



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**DIMENSIONAMIENTO DEL RECURSO SOLAR
EN EL VALLE DE ABURRÁ, COLOMBIA**

Autora

Luisa María Cano Uribe

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2021



Dimensionamiento del recurso solar en el Valle de Aburrá, Colombia

Luisa María Cano Uribe

Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniera Ambiental

Asesores:

Paola Andrea Arias Gómez, Ph.D

John Alejandro Martínez Agudelo, Ph.D

Línea de Investigación:

Modelación Ambiental

Grupo de Investigación:

Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental -GIGA

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2021.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con el apoyo de la alianza Sostenibilidad Energética para Colombia, SÉNECA.

Agradezco a mis padres por su amor infinito, su apoyo y su confianza en mí, por luchar siempre por mi educación y alentarme en los momentos difíciles. A mi abuela, Aurora, por enseñarme sobre la perseverancia, el amor y la importancia de la educación. A mi hermana, por ser mi compañía y cómplice. A mis amigas y amigos, por ser parte fundamental en este proceso.

A la Universidad de Antioquia, mi alma mater, por ser escenario de ciencia, cultura y sociedad, por abrirme sus puertas y acogerme en cada uno de sus espacios. A mis asesores, la profesora Paola Andrea Arias Gómez y el profesor Alejandro Martínez Agudelo, por sus enseñanzas, acompañamiento, comprensión y calidez humana. A mi Team B, por ser mi compañía e inspiración en los días cortos y las noches largas que enmarcaron la construcción de este trabajo de grado. A mis docentes, compañeros y compañeras, por los aprendizajes y ser parte de mi constante crecimiento.

Resumen

Caracterizar la variabilidad de la irradiancia solar sobre la superficie terrestre constituye un paso fundamental para impulsar la implementación de sistemas de energía solar. Frente a la baja disponibilidad de mediciones in situ, las estimaciones de reanálisis y satélites representan alternativas para obtener series de tiempo continuas a largo plazo. En este estudio, se estimó el recurso solar en el Valle de Aburrá a partir de cuatro de años de mediciones terrestres provistas por el piranómetro de la estación Torre SIATA y se evaluó el producto radiación solar de onda corta descendente sobre la superficie obtenido del reanálisis ERA5 y del instrumento ABI del satélite GOES-16. Las observaciones de SIATA mostraron que la radiación solar mensual sobre la superficie del Valle de Aburrá exhibe aumentos en sus magnitudes y menor variabilidad durante las temporadas secas del lugar de estudio, mientras que en las temporadas de altas precipitaciones, los valores promedios son menores y el rango de fluctuación es más amplio. En concreto, febrero y agosto son los meses con mayor disponibilidad del recurso solar con promedios mensuales de 469.28 W/m^2 y 472.44 W/m^2 , respectivamente; mientras que mayo y noviembre son los meses que reciben menor cantidad de radiación solar al tener valores mensuales de 398.21 W/m^2 y 393.89 W/m^2 , respectivamente. La evaluación de los conjuntos de datos satelitales y de reanálisis mostró valores de sesgo medio entre 40 W/m^2 y 140 W/m^2 para GOES-16 y entre -5 W/m^2 y 73 W/m^2 para ERA5. Se encontró que ambos conjuntos presentan limitaciones para representar el comportamiento típico y la variabilidad de la radiación solar a diferentes escalas temporales, principalmente bajo condiciones de nubosidad y alta precipitación. A escala mensual, el conjunto de datos de GOES-16 presenta una correlación de Pearson de 0.61 con las observaciones in situ y sus valores mensuales de error cuadrático medio (RMSE) oscilan entre 32 % y 40 % durante las temporadas secas y entre 42 % y 52 % en las temporadas húmedas. Por su parte, ERA5 captura el carácter bimodal de la radiación solar en la región y presenta una correlación de Pearson de 0.75; sin embargo, sus valores de RMSE oscilan entre 34 % y 45 % en las temporadas secas y entre 45 % y 52 % en las temporadas de lluvias. Respecto a variaciones diarias, se obtiene que los datos satelitales sobreestiman la energía solar entre enero y junio, puesto que los valores de energía para el satélite se centran en magnitudes superiores a 5.3 kWh/m^2 , mientras que las medianas de la energía para SIATA fluctúan entre 4.60 kWh/m^2 y 5.18 kWh/m^2 . Análogamente, los valores de energía solar diaria de ERA5 también son superiores a los observados, al tener medianas que alcanzan valores de 6.45 kWh/m^2 , mientras que las medianas de la energía diaria de SIATA no superan los 6 kWh/m^2 . A escala diurna, se halla que para los datos satelitales y el reanálisis se presentan errores mayores que el 40 % e incluso que superan el 100 % después del mediodía, probablemente debido a que el ciclo diurno de nubosidad/precipitación presenta un pico en las tardes. Adicionalmente, se obtuvo un bajo rendimiento para ambos conjuntos de datos en la representación de la variabilidad horaria, encontrándose correlaciones de Pearson entre -0.01 y 0.62 entre las anomalías horarias de ERA5 y de las observaciones, y correlaciones de Pearson entre 0 y 0.67 entre GOES-16 y las observaciones. El análisis climatológico de la radiación solar en el Valle de Aburrá mostró que bajo condiciones El Niño, la radiación solar presenta aumentos considerables en sus valores, especialmente durante Diciembre-Enero-Febrero, sugiriendo que la energía solar fotovoltaica puede representar un complemento al sector hidroeléctrico frente a las sequías asociadas a la fase cálida del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur.

Palabras clave: Recurso solar, irradiancia solar en superficie, reanálisis ERA5, satélite GOES-16.

Índice general

1. Introducción	9
2. Objetivos	11
2.1. Objetivo general	11
2.2. Objetivos específicos	11
3. Marco teórico	12
3.1. Conceptos de radiación solar	12
3.2. Instrumentos de medición	13
3.3. Otras estimaciones de radiación solar	14
4. Datos y Métodos	17
4.1. Área de estudio	17
4.2. Datos	17
4.3. Procesamiento de datos	19
4.4. Clasificación de eventos ENSO	21
5. Resultados y análisis	22
5.1. Evaluación de la radiación solar a partir de datos in situ	22
5.1.1. Caracterización estadística de radiación solar	22
5.1.2. Ciclo anual de la radiación solar	23
5.1.3. Serie de tiempo y variabilidad mensual	24
5.1.4. Ciclo diurno de la radiación solar	25
5.1.5. Variabilidad de la radiación solar horaria	26
5.1.6. Evolución mensual de la energía diaria	28
5.2. Evaluación del recurso solar derivado del producto ABI L2 + DSR de GOES-16	30
5.2.1. Ciclo anual de la radiación solar a partir de GOES-16	30
5.2.2. Ciclo anual de los errores asociados a GOES-16	31
5.2.3. Promedios mensuales de la radiación solar de GOES-16	32
5.2.4. Energía solar diaria derivada de GOES-16	33
5.2.5. Ciclo diurno de la radiación solar proveniente de GOES-16	36
5.2.6. Ciclo diurno de los errores asociados a GOES-16	37
5.2.7. Escala horaria de la radiación solar de GOES-16	42
5.3. Descripción y evaluación de la radiación solar proveniente del reanálisis ERA5	44
5.3.1. Ciclo Anual de la radiación solar proveniente del reanálisis ERA5	44
5.3.2. Ciclo anual de los errores asociados a ERA5	45
5.3.3. Promedios mensuales de la radiación solar del reanálisis ERA5	46
5.3.4. Escala diaria de la radiación solar del reanálisis ERA5	47

5.3.5.	Ciclo diurno para la radiación solar de ERA5	48
5.3.6.	Ciclo diurno de los errores asociados a ERA5	51
5.3.7.	Escala horaria de la radiación solar de ERA5	56
5.4.	Análisis de radiación solar derivada de ERA5 en el período 1979-2020	58
5.4.1.	Ciclo Anual	58
5.4.2.	Eventos ENSO y variaciones mensuales de la radiación solar	59
5.4.3.	Ciclos diurnos de la radiación solar bajo condiciones ENSO	60
6.	Discusiones y conclusiones	62
	Anexos	66
A.	Información general de los piranómetros de SIATA	66
B.	Información complementaria de la radiación solar derivada del producto ABI del satélite GOES-16	67
C.	Información complementaria de la radiación solar derivada del reanálisis ERA5	77
	Referencias	86

Índice de figuras

3.1. Dominios espaciales de GOES-16. a.) Disco completo (FD). b.) Región CONUS. c.) Regiones de mesoescala. Tomado de www.ospo.noaa.gov	15
4.1. a.) Contexto de la ubicación geográfica y de la topografía del Valle de Aburrá en Colombia. b.) Ciclo anual de precipitación de Medellín-Colombia, tomado del Atlas Climatológico del Instituto Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM; atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html)	18
5.1. Histograma de los promedios horarios de irradiancia solar, obtenido a partir de los registros derivados de SIATA en el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020.	23
5.2. Ciclo anual de la radiación solar en el Valle de Aburrá según los registros de la estación Torre SIATA durante el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020.	24
5.3. Evolución de los valores de radiación solar en superficie en el Valle de Aburrá durante el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, según los registros de SIATA. a.) Promedios mensuales. b.) Anomalías mensuales con respecto al ciclo anual. Las bandas rojas indican eventos ENSO en su fase cálida (El Niño). Las bandas azules indican eventos ENSO en su fase fría (La Niña).	25
5.4. Evolución mensual de los ciclos diurnos multianuales de radiación solar en superficie en el Valle de Aburrá, obtenidos a partir de los registros de SIATA para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020.	26
5.5. Variabilidad mensual de los ciclos diurnos de radiación solar en el Valle de Aburrá, calculados a partir de los registros de SIATA. a.) 2016. b.) 2017. c.) 2018. d.) 2019	27
5.6. Distribución mensual de las anomalías horarias de irradiancia solar en el Valle de Aburrá provenientes de los registros de SIATA, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020. Las cajas rojas corresponden a la temporada seca. Las cajas cian corresponden a la temporada húmeda. Las bandas rojas indican eventos ENSO en su fase cálida. Las bandas azules indican eventos ENSO en su fase fría.	28
5.7. Distribución mensual de la energía media diaria obtenida mediante los registros de SIATA, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020. Las cajas rojas corresponden a la temporada seca. Las cajas cian corresponden a la temporada húmeda. Las bandas verticales rojas indican la ocurrencia de eventos ENSO en su fase cálida de intensidad baja. Las bandas verticales azules indican la ocurrencia de eventos ENSO en su fase fría de intensidad moderada.	29
5.8. Ciclo anual de la radiación solar sobre la superficie del Valle de Aburrá a partir del conjunto de datos satelitales del GOES-16 y de las observaciones de SIATA.	31

5.9. Ciclo anual de errores para las estimaciones de radiación solar sobre el Valle de Aburra derivadas de GOES-16, en el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020. a.) Error de sesgo medio (MBE). b.) Error de sesgo medio estandarizado (nMBE). c.) Error Cuadrático Medio (RMSE). (d.) Error Cuadrático Medio estandarizado (nRMSE).	32
5.10. Serie de tiempo de los promedios mensuales de radiación solar en superficie para el Valle de Aburrá, a partir de las estimaciones derivadas de GOES-16 y las observaciones SIATA 10-min para el período 2018-2020.	33
5.11. Distribución de la energía media diaria para las estimaciones derivadas del satélite GOES-16 y para las observaciones de SIATA 10-min, en el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.	34
5.12. Correlación entre los promedios diarios de radiación solar derivados de GOES-16 y de las observaciones de SIATA 10-min, para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.	35
5.13. Evolución mensual de los ciclos diurnos multianuales en el Valle de Aburrá, en el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020. a.) A la izquierda, para las estimaciones del satélite GOES-16 y su producto a bordo ABI. b.) A la derecha, para las observaciones de SIATA 10-min para el período 2018-2020.	36
5.14. Ciclo diurno de los Errores de Sesgo Medio (MBE) obtenidos para las estimaciones de GOES-16 en el Valle de Aburrá, para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020.	38
5.15. Ciclo diurno de los Errores de Sesgo Medio normalizados (nMBE) obtenidos para las estimaciones de GOES-16 en el Valle de Aburrá, para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020.	39
5.16. Ciclo diurno de los Errores Cuadráticos Medios (RMSE), obtenidos para las estimaciones de GOES-16 en el Valle de Aburrá, para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020.	40
5.17. Ciclo diurno de los Errores Cuadráticos Medios normalizados (RMSE), obtenidos para las estimaciones de GOES-16 en el Valle de Aburrá, para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020.	41
5.18. Histogramas mensuales de los promedios horarios de radiación solar en el Valle de Aburra, obtenidos a partir de las estimaciones ABI L2+DSR de GOES-16 y de los registros de SIATA , para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020.	43
5.19. Ciclo anual de la radiación solar en el Valle de Aburrá a partir del conjunto de datos del reanálisis ERA5 y de los registros de SIATA, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020.	45
5.20. Ciclo anual de los errores para las estimaciones de radiación solar en el Valle de Aburra, derivadas del reanálisis ERA5, en el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020. a.) Error de sesgo medio (MBE). b.) Error de sesgo medio estandarizado (nMBE). c.) Error Cuadrático Medio (RMSE). (d.) Error Cuadrático Medio estandarizado (nRMSE)	46
5.21. Serie de tiempo de los promedios mensuales de radiación solar en superficie en el Valle de Aburrá para los registros de SIATA y para las estimaciones derivadas del reanálisis ERA5 durante el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020.	47

5.22. Distribución de la energía media diaria para las estimaciones derivadas del reanálisis ERA5 y para los registros de SIATA, en el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.	48
5.23. Correlación entre los promedios diarios de radiación solar derivados del reanálisis ERA5 y las observaciones de SIATA, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.	49
5.24. Evolución mensual de los ciclos diurnos multianuales en el Valle de Aburrá, obtenidos a partir de las estimaciones de ERA5 en el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020.	50
5.25. Ciclo diurno de los Errores de Sesgo Medio (MBE) asociado a las estimaciones del reanálisis ERA5, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.	52
5.26. Ciclo diurno de los Errores de Sesgo Medio estandarizados (nMBE) asociado a las estimaciones del reanálisis ERA5, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.	53
5.27. Ciclo diurno de los Errores Cuadráticos Medios (RSME) asociado a las estimaciones del reanálisis ERA5, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.	54
5.28. Ciclo diurno de los Errores Cuadráticos Medios estandarizados (nRSME) asociado a las estimaciones del reanálisis ERA5, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.	55
5.29. Histogramas mensuales de los promedios horarios de radiación solar en el Valle de Aburra, obtenidos a partir de los registros de SIATA y las estimaciones del reanálisis ERA5, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020.	57
5.30. Ciclo anual de la radiación solar en el Valle de Aburrá a partir del conjunto de datos del reanálisis ERA5 entre 1979 y 2020.	59
5.31. Distribución estacional de la radiación solar en superficie derivada de ERA5 para el período 1979-2020 en el Valle de Aburrá. (a.) Promedios mensuales. (b.) Anomalías con respecto al ciclo anual. Los diagramas azules corresponden a los valores de radiación bajo la ocurrencia de condiciones La Niña. Los diagramas verdes corresponden a los valores de radiación en condiciones neutras. Los diagramas rojos corresponden a los valores de radiación bajo la ocurrencia de condiciones El Niño.	60
5.32. Distribución estacional de los ciclos diurnos de radiación solar en superficie derivada de ERA5 para el período 1979-2020 en el Valle de Aburrá. Los diagramas azules corresponden a los valores de radiación bajo la ocurrencia de condiciones La Niña. Los diagramas verdes corresponden a los valores de radiación en condiciones neutras. Los diagramas rojos corresponden a los valores de radiación bajo la ocurrencia de condiciones El Niño.	61
B.1. Serie de tiempo de los promedios horarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2018, obtenida a partir de las estimaciones del producto ABI del GOES-16 vs los registros de SIATA 10-min.	68
B.2. Serie de tiempo de los promedios horarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2019, obtenida a partir de las estimaciones del producto ABI del GOES-16 vs los registros de SIATA 10-min.	69
B.3. Serie de tiempo de los promedios horarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2020, obtenida a partir de las estimaciones del producto ABI del GOES-16 vs los registros de SIATA 10-min.	70

