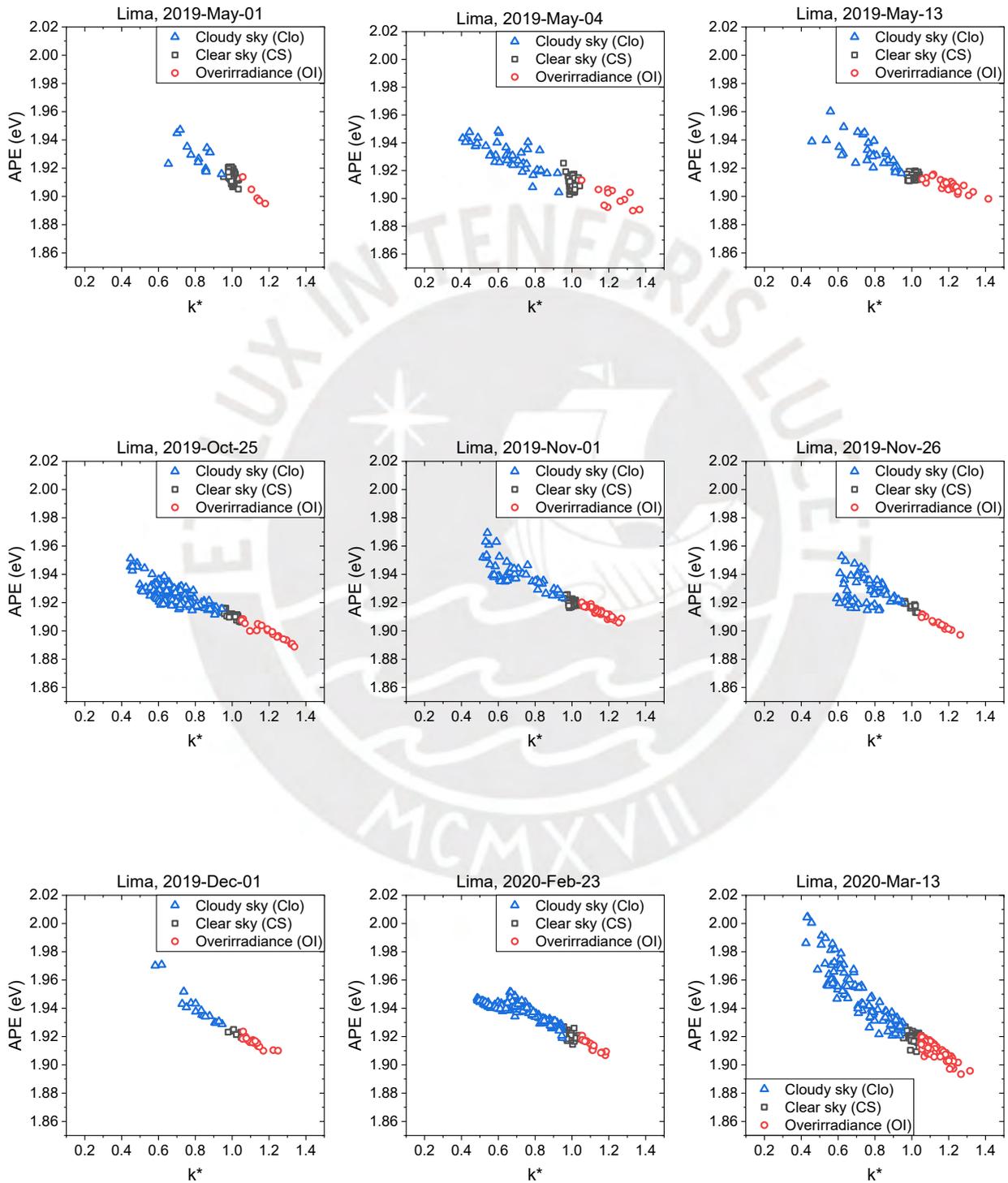
- **Zamalloa-Jara MA**, Sevillano-Bendezú MA, Ulbrich C, Nofuentes G, Grieseler R, Töfflinger JA. Overirradiance conditions and their impact on the spectral distribution at low- and mid-latitude sites. *Solar Energy* 2023; 259: 99–106.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.05.010>
- **Zamalloa Jara MA**, Berg H, Conde LA, Sevillano-Bendezú MA, Carhuavilca AM, Grieseler R, Töfflinger JA. Extreme Overirradiance events and their spectral distribution in Lima, Peru. *J Phys: Conf Ser* 2021; 1841: 012006.
DOI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1841/1/012006>