B.4. Serie de tiempo de los promedios diarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2018 según las estimaciones del producto ABI del satélite GOES-16 vs los registros de SIATA.	71
B.5. Serie de tiempo de los promedios diarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2019 según las estimaciones del producto ABI del satélite GOES-16 vs los registros de SIATA.	72
B.6. Serie de tiempo de los promedios diarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2020 según las estimaciones del producto ABI del satélite GOES-16 vs los registros de SIATA.	73
B.7. Anomalías horarias de la irradiancia solar en superficie obtenidas a partir de las estimaciones del satélite GOES-16 en el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020	74
B.8. Energía media diaria calculada con base en las estimaciones de radiación solar del satélite GOES-16 en el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020	74
B.9. Correlación entre los promedios horarios de radiación solar de GOES-16 y de las observaciones de SIATA 10-min, para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.	75
B.10. Correlación entre las anomalías horarias de radiación solar de GOES-16 y de las observaciones de SIATA 10-min, para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.	76
C.1. Serie de tiempo de los promedios horarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2017 a partir de las estimaciones del reanálisis ERA5 vs los registros de SIATA.	78
C.2. Serie de tiempo de los promedios horarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2018 a partir de las estimaciones del reanálisis ERA5 vs los registros de SIATA.	79
C.3. Serie de tiempo de los promedios horarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2019 a partir de las estimaciones del reanálisis ERA5 vs los registros de SIATA.	80
C.4. Serie de tiempo de los promedios horarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2020 a partir de las estimaciones del reanálisis ERA5 vs los registros de SIATA.	81
C.5. Serie de tiempo de los promedios diarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2017 según las estimaciones del reanálisis ERA5 vs los registros de SIATA.	82
C.6. Serie de tiempo de los promedios diarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2018 según las estimaciones del reanálisis ERA5 vs los registros de SIATA.	83
C.7. Serie de tiempo de los promedios diarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2019 según las estimaciones del reanálisis ERA5 vs los registros de SIATA.	84
C.8. Serie de tiempo de los promedios diarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2020 según las estimaciones del reanálisis ERA5 vs los registros de SIATA.	85
C.9. Anomalías horarias de la irradiancia solar en superficie obtenidas a partir de las estimaciones del reanálisis ERA5 en el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020	86

C.10. Energía media diaria calculada con base en las estimaciones de radiación solar del reanálisis ERA5 en el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020	86
C.11. Correlación entre los promedios horarios de radiación solar del reanálisis ERA5 y de las observaciones de SIATA, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.	87
C.12. Correlación entre las anomalías horarias de radiación solar del reanálisis ERA5 y de las observaciones de SIATA, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.	88

Índice de tablas

4.1. Criterios de calidad para información derivada de piranómetros del SIATA.	19
5.1. Análisis estadístico de los promedios horarios de irradiancia solar basados en las mediciones de SIATA, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020.	22
5.2. Medianas de los valores de energía media diaria en el Valle de Aburrá, obtenida con base en los registros de SIATA, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020	29
5.3. Medianas de la energía media diaria de cada mes en el Valle de Aburrá, obtenida con base en las estimaciones de GOES-16 y las observaciones de SIATA-10min, para el período entre enero de 2018 y diciembre de 2020.	36
5.4. Coeficiente de correlación de Pearson entre las anomalías horarias de radiación solar obtenidas para las observaciones de SIATA 10-min y las estimaciones del producto ABI L2+DSR de GOES-16, para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020 en el Valle de Aburrá. Las correlaciones resaltadas en negrilla son estadísticamente significativas con un nivel de la prueba de 0.01.	44
5.5. Medianas de la energía media diaria de cada mes obtenida con base en las estimaciones de ERA5 y los registros de SIATA, para los diferentes años de estudio.	50
5.6. Coeficiente de correlación de Pearson entre las anomalías horarias de radiación solar obtenidas para los registros de SIATA y las estimaciones del reanálisis ERA5, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020 en el Valle de Aburrá. Las correlaciones resaltadas en negrita son estadísticamente significativas con un nivel de la prueba de 0.01.	58
A.1. Información de radiación solar disponible para las diferentes estaciones meteorológicas de SIATA.	66

Capítulo 1

Introducción

La energía es un elemento esencial para el desarrollo de las actividades humanas. Así pues, la satisfacción de los requerimientos energéticos influye notablemente en el crecimiento socioeconómico de los países, en la producción de alimentos, en la promoción de la paz, en la erradicación de la pobreza y la desigualdad, así como en el fomento de la seguridad y la salud (Prävǎlie et al., 2019). Sin embargo, el incremento demográfico y el avance económico mundial de las últimas décadas ha implicado un aumento importante en la demanda de energía que, a su vez, ha conllevado al uso intensivo de combustibles fósiles y a un consecuente deterioro ambiental (Kaygusuz, 2012). Por tal razón, los desafíos prioritarios actuales del sector energético son la seguridad en el suministro de energía y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, que contribuyen al cambio climático (Bale et al., 2015). El despliegue de proyectos relacionados con energías renovables constituye una opción prometedora para alcanzar un sistema energético seguro y sostenible, teniendo en cuenta que los recursos renovables como el agua, el viento, la biomasa y la radiación solar son considerados como suministros inagotables y con mayores beneficios ambientales respecto a las fuentes convencionales de generación de energía eléctrica (Gong et al., 2019). En específico, la energía solar fotovoltaica desempeña un rol importante en la transición hacia los sistemas energéticos renovables que cada vez están tomando más fuerza alrededor del mundo (Camargo & Schmidt, 2020). Entre sus ventajas se destaca que la generación de energía se realiza de forma silenciosa, se producen bajos niveles de emisiones de dióxido de carbono en su funcionamiento y se pueden implementar a múltiples escalas (Dincer, 2011). En los últimos años, la contribución de los sistemas fotovoltaicos en la producción mundial de energía eléctrica ha incrementado sustancialmente, alcanzando una capacidad global instalada de 633.7 GW en 2019, correspondiente a un aumento del 23 % con respecto al año anterior, y se prevé que para el 2024 la cifra sea superior a 1000 GW (SPE, 2020).

En el caso de Colombia, el sector eléctrico se basa principalmente en la generación hidroeléctrica y en el uso de recursos primarios de origen fósil, mientras que la participación de las energías renovables no convencionales es mínima pese al potencial que tiene el país en recurso solar y eólico (Henao et al., 2019). La baja diversidad en la generación de energía, a su vez fomenta la vulnerabilidad del sector eléctrico en el país frente al carácter finito de los combustibles fósiles y a los períodos de sequías asociados a la ocurrencia del patrón climático El Niño-Oscilación del Sur (ENSO por sus iniciales en inglés) (Henao et al., 2020). Adicionalmente, la información presentada por el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas (IPSE) muestra que, para el año 2019, el 51 % del territorio colombiano hacía parte de las Zonas No Interconectadas (ZNI) (SSPD, 2019), que se caracterizan por ser asentamientos o localidades alejadas de las urbes, por tener baja densidad poblacional o por tener una posición geográfica tal, que se

hace difícil la instalación de la infraestructura necesaria para la prestación del servicio (González et al., 2014). En ese sentido, la promoción de sistemas de energía solar como complemento a las tecnologías convencionales e hidroeléctricas, puede representar una opción viable y ambientalmente adecuada para suplir la demanda de energía eléctrica en Colombia de forma continua, cubriendo las regiones diferentes del país (Gómez, 2017).

Sin embargo, el recurso solar tiene asociada una variabilidad e impredecibilidad en su comportamiento (Ren et al., 2019), por lo tanto, la implementación de este tipo de sistemas de energía renovables requiere de un conocimiento profundo de la distribución espaciotemporal, así como de los niveles de intensidad del recurso solar en un lugar determinado, lo que a su vez implica un reto dada la escasez de información derivada de mediciones locales (Lohmann et al., 2016). Por tal razón, este estudio tiene como finalidad estimar el recurso solar en el Valle de Aburrá a diferentes escalas temporales, empleando datos de irradiancia solar en superficie derivadas de observaciones. Igualmente, se busca evaluar el desempeño de estimaciones suministradas por el reanálisis ERA5 y el satélite GOES-16, para representar el comportamiento y la variabilidad del recurso solar en el lugar de estudio .

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento de la irradiancia solar en superficie en el Valle de Aburrá, así como su variabilidad temporal, a partir de diferentes fuentes de información, buscando dimensionar el recurso solar.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la irradiancia solar en superficie en el Valle de Aburrá a partir de los datos in situ proporcionados por la red de piranómetros del SIATA.
- Estimar la irradiancia solar en superficie a partir de los datos derivados del satélite GOES16 y comparar con las observaciones de irradiancia solar provenientes del SIATA.
- Explorar la información de irradiancia solar en superficie derivada del reanálisis ERA5 y comparar con las observaciones de irradiancia solar provenientes del SIATA.

Capítulo 3

Marco teórico

3.1. Conceptos de radiación solar

El sol es la estrella más cercana a la Tierra y se encuentra a una distancia media de 1.5×10^8 km, aproximadamente. Es un cuerpo constituido por gases, fundamentalmente nitrógeno y, virtualmente, constituye la única fuente de energía para impulsar las dinámicas atmosféricas y oceánicas del planeta (Iqbal, 2012). La energía generada por el sol es entendida como un tipo de radiación electromagnética, es decir, corresponde a un conjunto de ondas que se propagan radialmente en el espacio vacío a una velocidad equivalente a la velocidad de la luz (Wallace & Hobbs, 2006). La densidad de flujo de la radiación solar decrece de acuerdo con el cuadrado de la distancia a la fuente emisora, y su comportamiento es bien descrito por las ecuaciones de la teoría electromagnética de Maxwell o a través de la teoría cuántica y relativista (UPME & IDEAM, 2019). El sol es capaz de irradiar energía en un amplio rango de longitudes de onda, abarcando regiones espectrales desde los rayos X hasta las ondas de radio (Badescu, 2008). No obstante, la mayor parte de la energía solar es emitida como radiación de onda corta, en el rango comprendido entre los 200 nm y 3000 nm, incluyendo principalmente las bandas espectrales correspondientes al ultravioleta, al rango visible y al infrarrojo cercano (Liou, 2002).

En la parte superior de la atmósfera terrestre, la radiación solar recibida tiene una magnitud aproximada de 1367 W/m^2 . Este valor es denominado Constante Solar y, en términos prácticos, puede entenderse como la cantidad de energía proveniente del sol, por unidad de tiempo, que es recibida en un área unitaria cuya superficie es perpendicular a la dirección de propagación de la radiación (Wallace & Hobbs, 2006). Aunque la denotación de este valor supone invariabilidad, existen múltiples factores que introducen cambios en su magnitud; entre ellos se resalta la excentricidad de la órbita elíptica de la Tierra, la cual genera variaciones de aproximadamente $\pm 1.7\%$ en la distancia entre el Sol y la Tierra y, consecuentemente, variaciones de $\pm 3.4\%$ en la densidad de flujo de radiación solar que llega al tope de la atmósfera. Estas variaciones en la excentricidad tienen períodos de aproximadamente entre 100.000 y 400.000 años (Badescu, 2008). Otro factor que incide en las variaciones de la constante solar está asociado a la actividad intrínseca del sol, que a su vez, está relacionada con el bloqueo y la intensificación de las manchas solares en la superficie de dicha estrella debido a la acción de fáculas brillantes; este proceso tiene un período máximo correspondiente a un ciclo de Schwabe, es decir, de aproximadamente 10.63 años (Li et al., 2012).

Los rayos de radiación solar que iluminan la Tierra en el tope de la atmósfera son conocidos como radiación solar extraterrestre (ETR, en inglés). Cuando la ETR comienza a atravesar la

atmósfera, ocurren múltiples procesos de absorción, difusión molecular y dispersión por parte de los constituyentes atmosféricos como gases atmosféricos, aerosoles y nubes (Ramachandra, 2006). La radiación solar que sufre procesos de dispersión y absorción es conocida como radiación solar difusa. Una fracción de la radiación difusa es devuelta al espacio y la otra porción alcanza la superficie de la Tierra. Y los rayos solares que llegan a la superficie terrestre directamente desde el disco solar se conoce como radiación solar directa. El flujo total de radiación solar que incide sobre la superficie, incluyendo tanto la radiación directa como la difusa, es denotada como radiación global horizontal (Liu & Jordan, 1960).

La radiación global horizontal, o también conocida como radiación solar de onda corta descendente sobre la superficie, es un componente fundamental dentro del balance radiativo del planeta y tiene gran relevancia dentro de los estudios climáticos y del pronóstico de las dinámicas de la atmósfera, de la superficie terrestre y de los océanos (Zuluaga et al., 2021). Además, el conocimiento asociado a la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra es de particular importancia dentro del diseño y operación de sistemas fotovoltaicos, en las áreas relacionadas con la construcción y la arquitectura, en los sistemas de irrigación de cultivos, entre otros (Almorox & Hontoria, 2004; Babar et al., 2019; Stanhill & Cohen, 2001). En la literatura, el término de radiación solar sobre la superficie terrestre puede variar, adquiriendo denotaciones como radiación, radiancia, intensidad, irradiancia, densidad de flujo, insolación; la importancia de estos términos radica en distinguir que algunos de ellos indican tasas y otros cantidad de energía. Radiación es un término genérico y su significado está relacionado con el contexto en el cual sea usado. Sin embargo, irradiación e insolación hacen referencia a la cantidad de energía solar que alcanza la superficie terrestre en un período de tiempo dado y se expresa en unidades de $\text{KJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (Iqbal, 2012). La radiancia o intensidad se define como la energía transferida por radiación electromagnética en una dirección dada y contenida en un ángulo sólido unitario (Liu & Jordan, 1960) y es expresada en $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$. La irradiancia o densidad de flujo es un término ampliamente utilizado y es definido como la razón a la cual, la energía pasa a través de un área unitaria en una superficie plana y es expresada comúnmente en W m^{-2} (Wallace & Hobbs, 2006).

3.2. Instrumentos de medición

Cuantificar los flujos de radiación solar que inciden sobre la superficie de algún lugar en particular constituye un paso fundamental debido a que se requieren de series de tiempo extensas para una evaluación adecuada del recurso solar y para sus múltiples aplicaciones dentro área de las energías renovables. Los diferentes flujos de radiación solar en superficie son medidos con instrumentos aprobados por la Organización Meteorológica Mundial. Entre ellos, están los pirheliómetros, que miden la radiación solar directa; estos deben apuntar hacia el sol durante todo el día y su superficie receptora está dispuesta de forma perpendicular al haz de luz incidente (UPME & IDEAM, 2019)). Por su parte, los piranómetros son instrumentos que miden la radiación solar global o la radiación difusa. La medición de la radiación difusa se realiza mediante el uso de una banda o disco que protege al sensor del piranómetro de los rayos solares directos (Badescu, 2008). La radiación solar global también puede ser medida a través de actinógrafos, con una incertidumbre de $\pm 8\%$. Estos instrumentos funcionan mediante un sensor termo mecánico que es protegido por una cúpula de vidrio; los valores de radiación incidente son medidos a través del trazo de una gráfica en un tambor que se mueve por el mecanismo de un reloj (UPME & IDEAM, 2019). Por otra parte, se tienen los heliógrafos, que son empleados para determinar la duración relativa de la insolación, es decir, son instrumentos que permiten registrar las horas de brillo solar (Iqbal, 2012).

3.3. Otras estimaciones de radiación solar

En el mundo cada vez se habla más de una transición del sector eléctrico, migrando desde el uso de los combustibles fósiles hacia el uso de alternativas más sostenibles. Bajo esa perspectiva, la radiación solar y el recurso eólico son elementos claves para el desarrollo e implementación de proyectos de energía renovables (Zawilska & Brooks, 2011). En el caso de proyectos sobre energía solar, es de gran relevancia contar con datos fiables que permitan la caracterización del recurso solar de acuerdo con las necesidades de las diferentes fases del proyecto. En las primeras etapas es común requerir valores anuales de irradiancia solar en superficie, pero conforme avanza el proyecto, los requerimientos se hacen más estrictos en cuanto a calidad de los datos y el período de estimaciones disponible (Moreno-Tejera et al., 2016). Según algunos autores, para analizar la viabilidad de sistemas de energía solar en un lugar determinado, es indispensable contar con mediciones para períodos mínimos de 6 años; sin embargo, se habla de registros climáticos representativos para períodos de mediciones de al menos 30 años (Stoffel et al., 2010). No obstante, es difícil contar con mediciones en tierra a largo plazo, dado que la instalación y mantenimiento de estaciones meteorológicas implica altos costos (Zawilska & Brooks, 2011). En ese sentido, se hace necesario explorar las estimaciones de irradiancia solar derivadas de satélites o reanálisis. Los conjuntos de datos de satélites, generalmente, se obtienen a partir del acoplamiento de modelos físicos y empíricos. Los modelos físicos emplean esquemas que determinan la transferencia radiativa en la Tierra y las propiedades de la atmósfera que intervienen en el proceso, y los modelos estadísticos o empíricos usan imágenes espaciales de alta resolución y observaciones terrestres que permiten establecer relaciones entre la radiación en el tope de la atmósfera y la que es recibida en la superficie (Polo et al., 2016; Sengupta et al., 2017). Por otra parte, las estimaciones de radiación provenientes de reanálisis se obtienen a partir de técnicas numéricas de modelación para el pronóstico meteorológico y, por lo general, abarcan períodos más extensos que los datos satelitales pero su resolución espacial es mucho más gruesa (Salazar et al., 2020). En este estudio se emplean los datos derivados del satélite geostacionario GOES-16 y del reanálisis ERA5.

El GOES-16 (Geostationary Operational Environmental Satellite-16) es el sucesor del GOES-13 y fue lanzado en noviembre de 2016. Este satélite orbita en 75.2° W y su cobertura abarca el Norte y el Sur de América y desde el Océano Atlántico hasta la costa oeste de África. ABI (Advanced Baseline Imager) es el principal instrumento de la serie de satélites GOES-R para la provisión de imágenes del clima terrestre, los océanos y el medio ambiente (Goodman et al., 2019). El ABI del GOES-16 cuenta con 16 bandas espectrales, de las cuales dos bandas se encuentran en el espectro visible, cuatro en el infrarrojo cercano y diez en el infrarrojo, proporcionando características de la superficie y del estado de la atmósfera que pueden ser difíciles de captar a través de otros tipos de observaciones (Schmit et al., 2018). El ABI del GOES-16 cuenta con información para tres dominios espaciales: disco completo (FD, por sus siglas en inglés), CONUS y mesoescala. El dominio FD es una región geoespacial comprendida entre los 81.3282° y -81.3282° de latitud, y entre los 6.2995° y -156.2995° de longitud, la cual cubre casi la totalidad del hemisferio occidental (Figura 3.1.a). El dominio espacial CONUS consiste en una región de aproximadamente $3000 \text{ km} \times 5000 \text{ km}$ que abarca los Estados Unidos contiguos (Figura 3.1.b). Existen dos regiones de mesoescala (Figuras 3.1.c y 3.1.d), una que cubra la Costa Este y otra que cubre el medio oeste de Estados Unidos, y ambas son áreas rectangulares de $1000 \text{ km} \times 1000 \text{ km}$ (NOAA, 2018). El desempeño de GOES-16 y su producto a bordo ABI ha mejorado de forma importante con respecto a las misiones anteriores, teniendo en cuenta que posee resoluciones espaciales y temporales más finas y las imágenes espectrales son generadas con mayor calidad y frecuencia (Schmit et al., 2018).

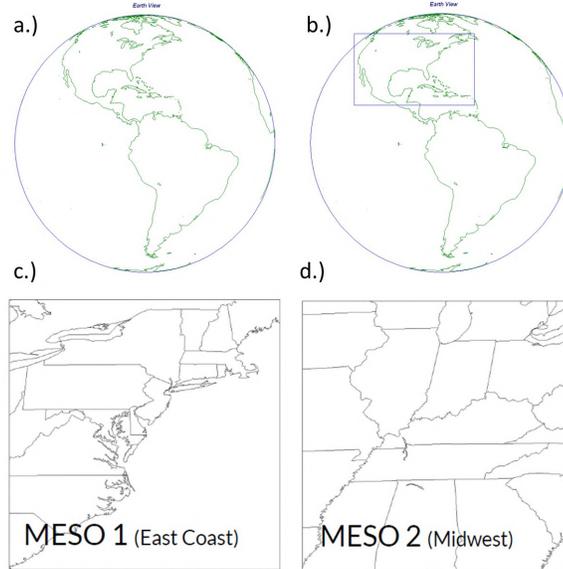


Figura 3.1: Dominios espaciales de GOES-16. a.) Disco completo (FD). b.) Región CONUS. c.) Regiones de mesoescala. Tomado de www.ospo.noaa.gov.

Por otra parte, ERA5 corresponde a la quinta generación de reanálisis atmosférico del Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Mediano Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés). Este reanálisis es producido mediante la asimilación de datos y el ensamblaje de los pronósticos realizados por el modelo del Sistema de Pronóstico Integrado (IFS) de ECMWF y las observaciones históricas disponibles para todo el globo terrestre (Hennermann & Guillory, 2021). Hersbach et al. (2020) exponen que ERA5 presenta mejoras con respecto a versiones anteriores de reanálisis globales como ERA-Interim. En específico, ERA5 cuenta con resoluciones espaciales y temporales mayores; además, tiene 137 niveles desde la superficie de la Tierra hasta 0.1 hPa, mejorando de forma importante la visualización de detalles más finos de fenómenos atmosféricos. Adicionalmente, ERA5 presenta mejoras en la respuesta frente a grandes erupciones volcánicas con respecto a ERA-Interim debido a que se incluyen datos de forzamientos a largo plazo sobre la radiación solar global, los cuales incorporan temperatura superficial del océano, ozono, gases de efecto invernadero y algunos aerosoles, que se derivan de la iniciativa CMIP5 de WCRP (Hersbach et al., 2020).

En el Valle de Aburrá se han llevado a cabo estudios relacionados con la estimación de la radiación solar en superficie. Urrego-Ortiz et al. (2019) presentaron una descripción y pronóstico de la radiación solar en Medellín, Colombia, haciendo uso de un modelo basado en cadenas de Markov y realizando comparaciones con diversas configuraciones de WRF. Los resultados de este estudio sugieren que, en el área de estudio, la disponibilidad promedio del recurso solar es de aproximadamente 5 kWh/m^2 , sugiriendo que la radiación solar puede consolidarse como una fuente de energía en períodos secos. Adicionalmente, el modelo de Markov analizado por estos autores presentó un rendimiento equiparable al de WRF, representando una opción económica, en términos de costos computacionales, para el pronóstico de la radiación solar horaria con un día de anticipación. Por su parte, Robledo-Delgado (2020) realizó una evaluación del desempeño del producto ABI L2+DSR del GOES-EAST en la provisión de información de irradiancia solar en superficie para Medellín, Colombia, empleando como referencia las observaciones provistas por el Sistema de Alertas Tempranas de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA). Los resultados del estudio muestran que el producto

a bordo del GOES-EAST sobreestima la radiación, especialmente cuando hay presencia de nubes; lo anterior está relacionado con la baja resolución espacial del producto. Del mismo modo, dicho estudio muestra que el ABI L2+DSR no representa adecuadamente la naturaleza de las variaciones del recurso solar en la región de estudio.

Capítulo 4

Datos y Métodos

4.1. Área de estudio

El área de estudio se extiende por todo el Valle de Aburrá, el cual se localiza en la Cordillera Central de Colombia entre las coordenadas 6°N y 6.5°N - 75.3°W y 75.6°W , específicamente en el centro-sur del departamento de Antioquia (Figura 4.1.a). Este Valle está conformado por 10 municipios: Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Medellín, Envigado, Itagüí, Sabaneta, La Estrella y Caldas, que, en total, cubren un área de 1152 km^2 , es decir, el 1.8 % de la extensión de Antioquia; a su vez, cuenta con una población de aproximadamente 3.72 millones de personas, una cifra que corresponde al 62 % de la población del departamento (DANE, 2020).

El Valle de Aburrá es un valle estrecho de aproximadamente 64 km de longitud y el ancho de sus secciones oscila entre 3 km y 18.2 km, aproximadamente (Herrera-Mejía & Hoyos, 2019). Como se observa en la Figura 4.1.a, este valle presenta una topografía compleja, con elevaciones que van desde los 1300 msnm hasta aproximadamente los 3000 msnm. De acuerdo con estudios anteriores, el ciclo medio anual de la precipitación sobre la región andina colombiana, incluyendo el Valle de Aburrá, exhibe un comportamiento bimodal como consecuencia del doble paso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) sobre la región (Bedoya-Soto et al., 2019; Mesa Sánchez et al., 2000; Poveda et al., 2005). Los máximos de precipitación ocurren en abril-mayo y octubre-noviembre, cuando la ZCIT se desplaza a sus posiciones más septentrional y meridional, respectivamente, buscando el hemisferio que se encuentra en verano. Lo anteriormente descrito se ilustra en la Figura 4.1.b, que muestra el ciclo medio anual de la precipitación en Medellín. Sin embargo, una descripción más detallada sobre la variabilidad de las magnitudes del ciclo anual de precipitación a lo largo del Valle de Aburrá se encuentra en (Bedoya-Soto et al., 2019). El ciclo diario de la precipitación en el Valle de Aburrá tiene un carácter bimodal, cuyos máximos ocurren en las tardes y alrededor de la medianoche (Poveda et al., 2005).

4.2. Datos

Con el fin de analizar los comportamientos típicos, así como la variabilidad temporal del recurso solar en el Valle de Aburrá, se hizo uso de información de tres conjuntos de datos que corresponden a mediciones en tierra a través de los piranómetros de SIATA, a estimaciones del Reanálisis ERA5 y a datos satelitales derivados de GOES-16. Para todos los conjuntos de datos se descargó información de radiación solar descendente en superficie que comprende tanto la componente directa como la difusa.

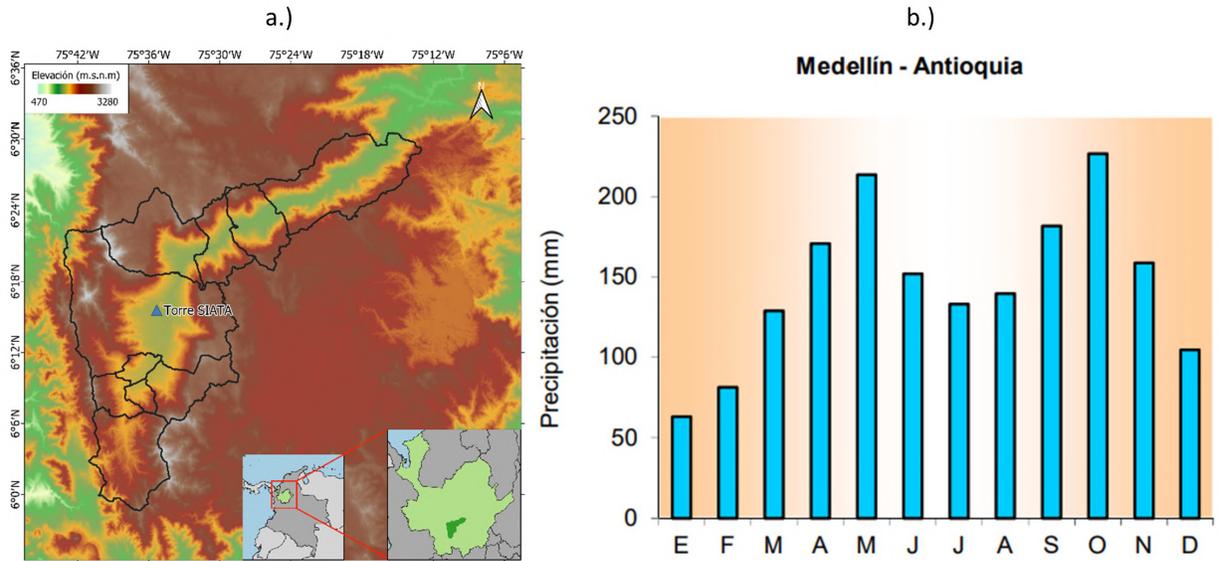


Figura 4.1: a.) Contexto de la ubicación geográfica y de la topografía del Valle de Aburrá en Colombia. b.) Ciclo anual de precipitación de Medellín-Colombia, tomado del Atlas Climatológico del Instituto Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM; atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html)

Mediciones in situ

Se emplearon datos in situ de radiación solar en superficie, expresada en unidades de W/m^2 , provistos por el SIATA. Actualmente, el SIATA cuenta con una red de sensores en superficie que integra cinco piranómetros ubicados en las estaciones Torre SIATA (Medellín), Concejo de Itagüí (Itagüí), I.E Joaquín Vallejo (Medellín), Parque de las Aguas (Barbosa) y AMVA (Medellín). Los datos se encuentran disponibles en el portal web de la institución (<https://siata.gov.co/>) en formato CSV y NetCDF, con una resolución temporal de un (1) minuto. En el presente estudio se seleccionó el piranómetro de la estación Torre SIATA, ubicado en la latitud 6.2593° y la longitud -75.5887° , debido a que tiene información disponible desde el 9 de marzo de 2017 hasta el presente, siendo la estación con la serie de tiempo más extensa de radiación solar (Anexo A.1). Se descargaron datos de cuatro años calendario, comprendidos entre el 01 de enero de 2017 y el 31 de diciembre de 2020; sin embargo, para la comparación con GOES-16 se usaron los datos desde enero de 2018, debido a que a partir de esa fecha el satélite comienza sus estimaciones.