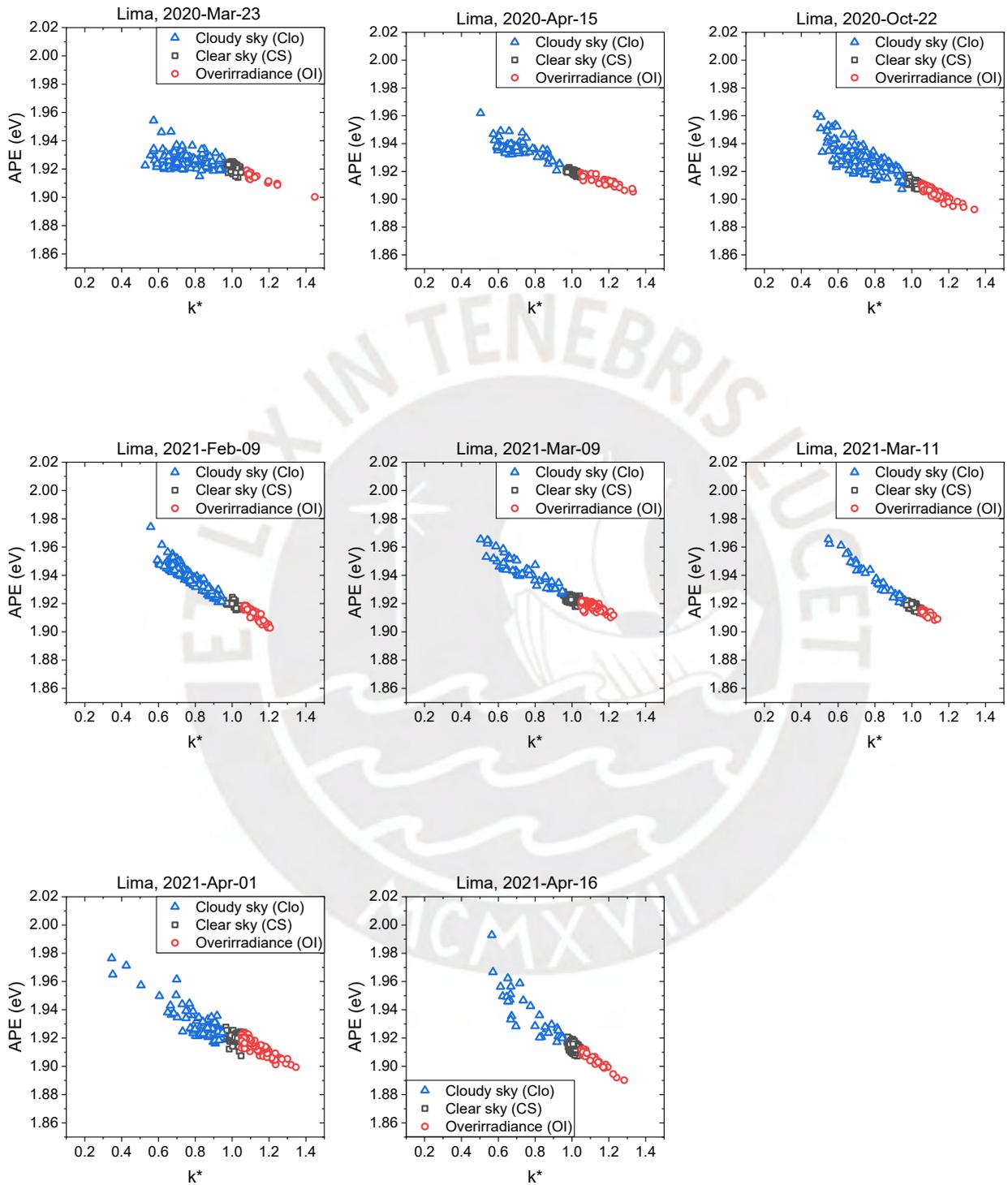
Publicación sometida a revisión:

- **Zamalloa Jara MA**, Grieseler R, Töfflinger JA. Use of satellite data to determine the cloud optical depths present during overirradiance conditions.