ABI L2 + DSR de GOES 16

El producto ABI L2 + DSR del GOES-16 proporciona datos sobre la radiación solar de onda corta descendente (DSR, por sus siglas en inglés) en la superficie terrestre y representa los flujos instantáneos de dicha variable en un tiempo de observación dado. Los datos para este producto son provistos con una frecuencia temporal horaria y con una resolución espacial que depende del dominio seleccionado (FD, CONUS o MESO). En este estudio se emplearon datos de DSR para el dominio de disco completo (FD) que tiene una cobertura casi completa del hemisferio occidental (Figura 3.1.a), con una resolución espacial de 50km (Laszlo et al., 2020).

Laszlo et al. (2020) exponen que la calidad de los datos de este producto depende de la ubicación y de si la escena se encuentra bajo condiciones de cielo cubierto o despejado. No obstante, la calidad

Tabla 4.1: Criterios de calidad para información derivada de piranómetros del SIATA.

Valor Flag	Criterio de Calidad
1	Dato válido
Dato -9999 y calidad 1	Dato faltante
1581	Calidad dudosa en dato de piranómetro por offset cero de tipo A
1582	Calidad dudosa en dato de piranómetro mayor a cero en la noche
1583	Calidad dudosa en dato de piranómetro por superar radiación teórica en superficie

general es aceptable y, por tanto, los datos fueron dispuestos para su uso operativo desde el 23 de octubre de 2018, incluyendo información desde enero de 2018 hasta el presente. Sin embargo, las mediciones se encuentran disponibles, principalmente, para el rango horario comprendido entre las 8:00 hora local (LT) y las 16:00 LT. La descarga de los datos, en formato NetCDF4 se puede realizar de forma gratuita a través de CLASS (<https://www.avl.class.noaa.gov/saa/products/welcome>) y AIRS (<https://www.ncdc.noaa.gov/airs-web/search>), dos plataformas que permiten el acceso directo a los datos del Centro Nacional de Información Ambiental (NCEI, por sus siglas en inglés) de la NOAA. Para efectos de evaluar el desempeño del producto ABI L2 + DSR de GOES-16, se empleó información desde el inicio de las estimaciones de GOES-16 en enero de 2018 hasta diciembre de 2020.

Reanálisis ERA5

El conjunto de datos del reanálisis ERA5 abarca un período desde 1950 hasta el presente, destacándose que la información entre 1950 y 1978 es una extensión preliminar posterior y que, a partir de 1979, los datos corresponden a una versión final más consolidada. La información se encuentra disponible en el servidor de Climate Data Store (<https://cds.climate.copernicus.eu>) en formato WMO GRIB1 y NetCDF4, con una frecuencia temporal de 1 hora y resolución espacial de 31 km basada en cuadrículas regulares de latitud y longitud de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. En este estudio se emplearon datos de la variable flujo promedio de radiación de onda corta descendente en superficie, expresada en unidades de W/m^2 . Este parámetro de ERA5 es equivalente a lo que mediría un piranómetro en la superficie. Con fines de realizar la evaluación del desempeño del reanálisis en la representación de la radiación solar, se descargaron promedios horarios desde enero de 2017 hasta diciembre de 2020. Adicionalmente, se descargaron datos de los ciclos diurnos mensuales para los años entre 1979 y 2020, con el objetivo de analizar algunos aspectos climatológicos de la radiación solar en superficie y los posibles efectos de eventos ENSO sobre la misma.

4.3. Procesamiento de datos

El procesamiento de los datos derivados del piranómetro de la estación Torre SIATA se llevó a cabo mediante el desarrollo de líneas de código en Python e inició con la realización de un control de calidad que consistió en reemplazar por un valor faltante aquellos datos de calidad inválida y de calidad dudosa, siguiendo los criterios de validación de los datos de SIATA (Tabla 4.1). Teniendo en cuenta las resoluciones temporales de los conjuntos de datos provenientes de ERA5 y de GOES-16, se calcularon los promedios horarios para las observaciones de SIATA bajo dos metodologías diferentes. Para la caracterización de la radiación solar mediante observaciones in situ y para la evaluación del desempeño de ERA5 entre 2017 y 2020, se calcularon promedios de 60 minutos para las mediciones comprendidas entre las 7:00 LT y las 18:00 LT de cada día. Se destaca que cuando el

porcentaje de datos faltantes excede el 10 %, el promedio para esa hora es definido como un valor faltante. Para la validación de las estimaciones de GOES-16 entre 2018 y 2020, los datos de SIATA se llevaron a escala horaria, al ponderar los primeros 10 minutos de cada hora, y se seleccionaron las mediciones entre las 8:00 LT y las 16:00 LT de cada día, siguiendo los tiempos de cobertura proporcionados por la metadata de los archivos de radiación solar derivados del satélite. Para efectos prácticos, los datos de SIATA usados para la evaluación de GOES-16 serán denotados en adelante como “SIATA 10-min”.

El procesamiento de los datos de ERA5 (para los períodos 2017-2020 y 1979-2020) y de GOES-16 es similar y se realizó a partir Python, NCAR Command Language (NCL) y del software Climate Data Operators (CDO). En primera instancia, se modificó el formato original de la fecha pasando de Coordinated Universal Time (UTC) a hora local de Colombia (UTC-5). Posteriormente, se seleccionó la cuadrícula que contenía la ubicación del piranómetro empleado, encontrándose que para ERA5 corresponde al píxel con centroide en la longitud -75.5 y la latitud 6.25 y para GOES-16 el píxel se centra en la longitud -75.75° y la latitud 6.25°. Para los datos de GOES-16 se realizó un procedimiento adicional explicado con detalle en el estudio de Robledo-Delgado (2020), que consiste en controlar la calidad de los datos al remplazar por un valor faltante aquellos datos con calidad degradada o inválida, los cuales corresponden a un 8.85 % del total de datos del período de estudio. A partir de las series de tiempo horarias para los diferentes conjuntos de datos, se realiza un análisis de la radiación solar a diferentes escalas de tiempo; para ello, se calcularon ciclos anuales, promedios y anomalías mensuales, promedios diarios, ciclos diurnos, entre otros. Los errores de los datos provenientes de ERA5 y GOES-16 se compararon con los datos provenientes del piranómetro de Torre SIATA, mediante diferentes métricas de error.

Error cuadrático medio (RMSE)

El error cuadrático medio (o RMSE, por sus siglas en inglés) es una métrica ampliamente utilizada para cuantificar el desempeño de los estimados o las predicciones numéricas de una variable respecto a un conjunto de observaciones y se determina a partir de la Ecuación (4.1).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{est,i} - I_{obs,i})^2}{n}} \quad (4.1)$$

Donde, n es el número de datos, $I_{est,i}$ es el valor estimado de irradiancia y $I_{obs,i}$ corresponde al valor observado de irradiancia. El RMSE se puede llevar a términos de porcentaje, empleando la Ecuación (4.2), donde \bar{I}_{obs} corresponde al promedio de las observaciones.

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{I}_{obs}} \times 100 \% \quad (4.2)$$

Error de sesgo medio (MBE)

El error de sesgo medio (o MBE, por sus siglas en inglés) es una métrica de error que permite determinar si una predicción numérica subestima o sobreestima el valor de una variable respecto a un conjunto de observaciones. Y se calcula a partir de la Ecuación (4.3)

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{est,i} - I_{obs,i}) \quad (4.3)$$

El MBE también puede normalizarse, al dividir por el promedio correspondiente a las observaciones como se muestra en la Ecuación (4.4).

$$nMBE = \frac{MBE}{\bar{I}_{obs}} \times 100 \% \quad (4.4)$$

Coefficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson se define como la relación entre la covarianza de dos conjuntos de datos y el producto de sus desviaciones estándar, dando una idea de la dependencia lineal entre estimados y observaciones. Se calcula con base en la Ecuación (4.5).

$$r = \frac{Cov(I_{est}, I_{obs})}{\sigma_{est} \times \sigma_{obs}} \quad (4.5)$$

4.4. Clasificación de eventos ENSO

Para analizar el comportamiento de la radiación solar en superficie derivada de ERA5 bajo la ocurrencia de eventos ENSO, se hace uso de índice ONI (Oceanic Niño Index), que consiste en un indicador para el monitoreo de La Niña y El Niño, correspondientes a la fase fría y a la fase cálida del patrón climático denotado como el ENSO, respectivamente. Las condiciones El Niño ocurren cuando el ONI presenta valores superiores a +0.5 y las condiciones La Niña se presentan cuando el ONI adquiere valores inferiores a -0.5, durante un tiempo mínimo de cinco (5) meses consecutivos. El ONI es calculado como la media móvil para tres meses de anomalías de temperatura superficial del océano en la región Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°W-170°W) y se compara con el promedio para 30 años. Los valores de ONI se obtienen del portal web del Centro de Predicciones Climáticas (CPC) de la NOAA (<https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/>).

Capítulo 5

Resultados y análisis

5.1. Evaluación de la radiación solar a partir de datos in situ

5.1.1. Caracterización estadística de radiación solar

La distribución general de los promedios horarios de radiación solar en superficie para la estación Torre SIATA, se presenta en la Figura 5.1, y se analiza de forma conjunta con los estadísticos mostrados en la Tabla 5.1. Se encuentra que, a lo largo del período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, los valores horarios de irradiancia solar en la superficie terrestre oscilan, típicamente, alrededor de 431.31 W/m^2 . Sin embargo, la variabilidad horaria es alta debido a que se registran valores mínimos cercanos a cero y valores máximos con magnitudes superiores a 1100 W/m^2 , entre las 7:00 LT y las 18:00 LT.

Adicionalmente, se observa que la distribución de los promedios horarios presenta una asimetría notable, con las mayores frecuencias ubicadas en las magnitudes más bajas de irradiancia solar, principalmente, en el rango comprendido entre 0 W/m^2 y 100 W/m^2 . Estos valores bajos de irradiancia solar son usuales en las primeras y últimas horas del día, así como bajo condiciones de alta nubosidad, lo cual es habitual en el área de estudio dada su topografía y su patrón de precipitación. Urrego-Ortiz et al. (2019) muestran una distribución semejante de los registros de radiación solar horaria en la estación Torre SIATA para un período de análisis comprendido entre marzo de 2016 y febrero de 2017, indicando consistencia con nuestros resultados, que corresponden a la misma área de estudio pero en distintos períodos. Por otra parte, se encuentra que aproximadamente el 59 % de los registros tienen magnitudes superiores a 300 W/m^2 , un valor que es comúnmente considerado como el umbral mínimo requerido para el funcionamiento de una planta de generación de energía solar fotovoltaica (Moreno-Tejera et al., 2016).

Tabla 5.1: Análisis estadístico de los promedios horarios de irradiancia solar basados en las mediciones de SIATA, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020.

\bar{x}	S_x	IQR	Percentiles (W/m^2)				
(W/m^2)	(W/m^2)	(W/m^2)	P_0 (mínimo)	P_{25}	P_{50}	P_{75}	P_{100} (mínimo)
431.31	305.84	542.7	0.03	145.15	399.1	687.85	1148.5

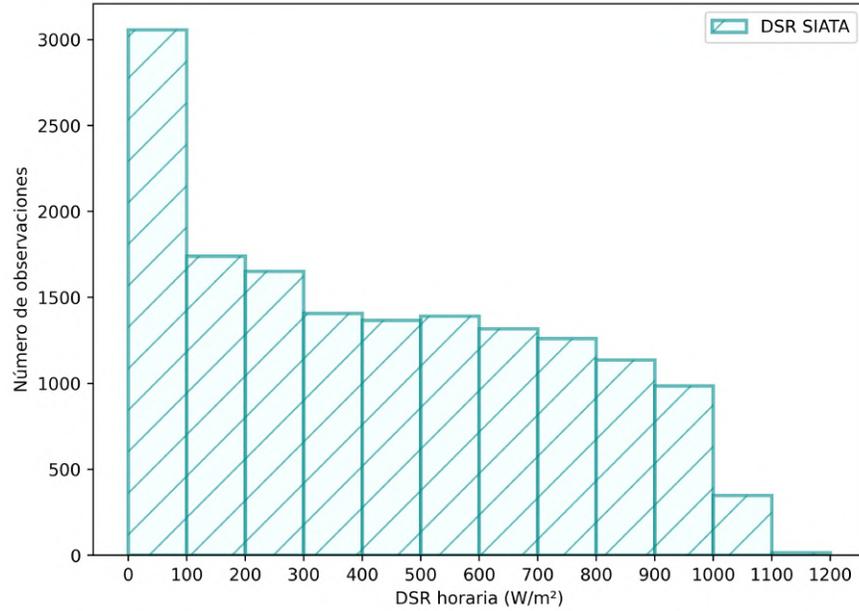


Figura 5.1: Histograma de los promedios horarios de irradiancia solar, obtenido a partir de los registros derivados de SIATA en el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020.

5.1.2. Ciclo anual de la radiación solar

El análisis del comportamiento de los valores mensuales de la radiación solar es importante para caracterizar, en términos cualitativos y cuantitativos, el recurso solar de un área de estudio en particular y para planificar nuevos proyectos en regiones con potencial solar alto (Babar et al., 2019). La figura 5.2 muestra el ciclo anual de radiación solar en superficie, obtenido a partir de los valores registrados por el piranómetro de la estación Torre SIATA, entre los años 2017 y 2020. En general, los promedios mensuales multianuales exhiben un comportamiento bimodal marcado, caracterizado por presentar dos temporadas de valores altos y dos temporadas valores bajos de irradiancia solar. Los trimestres Diciembre-Enero-Febrero (DEF) y Junio-Julio-Agosto (JJA) corresponden a las temporadas con mayores magnitudes, en contraste, los trimestres Marzo-Abril-Mayo (MAM) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON) corresponden a las temporadas de baja radiación solar. En ese sentido, se encuentra que el comportamiento descrito por la radiación solar en superficie en el período de estudio es contrario al patrón de precipitaciones sobre el Valle de Aburrá (Figura 4.1.b), teniendo en cuenta que las temporadas de alta radiación solar están enmarcadas por la baja ocurrencia de precipitaciones, mientras que las temporadas de baja radiación solar se presentan durante las temporadas lluviosas. De esta forma, el ciclo anual de irradiancia solar posiblemente está relacionado con el régimen de precipitación del lugar debido a que, durante las temporadas lluviosas se favorece la formación de nubes convectivas con alto desarrollo vertical que, a su vez, están asociadas con una menor cantidad de radiación solar incidente sobre la superficie terrestre. Por otra parte, se obtiene que los meses que, en promedio, registran mayores valores de irradiancia solar son febrero, julio y agosto, con magnitudes de 469.28 W/m^2 , 467.59 W/m^2 y 472.44 W/m^2 , respectivamente. Por el contrario, los meses con menores promedios multianuales son abril, mayo y noviembre, con valores de 406.96 W/m^2 , 398.21 W/m^2 y 393.89 W/m^2 , respectivamente.

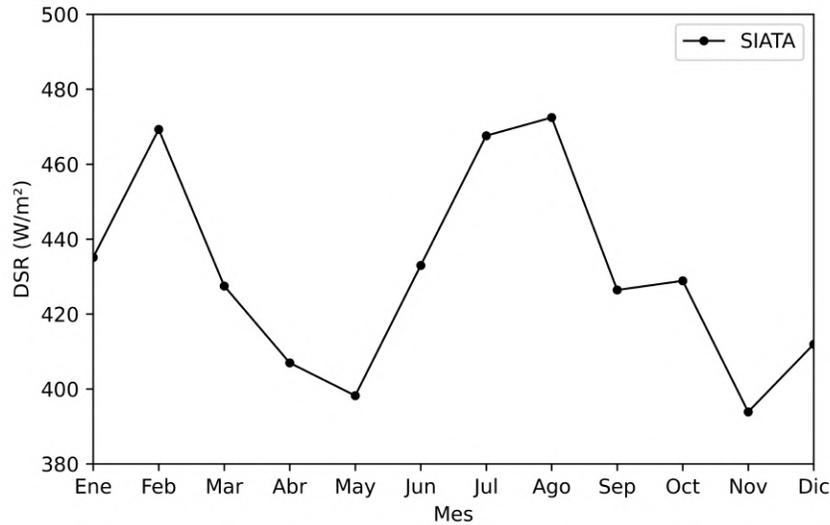


Figura 5.2: Ciclo anual de la radiación solar en el Valle de Aburrá según los registros de la estación Torre SIATA durante el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020.

5.1.3. Serie de tiempo y variabilidad mensual

En la figura 5.3.a se presentan los promedios mensuales de radiación solar en superficie calculados a partir de los registros de SIATA, para el período de estudio. Se observa que para el año 2017, marzo es el mes que presenta el menor promedio mensual al obtenerse un valor de 308.92 W/m^2 , mientras que febrero se caracteriza por ser el mes en que la mayor cantidad de radiación solar alcanza la superficie para ese año, con un promedio mensual de 510.32 W/m^2 . En el año 2018, los valores máximos y mínimos cambian con respecto al año anterior. En concreto, noviembre (373.94 W/m^2) y agosto (489.51 W/m^2) se consolidan como los meses con menor y mayor promedio de irradiancia solar en superficie, respectivamente. Sin embargo, la cantidad de irradiancia que se evidencia en noviembre de 2018 no dista notablemente de los 374.77 W/m^2 que se reciben en marzo del mismo año. En 2019, el promedio mensual máximo se presentó en julio, con un valor de 503.66 W/m^2 ; en contraste, noviembre es el mes con el promedio más bajo, con una magnitud cercana a 386 W/m^2 . El máximo y el mínimo mensual para el año 2020 se sitúan en febrero (504.79 W/m^2) y mayo (416.27 W/m^2), respectivamente. En términos generales, el comportamiento bimodal de la irradiancia se evidencia en los diferentes años de estudio; no obstante, los picos y valles presentan variabilidad para cada año, siendo más común encontrar las magnitudes más bajas de irradiancia en marzo y noviembre, y encontrar valores altos en meses como febrero y agosto.

En la Figura 5.3.b se muestran las anomalías mensuales de irradiancia solar en superficie con respecto al ciclo anual (Figura 5.2), determinadas a través de los registros de la estación Torre SIATA para el período de estudio. Se evidencia que el rango típico de variabilidad de la irradiancia oscila entre -55 W/m^2 y 50 W/m^2 ; sin embargo, en marzo de 2017, destacado por ser el mes con menor irradiancia solar en superficie de la serie de tiempo (Figura 5.3.a), se presenta una anomalía de -118.57 W/m^2 , que puede ser debida a la limitación de registros para dicho mes. Adicionalmente, se encuentra que en 2017 se presentan anomalías negativas en la mayoría de los meses, caracterizándose por ser un año con baja incidencia de radiación solar en la superficie con respecto a los años siguientes. En contraste, se presentan anomalías positivas en la mayor

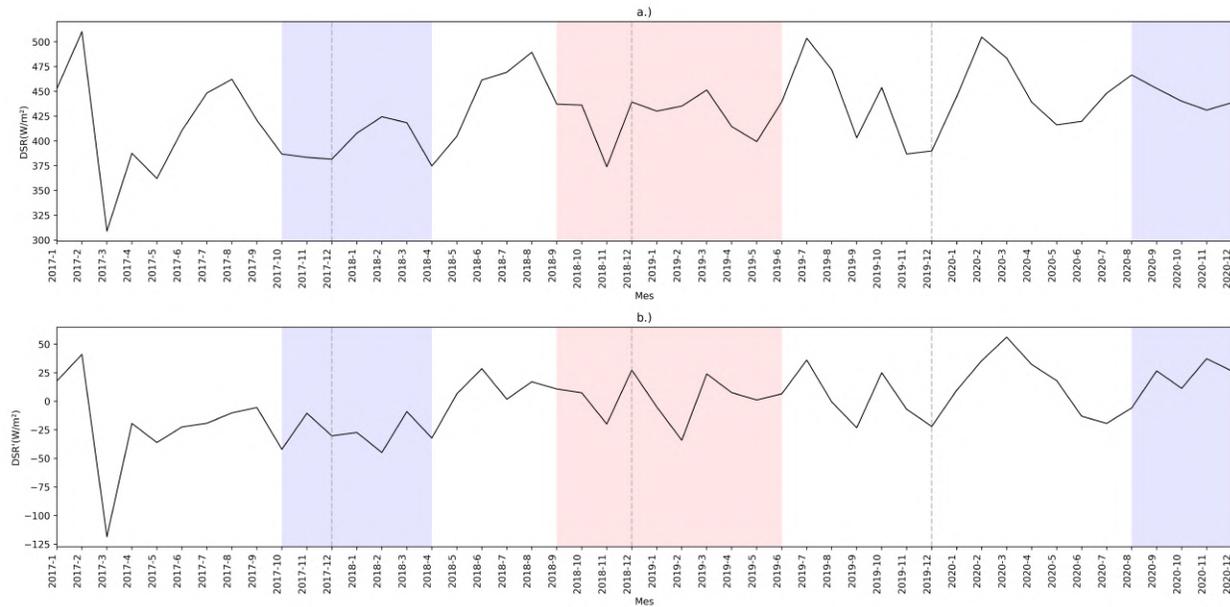


Figura 5.3: Evolución de los valores de radiación solar en superficie en el Valle de Aburrá durante el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, según los registros de SIATA. a.) Promedios mensuales. b.) Anomalías mensuales con respecto al ciclo anual. Las bandas rojas indican eventos ENSO en su fase cálida (El Niño). Las bandas azules indican eventos ENSO en su fase fría (La Niña).

parte del año 2020, destacándose por ser, en términos generales, el año más soleado de la serie de tiempo. Asimismo, se resalta que la primera temporada de valores altos de irradiancia de 2020 se extiende hasta marzo, siendo éste el marzo con mayor cantidad de radiación recibida en la superficie del período de estudio, al obtenerse un promedio mensual de $483.57 W/m^2$. Se resalta que durante el evento La Niña 2017-2018, los valores mensuales de irradiancia solar en DEF presentaron magnitudes más bajas en comparación con los valores para este mismo trimestre durante el evento El Niño 2018-2019. A su vez, para este período de estudio se observa que bajo condiciones neutras del ENSO, los valores mensuales de radiación solar en enero y febrero son mayores con respecto a los valores durante la ocurrencia de eventos ENSO, tanto en su fase cálida como en su fase fría.

5.1.4. Ciclo diurno de la radiación solar

En la figura 5.4 se presentan los ciclos diurnos multianuales para cada mes en la estación Torre SIATA, entre los años 2017 y 2020. Se observa que los valores promedios máximos de radiación solar horaria se presentan al mediodía, alcanzado las mayores magnitudes en febrero ($823 W/m^2$), julio ($792 W/m^2$) y agosto ($826 W/m^2$). En términos generales, se muestra que, a lo largo del año, los valores de irradiancia solar se extienden de forma más o menos simétrica alrededor del mediodía, formando un franja aproximadamente uniforme para las horas de insolación, la cual está comprendida entre las 7:00 LT y las 18:00 LT. Aunque la franja horaria de insolación no varía abruptamente a lo largo del año, debido a que el Valle de Aburrá se encuentra ubicado en la región tropical y su estacionalidad es leve en comparación con los extratropicos, es posible evidenciar ciertos cambios en el número de horas de sol y en la intensidad de éstas. En los períodos abril-mayo y octubre-noviembre se observa que los días tienen una menor duración y que la radiación solar en superficie

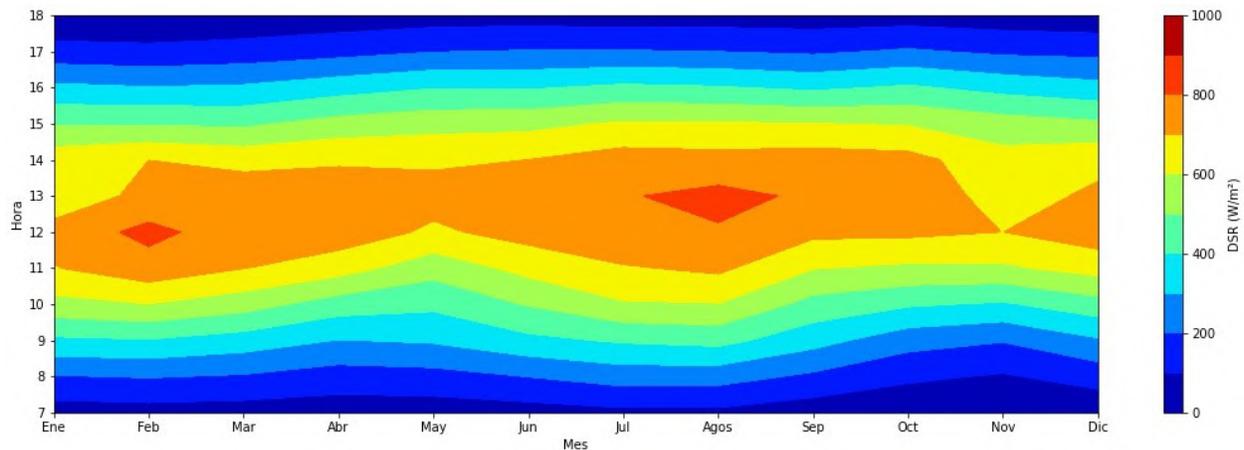


Figura 5.4: Evolución mensual de los ciclos diurnos multianuales de radiación solar en superficie en el Valle de Aburrá, obtenidos a partir de los registros de SIATA para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020.

tiende hacia magnitudes más bajas, por ejemplo, los valores de irradiancia solar superiores a los 300 W/m^2 se alcanzan alrededor de las 9:00 LT, mientras que, en meses como febrero y agosto a esa misma hora ya se han alcanzado promedios de radiación cercanos a los 400 W/m^2 . Asimismo, se muestra que para estos dos períodos los valores máximos de radiación comienzan alrededor de las 11:00 LT, en contraste con los meses restantes cuyos valores máximos ocurren a partir de las 10:00 LT.

En la figura 5.5 se presenta la evolución mensual de los ciclos diurnos de radiación solar en el Valle de Aburrá para cada año de estudio. En general, los ciclos diurnos mensuales para el año 2020 muestran los mayores promedios de irradiancia solar por hora con respecto a los años anteriores. En específico, se observa que en marzo y abril, los valores de irradiancia al mediodía son mayores que 800 W/m^2 ; mientras que, en general, los años restantes presentan promedios de radiación por hora que no superan dicha cifra. Adicionalmente, se observa que alrededor de las 12:00 LT y las 13:00 LT para octubre de 2018 y 2020, los valores de irradiancia solar son superiores a 800 W/m^2 , en tanto que, los valores de irradiancia para los años 2017 y 2019 oscilan entre los 600 W/m^2 y 700 W/m^2 para el mismo rango horario. En 2017 y 2020, se observa que enero y febrero presentan valores altos de irradiancia solar entre las 11:00 LT y las 14:00 LT, cuyas magnitudes oscilan entre los 700 W/m^2 y 900 W/m^2 ; mientras que en enero y febrero de los años 2018 y 2019, los valores de radiación al mediodía no superan los 800 W/m^2 . Además, se observa que en marzo de 2017, la irradiancia solar es más baja en comparación con los marzos restantes, teniendo en cuenta que logra superar los 300 W/m^2 entre las 10:00 LT y a las 16:00 LT, mientras que en los marzos restantes la irradiancia solar excede este valor entre de las 9:00 LT y las 16:00 LT.

5.1.5. Variabilidad de la radiación solar horaria

El análisis de las fluctuaciones naturales es una herramienta útil dentro del estudio del potencial energético solar, debido a que éstas dan cuenta de la incertidumbre asociada al comportamiento de la radiación solar e igualmente, dan una idea del desempeño de modelaciones de sistemas solares (Suehrcke & McCormick, 1988) en un lugar específico. La Figura 5.6 muestra las anomalías de los promedios horarios de irradiancia solar en superficie con respecto al ciclo diurno multianual (Figura

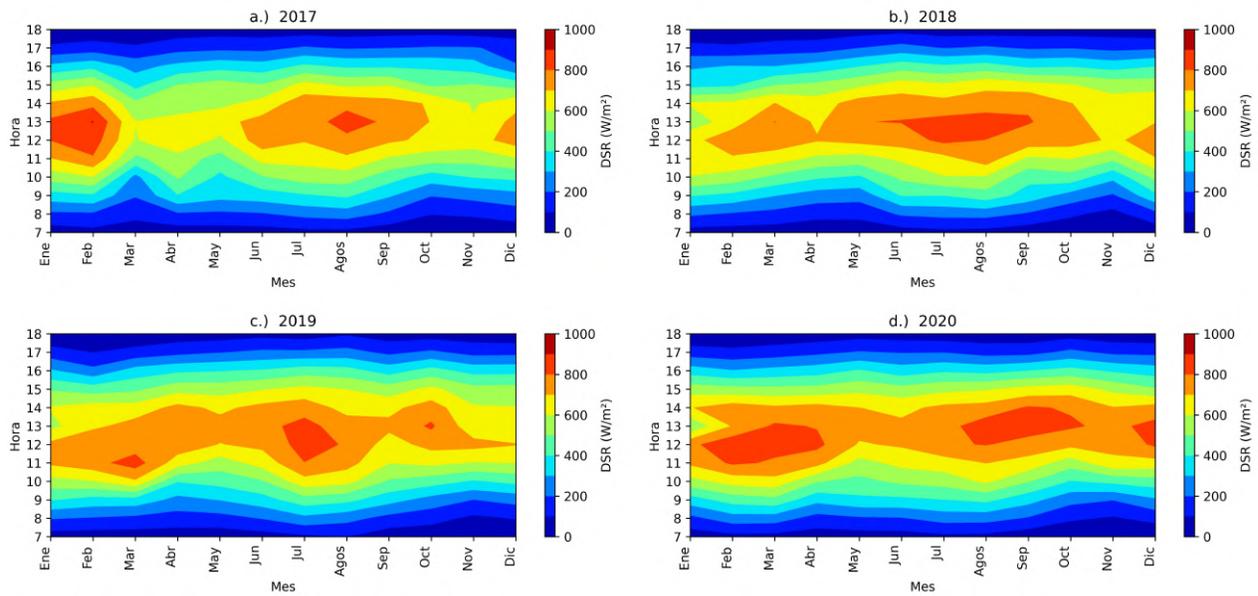


Figura 5.5: Variabilidad mensual de los ciclos diarios de radiación solar en el Valle de Aburrá, calculados a partir de los registros de SIATA. a.) 2016. b.) 2017. c.) 2018. d.) 2019

5.4), calculadas con base en los registros de la estación Torre SIATA. Es posible observar un patrón bimodal generalizado en los valores de anomalías, donde la radiación solar exhibe mayor variabilidad durante las temporadas húmedas, al presentar distribuciones de las anomalías con rangos más amplios con respecto a las temporadas secas. De esta forma, en los trimestres MAM y SON se pueden presentar tanto anomalías superiores a 500 W/m^2 como anomalías con valores menores a -700 W/m^2 , debido a que el paso de la ZCIT induce a que la atmósfera del Valle de Aburrá se active de manera importante y su interacción con la radiación solar extraterrestre sea más alta; por el contrario, durante los trimestres DEF y JJA, predominan los cielos despejados y por ende, se reduce la extinción de la radiación solar extraterrestre por parte de las nubes y se obtienen menores rangos de variabilidad de la irradiancia solar en superficie.