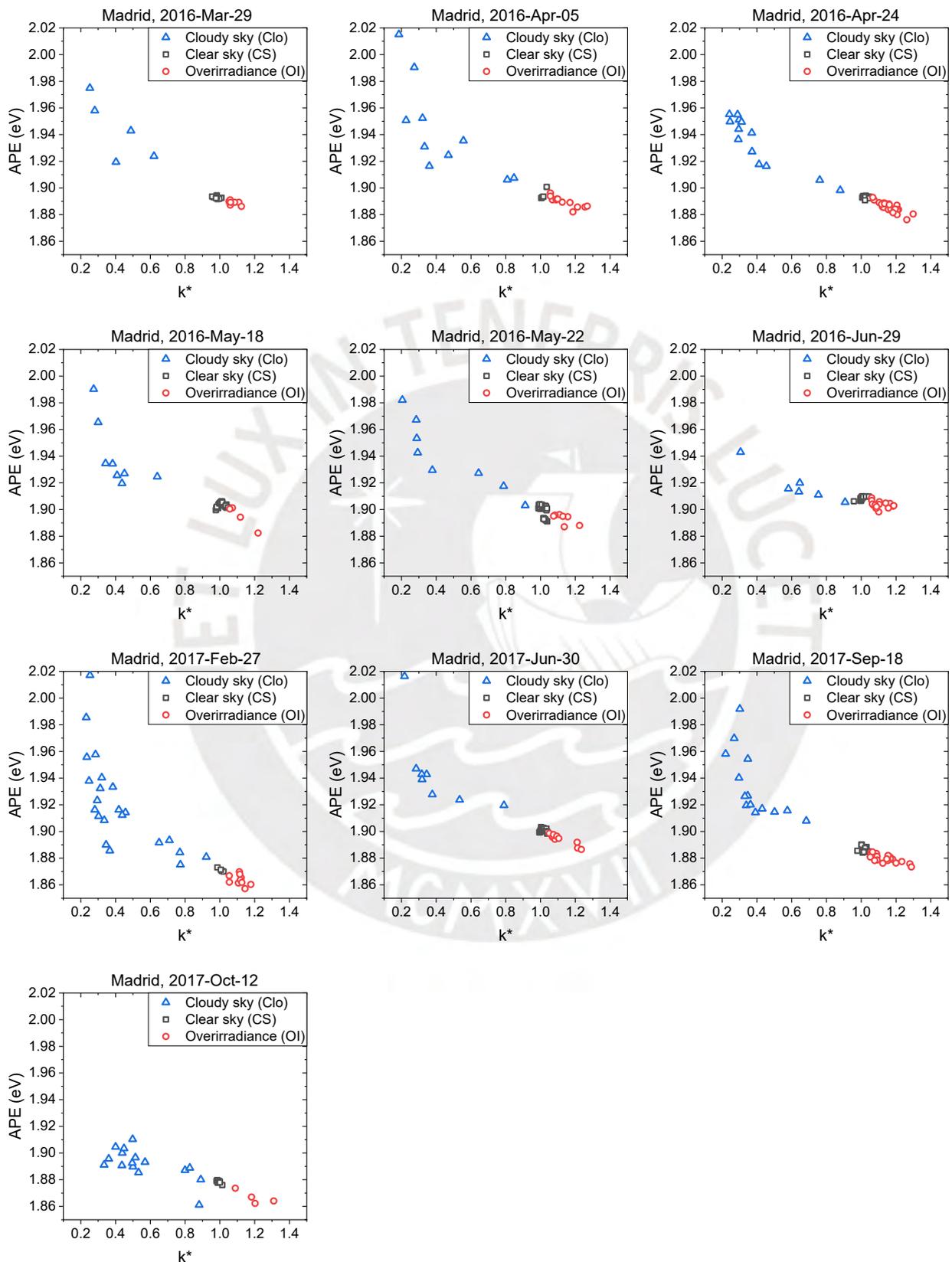
10. Anexos

10.1. Anexo A.1 APE versus k^* - Lima, Perú