En el año 2017, se observa que enero presentó un rango de variabilidad superior a los eneros restantes, con una distribución concentrada hacia los valores positivos de las anomalías y que, a su vez, alcanzó promedios horarios de radiación que excedieron los promedios multianuales por hora para este mes hasta en 400 W/m^2 . Por otra parte, se destaca que la distribución de las anomalías de marzo de 2017 se centra hacia los valores negativos, es decir, los promedios horarios de irradiancia solar fueron, mayoritariamente, inferiores con respecto al ciclo diario multianual para este mes. De forma análoga al año 2017, marzo de 2018 fue un mes con alta variabilidad, pues sus anomalías positivas alcanzaron magnitudes cercanas a 432 W/m^2 , mientras que las anomalías negativas alcanzaron valores ligeramente inferiores a -560 W/m^2 . En 2019, se destaca que el mes de septiembre, que pertenece a la segunda temporada húmeda del año, presenta una distribución bastante amplia de las anomalías registrando, incluso, valores horarios de irradiancia solar inferiores en 753 W/m^2 con respecto al promedio multianual por hora correspondiente. En 2020, se resalta que en marzo la distribución de las anomalías está concentrada hacia los valores positivos, indicando que los valores de irradiancia horaria presentaron, frecuentemente, magnitudes superiores a los promedios multianuales por hora. Adicionalmente, es posible observar que durante la ocurrencia

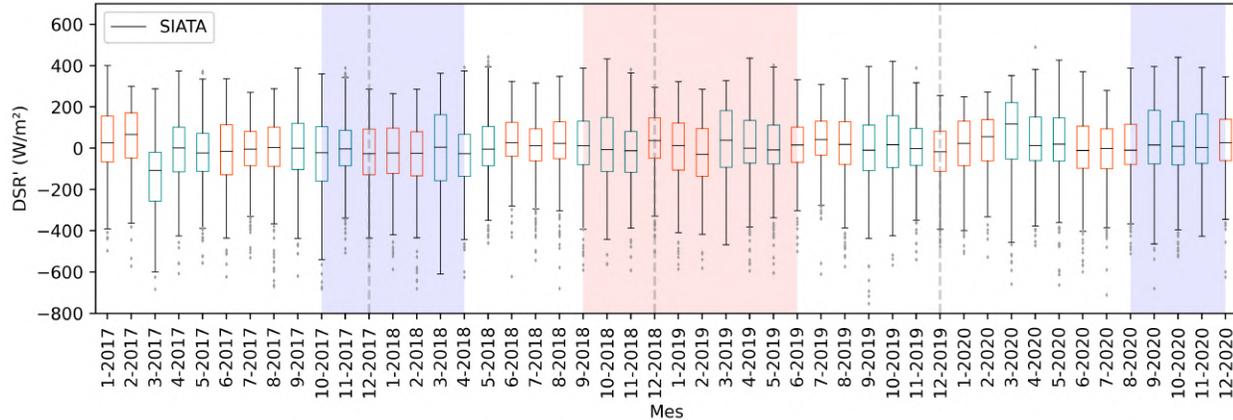


Figura 5.6: Distribución mensual de las anomalías horarias de irradiancia solar en el Valle de Aburrá provenientes de los registros de SIATA, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020. Las cajas rojas corresponden a la temporada seca. Las cajas cian corresponden a la temporada húmeda. Las bandas rojas indican eventos ENSO en su fase cálida. Las bandas azules indican eventos ENSO en su fase fría.

del evento La Niña 2017-2018, las anomalías horarias de radiación solar se concentraron hacia los valores negativos, exceptuando a abril de 2018, cuya mediana tuvo un valor positivo de 5.64 W/m^2 ; sin embargo el rango de variabilidad para este mes fue bastante amplio al oscilar entre 400 W/m^2 y -600 W/m^2 . En contraste, durante La Niña 2020-2021 las distribuciones de las anomalías horarias se centraron en valores positivos, a excepción de agosto de 2020, que presentó una mediana de -9.36 W/m^2 . Por su parte, durante el evento El Niño 2018-2019, la mayor parte de los meses pertenecientes a las temporadas secas exhibieron distribuciones concentradas hacia valores positivos de las anomalías horarias, exceptuando a febrero de 2019 que presentó una distribución con asimetría positiva y una mediana de -30.42 W/m^2 .

5.1.6. Evolución mensual de la energía diaria

Las distribuciones de los valores medios de energía, a diferentes escalas temporales, son ampliamente usadas para la evaluación del recurso solar y para la determinación de la viabilidad de proyectos de energía solar (Pagola et al., 2010). Para el presente caso, el comportamiento de los promedios de energía diaria es representado en los respectivos diagramas de caja y bigotes mostrados en la Figura 5.7. En el año 2017 se observa que en febrero y agosto, pertenecientes a las temporadas secas, al menos el 75 % de los valores de energía media diaria superan los 5 kWh/m^2 . Mientras que, al menos el 75 % de los valores de energía diaria para meses de la temporada húmeda como marzo, mayo y noviembre presentan valores inferiores a 5 kWh/m^2 . En abril de 2017, los valores de energía diaria se caracterizaron por su alto rango de variabilidad, cuyas magnitudes alcanzaron valores altos de 7 kWh/m^2 y valores bajos de aproximadamente 2 kWh/m^2 . En 2017, septiembre fue el mes que registró el mayor valor de energía media diaria con una magnitud de 7.5 kWh/m^2 , en tanto que, el valor mínimo de energía diaria se presentó en enero, cuya magnitud fue de 1.83 kWh/m^2 .

En 2018, las distribuciones de los valores de energía media diaria para enero y febrero se centraron en valores de 4.72 kWh/m^2 y 4.97 kWh/m^2 , respectivamente (Tabla 5.2). En 2019, las medianas de los valores de energía diaria correspondieron a 4.73 kWh/m^2 para enero y a 5.05 kWh/m^2

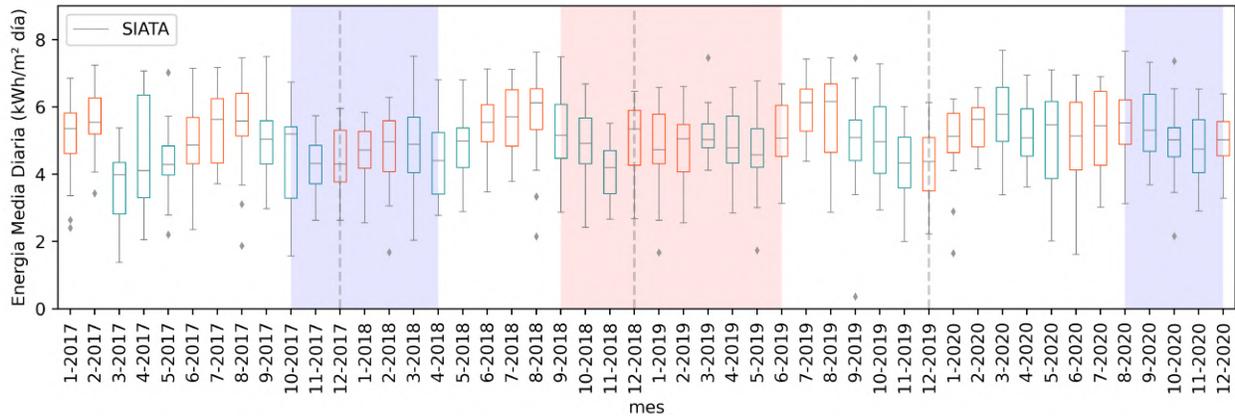


Figura 5.7: Distribución mensual de la energía media diaria obtenida mediante los registros de SIATA, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020. Las cajas rojas corresponden a la temporada seca. Las cajas cian corresponden a la temporada húmeda. Las bandas verticales rojas indican la ocurrencia de eventos ENSO en su fase cálida de intensidad baja. Las bandas verticales azules indican la ocurrencia de eventos ENSO en su fase fría de intensidad moderada.

Tabla 5.2: Medianas de los valores de energía media diaria en el Valle de Aburrá, obtenida con base en los registros de SIATA, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020

Energía diaria (kWh/m² -día)				
Mes	2017	2018	2019	2020
Enero	5.36	4.72	4.73	5.13
Febrero	5.55	4.97	5.05	5.63
Marzo	3.99	4.89	5.03	5.77
Abril	4.11	4.41	4.79	5.08
Mayo	4.29	4.99	4.58	5.48
Junio	4.87	5.55	5.08	5.14
Julio	5.63	5.71	6.13	5.44
Agosto	5.58	6.12	6.16	5.54
Septiembre	5.03	5.17	5.09	5.31
Octubre	5.20	4.92	4.97	5.02
Noviembre	4.32	4.20	4.33	4.75
Diciembre	4.30	5.35	4.38	5.02

para febrero. Asimismo, se evidencia que estos meses de 2018 y 2019 presentan mayor variabilidad y magnitudes más bajas de las medianas de energía diaria que los correspondientes a 2017 y 2020. En el año 2018, el valor mínimo de energía diaria tuvo una magnitud de 1.68 kWh/m^2 y se presentó en enero, mientras que el valor máximo se presentó en septiembre y alcanzó una magnitud de 7.64 kWh/m^2 . De forma análoga, el mínimo y el máximo de energía diaria del 2019 se presentaron en enero (0.36 kWh/m^2) y septiembre (7.46 kWh/m^2), respectivamente. A lo largo del año 2020, el ciclo bimodal de la radiación solar para el área de estudio no se observa tan marcado con respecto a los años anteriores, debido a que las distribuciones de la energía diaria para las temporadas húmedas se centraron en valores que no distaba tan notablemente de las medianas correspondientes a las distribuciones de la energía diaria para las temporadas secas. Específicamente, la Tabla 5.2 muestra que en marzo 2020 la mediana de energía diaria alcanzó un valor superior al correspondiente para la mediana de meses que típicamente cuentan con alta incidencia de radiación en superficie como febrero, junio, julio y agosto.

5.2. Evaluación del recurso solar derivado del producto ABI L2 + DSR de GOES-16

5.2.1. Ciclo anual de la radiación solar a partir de GOES-16

En la Figura 5.8 se presenta el ciclo anual para los valores de radiación solar en superficie derivados del satélite GOES-16 y de su producto a bordo ABI, y se contrasta con el ciclo anual de la radiación solar obtenida a partir de los registros de la estación Torre SIATA, para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020. Los promedios mensuales multianuales de GOES-16 exhiben un comportamiento bimodal, en el cual se presentan dos máximos y dos mínimos a lo largo del año. La primera temporada de alta radiación ocurre en el trimestre MAM, cuyo promedio mensual multianual máximo se presenta en abril y su magnitud es de 641.46 W/m^2 ; posteriormente, se presenta la primera temporada de baja radiación, cuyo mínimo se sitúa en julio. Luego, la radiación aumenta rápidamente y alcanza su segundo pico en agosto (635.74 W/m^2) y, nuevamente, comienza a disminuir alcanzando su segundo mínimo de radiación en noviembre, con un promedio mensual multianual de aproximadamente 531 W/m^2 .

El comportamiento de la radiación solar en superficie descrito por los datos satelitales diverge notablemente del patrón bimodal exhibido por las observaciones. En primera instancia, los valores de SIATA 10-min indican que, en meses como marzo, abril, mayo y septiembre, la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie es limitada, en tanto que, el satélite y su producto a bordo muestran que estos meses se caracterizan por tener alta incidencia de radiación en la superficie terrestre. De igual forma, se destaca que las magnitudes de la radiación solar obtenida a partir del satélite GOES-16 son superiores a los valores correspondientes a la observaciones, siendo más marcadas las diferencias de magnitudes en la primera mitad del año. En julio se obtiene un promedio mensual multianual de 605.55 W/m^2 para la radiación solar derivada del GOES-16 y de 598.50 W/m^2 para SIATA, siendo julio el mes en el que los datos satelitales, en promedio, tienen mayor semejanza con los valores de radiación solar asociados a las observaciones. Adicionalmente, se encuentra que la correlación de Pearson entre los ciclos anuales de GOES-16 y SIATA tiene un valor de 0.61, indicando que, pese a las discrepancias mencionadas anteriormente, ambos conjuntos de datos presentan una relación sustancial.

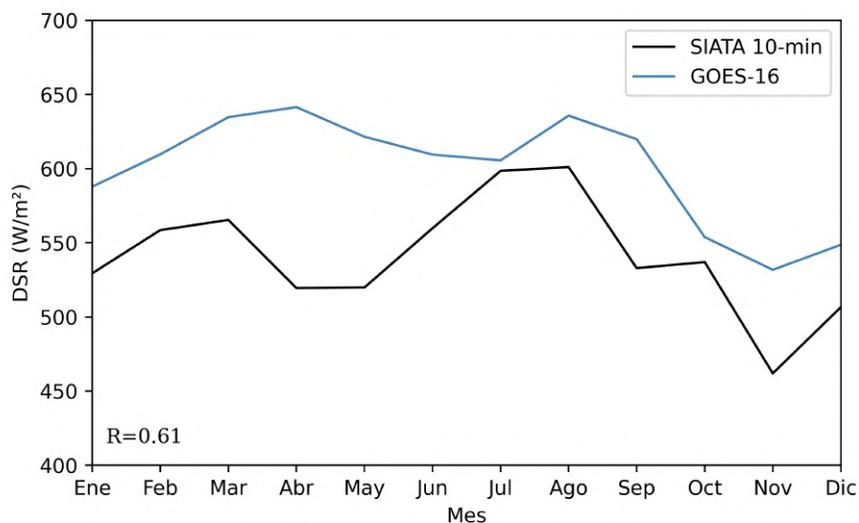


Figura 5.8: Ciclo anual de la radiación solar sobre la superficie del Valle de Aburrá a partir del conjunto de datos satelitales del GOES-16 y de las observaciones de SIATA.

5.2.2. Ciclo anual de los errores asociados a GOES-16

En la figura 5.9 se expone la evolución mensual de los errores para los valores de irradiancia solar en superficie, obtenidos a partir de las estimaciones de GOES-16 y su producto a bordo ABI. En general, se encuentra que a lo largo del año los errores de sesgo medio presentan valores positivos, indicando que el producto de GOES-16 sobreestima la radiación solar en superficie durante todos los meses del año (Figura 5.9.a), obteniéndose sesgos más pronunciados en los meses correspondientes a las temporadas húmedas del área de estudio. Específicamente, las sobreestimaciones más notables de GOES-16 se presentan en abril, mayo y septiembre cuyos valores de MBE son de 138.27 W/m^2 (26.62 %), 121.76 W/m^2 (23.42 %) y 125.19 W/m^2 (23.49 %), respectivamente. Mientras que los valores de MBE más bajos son de aproximadamente 53.56 W/m^2 (9.59 %), 51.94 W/m^2 (8.68 %) y 43.67 W/m^2 (8.62 %), correspondientes a las estimaciones para los meses febrero, julio y diciembre, respectivamente.

De acuerdo con la Figura 5.9.c y la Figura 5.9.d, durante las temporadas secas, las estimaciones de GOES-16 presentan un mejor desempeño, al obtenerse RMSE inferiores al 40 %; mientras que, durante las temporadas húmedas, los errores son superiores al 40 % y pueden alcanzar valores de hasta el 52 %. Las magnitudes altas que presentan las métricas de error durante las épocas de lluvias pueden estar asociados a las limitaciones del satélite para representar los complejos de nubes que, típicamente, se presentan durante estos meses como consecuencia del paso de la ZCIT sobre la región de estudio. Además, el período comprendido entre marzo y abril se caracteriza porque los valores de radiación solar extraterrestre tienden hacia las mayores magnitudes, que al sumarse con el supuesto de que GOES-16 tiene dificultades para representar la nubosidad, podrían ocasionar las altas magnitudes de la radiación solar en superficie estimadas por el satélite durante dichos meses (Figura 5.8).

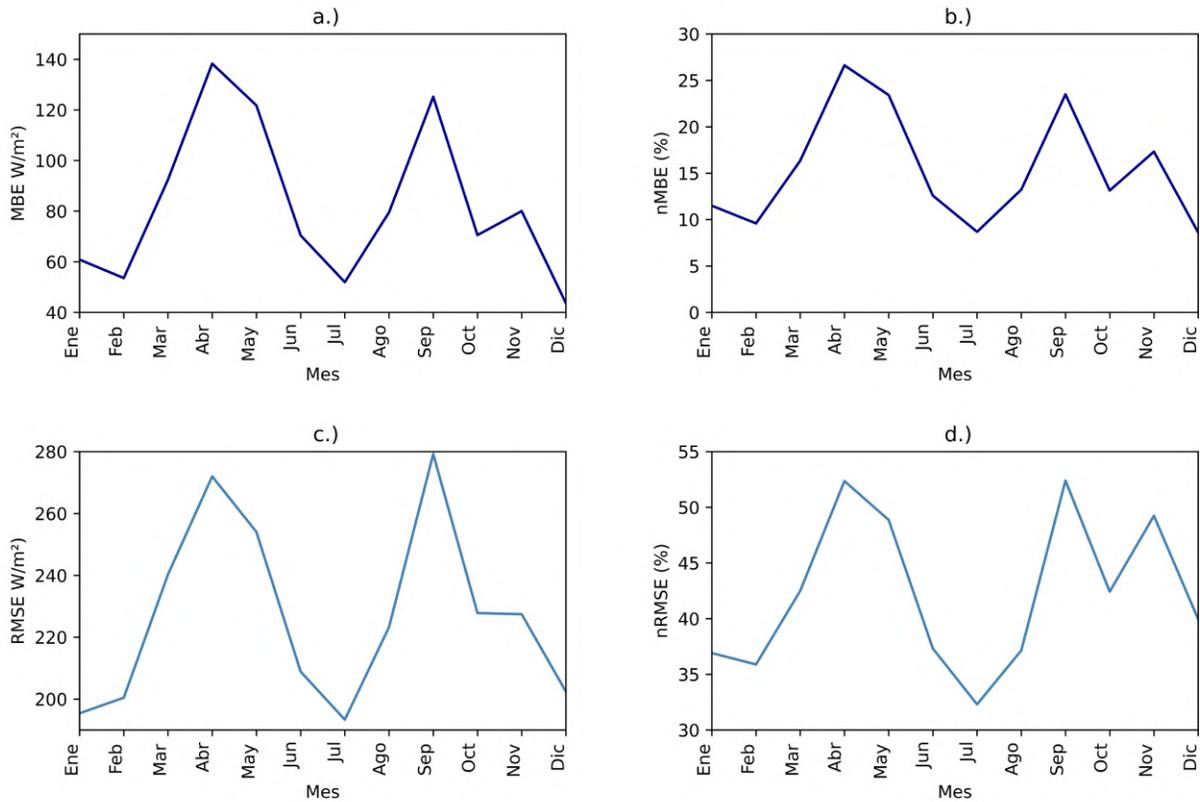


Figura 5.9: Ciclo anual de errores para las estimaciones de radiación solar sobre el Valle de Aburra derivadas de GOES-16, en el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020. a.) Error de sesgo medio (MBE). b.) Error de sesgo medio estandarizado (nMBE). c.) Error Cuadrático Medio (RMSE). (d.) Error Cuadrático Medio estandarizado (nRMSE).

5.2.3. Promedios mensuales de la radiación solar de GOES-16

En la Figura 5.10 se muestra el comportamiento de los promedios mensuales de la radiación solar para las estimaciones de GOES-16 versus las observaciones de SIATA 10-min, para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020 en el Valle de Aburrá. En el 2018 se observa que los valores de las estimaciones de GOES-16 distan sustancialmente de los promedios de radiación solar obtenidos a partir de las observaciones, principalmente, en meses como marzo, abril y mayo donde los valores para el satélite son de 664.93 W/m^2 , 695.62 W/m^2 y 664.92 W/m^2 , correspondientemente; mientras que los valores de SIATA 10-min para estos meses son 526.27 W/m^2 , 472.84 W/m^2 y 520.40 W/m^2 , respectivamente. En los años siguientes, la radiación solar estimada por GOES-16 continúa presentando sesgos con respecto a las observaciones, no obstante, suelen ser considerablemente menores a las presentadas en el 2018. A partir de 2019, además se observa que las estimaciones de GOES-16 captan mejor el potencial de valores altos de irradiancia solar en superficie durante las temporadas secas, en comparación con las estimaciones obtenidas para 2018. Lo anteriormente mencionado puede estar ligado a las mejoras introducidas en el modo de escaneo del satélite para el dominio espacial de disco completo (FD).

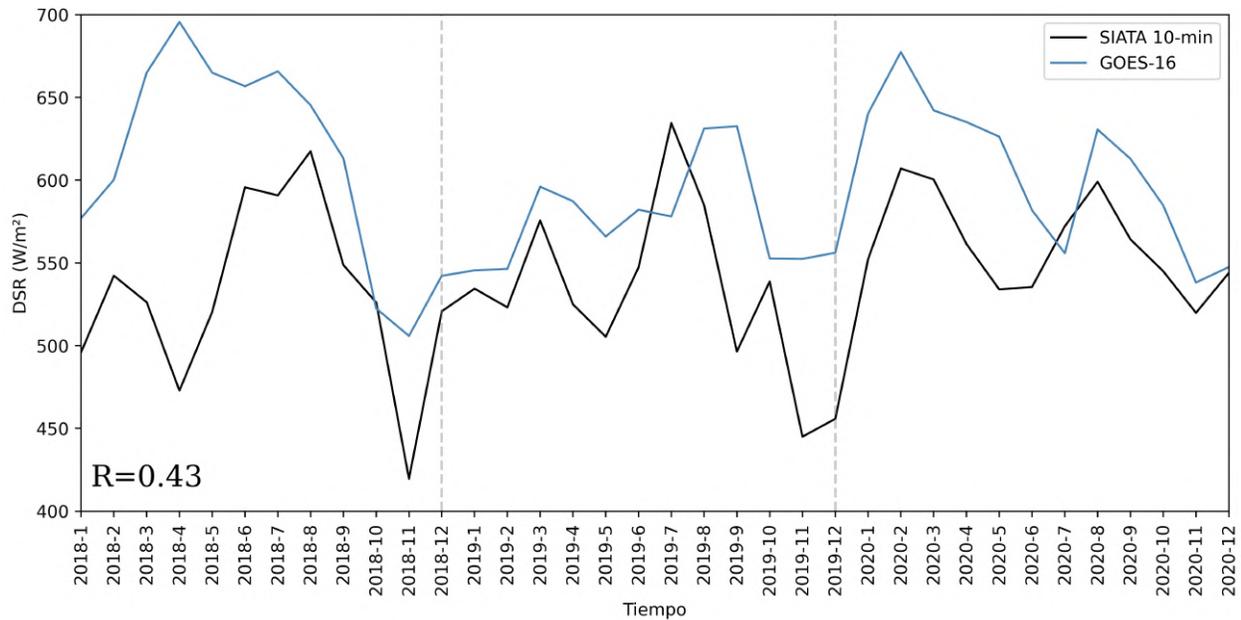


Figura 5.10: Serie de tiempo de los promedios mensuales de radiación solar en superficie para el Valle de Aburrá, a partir de las estimaciones derivadas de GOES-16 y las observaciones SIATA 10-min para el período 2018-2020.

Se resalta que los promedios mensuales de radiación solar en superficie derivados de GOES-16, presentan limitaciones para representar las magnitudes bajas en septiembre y noviembre. Por ejemplo, el promedio mensual de GOES-16 en septiembre de 2019 fue de 632.62 W/m^2 , en tanto que, para SIATA 10-min se obtuvo un valor de 496.47 W/m^2 . Para noviembre de 2018, se obtiene un promedio mensual de 505.87 W/m^2 para las estimaciones del satélite, mientras que para las observaciones de SIATA 10-min se obtiene un promedio de 419.53 W/m^2 . Asimismo, en noviembre de 2019, el promedio mensual de GOES-16 fue de 552.39 W/m^2 , mientras que para SIATA 10-min se obtiene un valor de aproximadamente 445 W/m^2 .

5.2.4. Energía solar diaria derivada de GOES-16

Las distribuciones mensuales de los promedios diarios de energía obtenidos a partir del GOES-16 y de SIATA 10-min son representadas a través de los diagramas de cajas y bigotes consignados en la Figura 5.11. La primera diferencia notable entre los valores diarios de energía provenientes del satélite y de las observaciones, es la prevalencia de magnitudes altas para las medianas de GOES-16 con respecto a SIATA en el período comprendido entre enero y junio, en el cual los valores de energía para el satélite se centran en magnitudes superiores a 5.3 kWh/m^2 , mientras que los valores centrales de la energía para SIATA 10-min oscilan entre 4.60 kWh/m^2 y 5.18 kWh/m^2 (Tabla 5.3). Específicamente se observa que, para la primera temporada húmeda del año, las diferencias en los valores centrales de las distribuciones del satélite y las observaciones son más marcadas con respecto a los meses restantes, debido a que en marzo, abril y mayo las medianas correspondientes a las estimaciones de GOES-16 tiene valores de 5.65 kWh/m^2 , 5.67 kWh/m^2 , 5.58 kWh/m^2 respectivamente, en tanto que las medianas para SIATA 10-min son de 4.93 kWh/m^2 , 4.60 kWh/m^2 , 4.63 kWh/m^2 . El comportamiento anteriormente descrito no se muestra en la segunda temporada de lluvias del año, debido a que para septiembre y octubre las magnitudes de las medianas

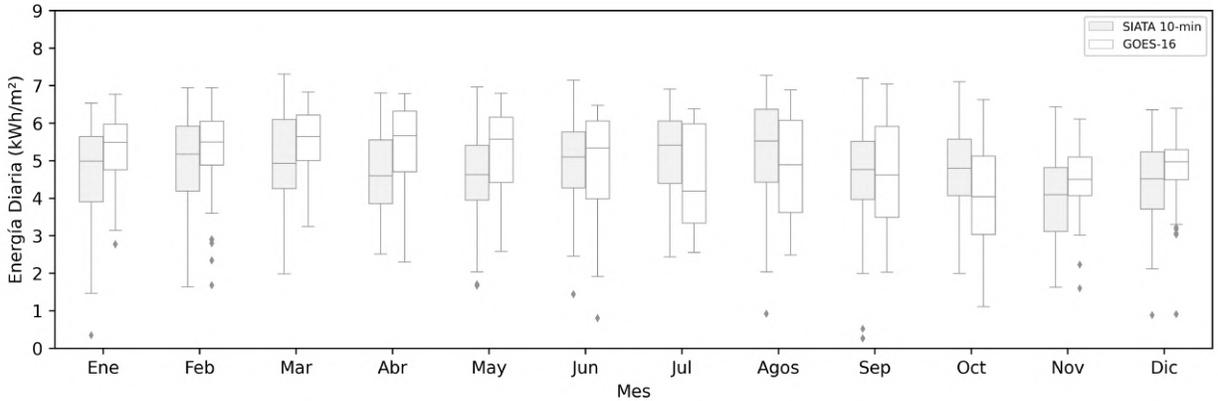


Figura 5.11: Distribución de la energía media diaria para las estimaciones derivadas del satélite GOES-16 y para las observaciones de SIATA 10-min, en el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.

correspondientes a SIATA 10-min son mayores que para GOES-16, esto puede deberse a diferencias en la estructura de los complejos de nubes en las diferentes épocas húmedas del año, siendo posible que en el segundo pico de lluvias es común la formación de sistemas convectivos de gran extensión de tal forma que su efecto sobre la radiación solar puede ser captado y sobreestimado por el satélite. En contraste, en marzo-abril-mayo pueden ser comunes los cielos con presencia de nubes cuya extensión es considerablemente menor a la resolución de las estimaciones del satélite, por lo que su influencia en el comportamiento de la radiación solar no es percibido completamente. No obstante, se plantea como consideración futura el estudio detallado del comportamiento y la variabilidad de los sistemas convectivos en el Valle de Aburrá, con el fin de establecer con mayor precisión su rol sobre la energía solar disponible. Adicionalmente, en la Figura 5.11 se puede observar que el producto ABI del satélite GOES-16 tiene limitaciones para representar la variabilidad de la energía solar en el área de estudio. Las distribuciones mensuales para meses como enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre muestran que aproximadamente el 75 % de los datos de energía estimados a partir de GOES-16 tienen magnitudes mayores a las medianas correspondientes a las distribuciones de la energía para SIATA 10-min. Asimismo, se observa que en junio, julio y agosto las distribuciones de la energía derivadas de SIATA 10-min están concentradas hacia las mayores magnitudes, mientras que las distribuciones relativas a la energía de GOES-16 presentan mayor concentración hacia las menores magnitudes de energía y su rango intercuartil es más amplio.

En la Figura 5.12 se presentan los diagramas de dispersión, así como las correlaciones de Pearson entre los valores de energía obtenidos a partir de GOES-16 y las observaciones. En términos generales se observa alta dispersión para los datos, presentándose una menor linealidad en abril, julio y septiembre al obtenerse coeficientes de correlación de Pearson de 0.12, 0.21 y 0.24, respectivamente. Por el contrario, en enero, febrero y noviembre se presenta mayor linealidad entre los valores de energía de GOES y las observaciones, obteniéndose coeficientes de correlación de Pearson de 0.64, 0.65 y 0.64, correspondientemente.