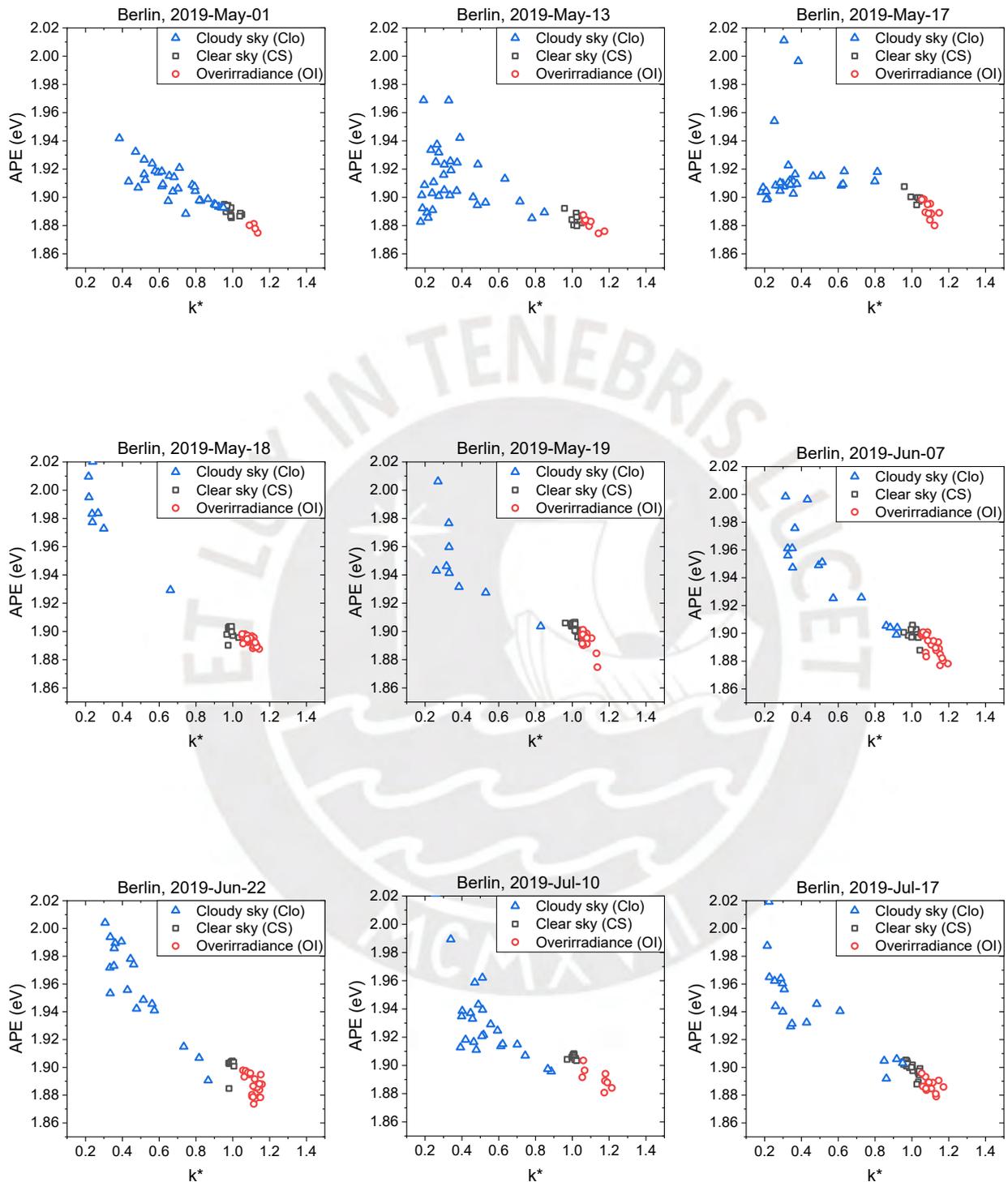


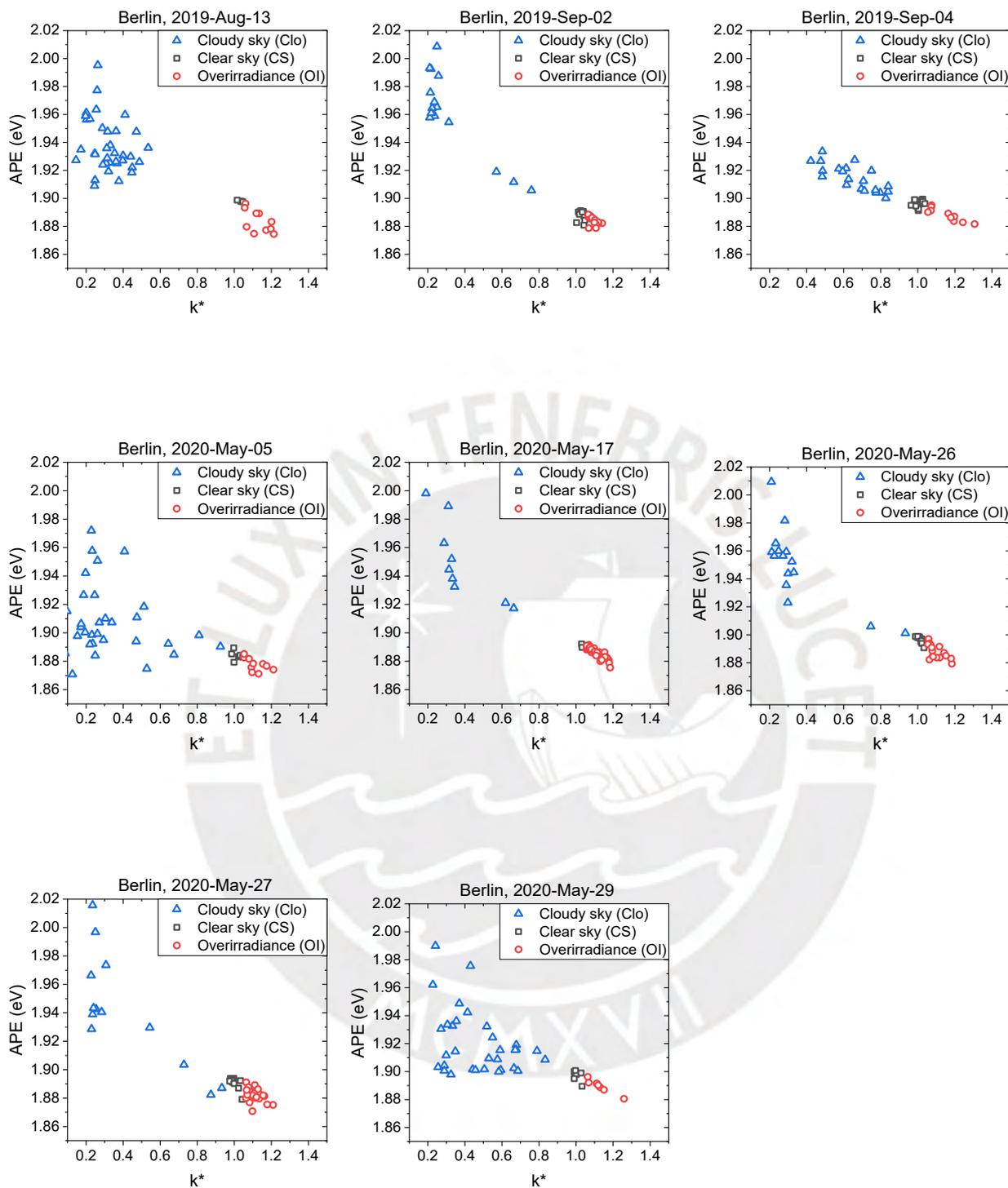


10.2. Anexo A.2 APE versus k^* - Madrid, España



10.3. Anexo A.3 APE versus k^* - Berlín, Alemania





10.4. Anexo B GTI y COD versus Tiempo - Lima, Perú