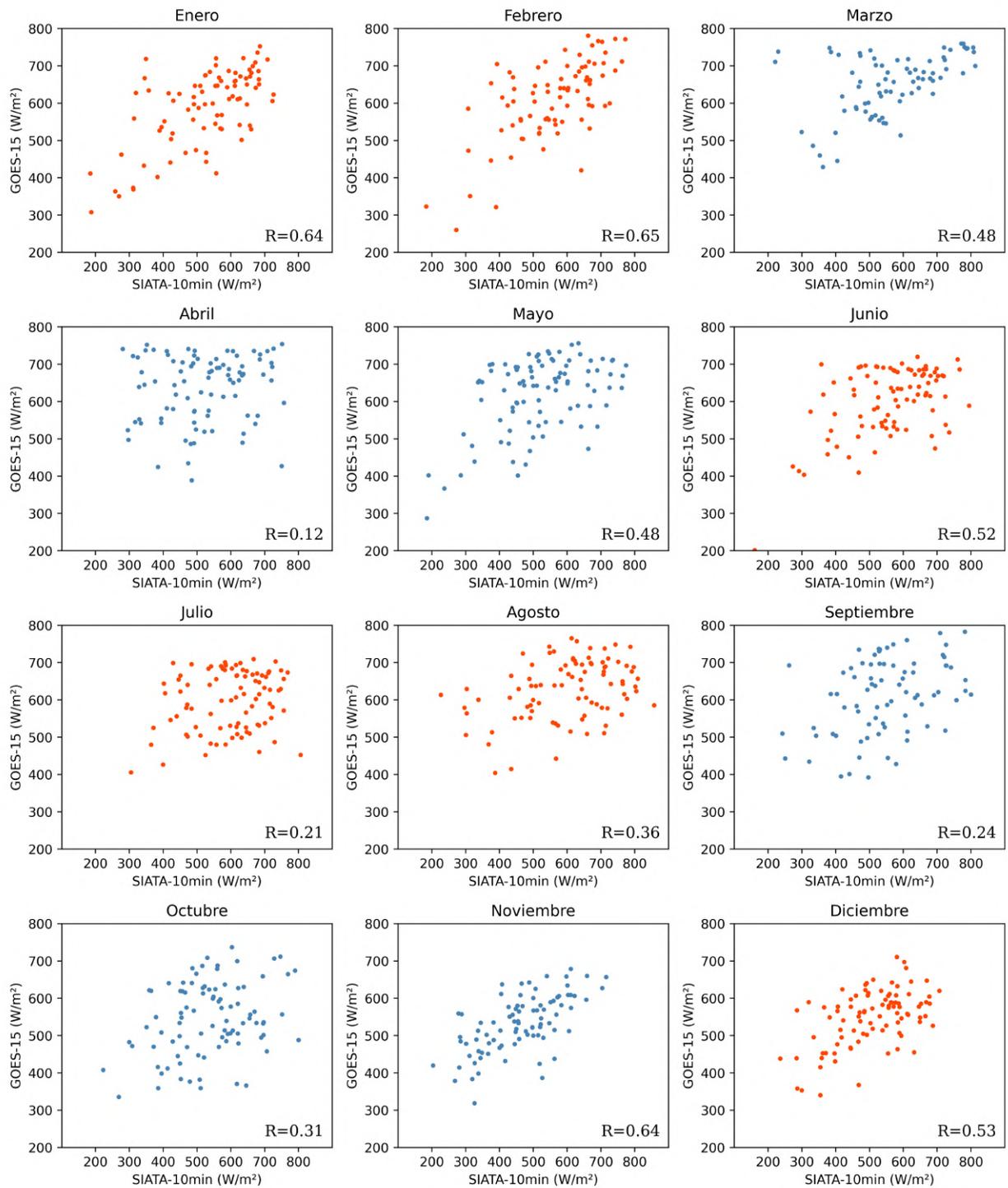


Figura 5.12: Correlación entre los promedios diarios de radiación solar derivados de GOES-16 y de las observaciones de SIATA 10-min, para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.

Tabla 5.3: Medianas de la energía media diaria de cada mes en el Valle de Aburrá, obtenida con base en las estimaciones de GOES-16 y las observaciones de SIATA-10min, para el período entre enero de 2018 y diciembre de 2020.

Mediana de energía diaria (kWh/m ² -día)		
Mes	GOES	SIATA
Enero	5.49	4.99
Febrero	5.5	5.18
Marzo	5.65	4.93
Abril	5.67	4.6
Mayo	5.58	4.63
Junio	5.35	5.1
Julio	4.19	5.42
Agosto	4.89	5.53
Septiembre	4.62	4.76
Octubre	4.05	4.8
Noviembre	4.51	4.1
Diciembre	4.97	4.52

5.2.5. Ciclo diario de la radiación solar proveniente de GOES-16

Los ciclos diarios multianuales en el área de estudio para las estimaciones de GOES-16 y para los promedios horarios de SIATA 10-min, son presentados en la Figura 5.13. Se observa que para ambos casos se forma una banda a lo largo del año entre las 10:00 LT y las 14:00 LT aproximadamente, correspondiente a las horas donde la radiación solar alcanza los valores más altos durante el día. Sin embargo, un primer contraste notable entre los ciclos diarios asociados a las estimaciones de GOES-16 y los correspondientes a las observaciones es la diferencia en las magnitudes entre dichas franjas, puesto que para las observaciones los valores máximos de radiación solar en el día oscilan entre 600 W/m² y 900 W/m², mientras que para GOES-16 las horas de mayor insolación en el día presentan, primordialmente, magnitudes entre 700 W/m² y 1000 W/m². Por otra parte, se observa que la banda de magnitudes altas alrededor del mediodía para GOES-16 es bastante uniforme (Figura 5.13.b), mientras que para los registros de SIATA 10-min la banda se hace más estrecha entre marzo-abril y

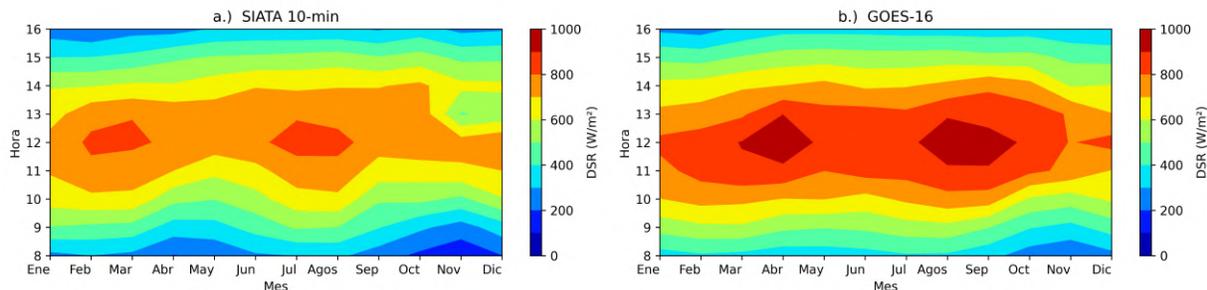


Figura 5.13: Evolución mensual de los ciclos diarios multianuales en el Valle de Aburrá, en el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020. a.) A la izquierda, para las estimaciones del satélite GOES-16 y su producto a bordo ABI. b.) A la derecha, para las observaciones de SIATA 10-min para el período 2018-2020.

octubre-noviembre-diciembre, períodos en los cuales típicamente se presentan menores intensidades de radiación solar en superficie, así como una consecuente reducción en la duración del día. Sin embargo, es posible notar que en octubre, noviembre y diciembre las estimaciones satelitales captan la disminución en la intensidad de la radiación durante las primeras horas del día, según lo observado en los registros de SIATA 10-min (Figura 5.13.a), aunque persisten las magnitudes superiores en la radiación derivada de GOES-16. Adicionalmente, la Figura 5.13.a muestra que en las observaciones los picos máximos de radiación solar por hora se presentan, típicamente, en febrero, marzo, julio y agosto al mediodía, al obtenerse valores de 816.88 W/m², 817.07 W/m², 837.82 W/m² y 836.07 W/m², respectivamente. Por su parte, en la Figura 5.13.b se observa que para GOES-16 se obtiene que, durante el año, los picos máximos de radiación solar por hora se presentan en marzo (904.61 W/m²), abril (950.80 W/m²), agosto (966.06 W/m²) y septiembre (943.44 W/m²), es decir, estos períodos se encuentran retrasados un mes respecto a los registros de SIATA 10-min.

5.2.6. Ciclo diurno de los errores asociados a GOES-16

En las figuras 5.14, 5.15, 5.16 y 5.28 se exhibe la variabilidad mensual de los ciclos diurnos correspondientes a los errores de la radiación solar en superficie, obtenidos a partir de las estimaciones del satélite GOES-16 y su producto a bordo ABI + L2 DSR para el píxel correspondiente al Valle de Aburrá, entre enero de 2018 y diciembre de 2020. Es posible observar que, en general, GOES-16 sobreestima los promedios horarios de radiación para todos los meses, siendo más marcados los sesgos en meses correspondientes a las temporadas húmedas del año. Específicamente, se obtiene que para meses como abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre se adquieren valores de MBE superiores a 200 W/m² alrededor del mediodía. En septiembre, los errores de sesgo medio entre las 11:00 LT y las 14:00 LT tienen magnitudes que oscilan entre 168 W/m² y 277 W/m², es decir, corresponden a sobreestimaciones en un rango entre el 21 % y el 47 %. En noviembre se aprecia una sobreestimación de aproximadamente 300 W/m² con respecto a las observaciones, que corresponde a un MBE del 61 %. Además, se muestra que GOES-16 subestima algunos promedios horarios de radiación solar durante las primeras horas del día para febrero, junio, octubre, noviembre y diciembre, sin embargo, las subestimaciones corresponden a porcentajes de error bajos que oscilan entre -0.10 % y -6 %.

La Figura 5.16 muestra que, en general, los valores mínimos de RMSE para todos los meses son superiores a 100 W/m² y en meses pertenecientes a las temporadas lluviosas del año, como septiembre y noviembre, los RMSE pueden alcanzar valores máximos cercanos a 400 W/m²; mientras que para los meses correspondientes a las temporadas secas, los valores máximos de RMSE usualmente son inferiores o cercanos 300 W/m², a excepción de agosto entre las 12:00 LT y las 13:00 LT y diciembre a las 11:00 LT. De acuerdo con la Figura 5.28, para el trimestre DEF se obtiene que los ciclos diurnos muestran valores de nRMSE entre el 20 % y 60 %, aproximadamente. Por su parte, la primera temporada de lluvias del año, MAM, presenta ciclos diurnos de nRMSE con valores mínimos cercanos al 30 %, mientras que los valores máximos de nRMSE tienen magnitudes aproximadas del 70 % para marzo, 105 % para abril y el 92 % para mayo. En el trimestre JJA, se observa que los ciclos diurnos de nRMSE tienen valores en el rango entre el 20 % y el 55 % aproximadamente. En SON, correspondiente al segundo pico de precipitaciones de la región de estudio, los ciclos diurnos nRMSE exhiben valores mínimos entre el 25 % y el 35 %, mientras que los valores máximos oscilan entre el 75 % y el 98 %. Se destaca que en la mayoría de los meses los porcentajes de RMSE más altos se presentan después del medio día, lo cual puede ser explicado, nuevamente, bajo el supuesto de que GOES-16 tiene limitaciones para representar la radiación solar en superficie bajo condiciones de alta nubosidad, puesto que el ciclo diurno de precipitaciones en

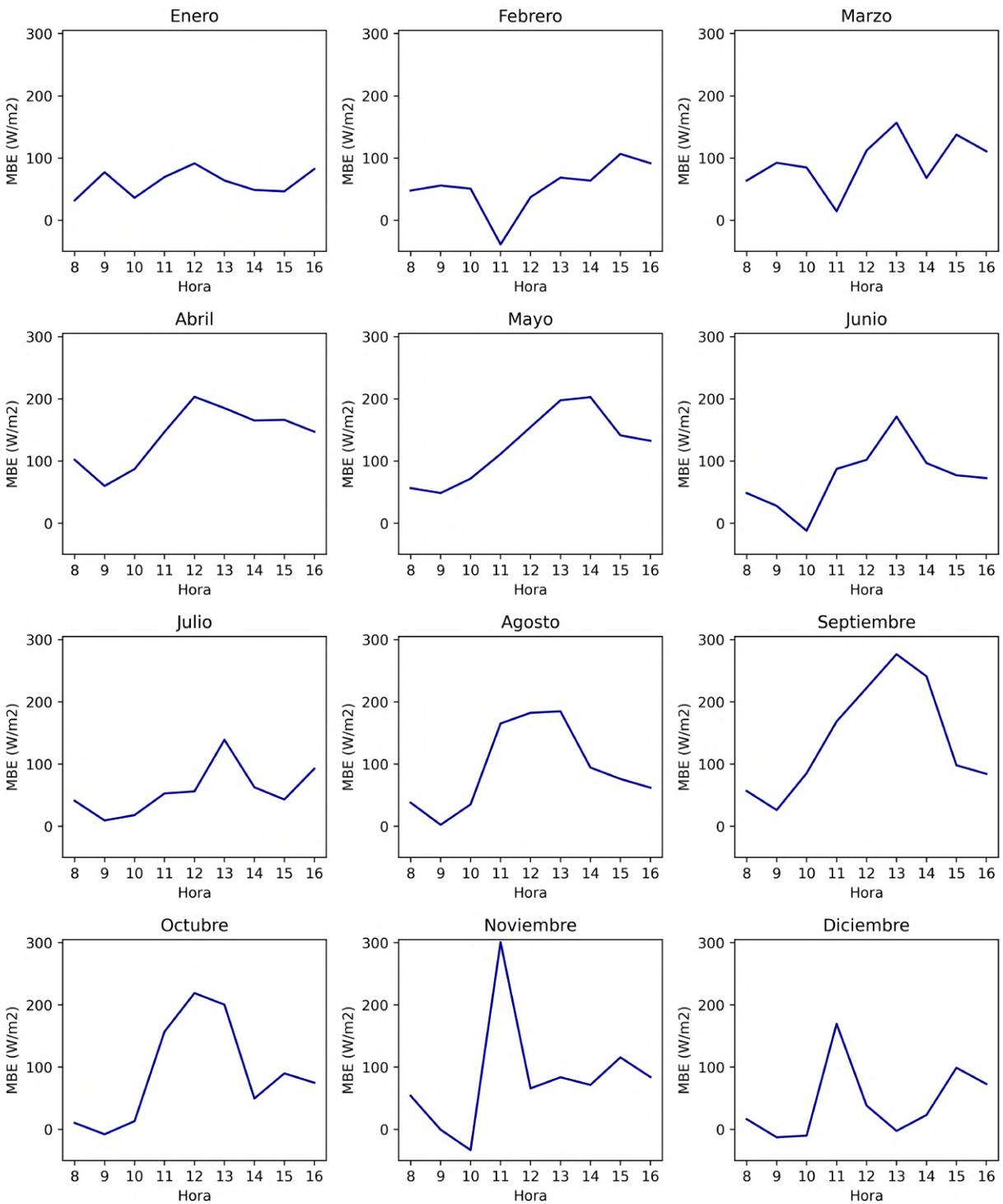


Figura 5.14: Ciclo diario de los Errores de Sesgo Medio (MBE) obtenidos para las estimaciones de GOES-16 en el Valle de Aburrá, para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020.

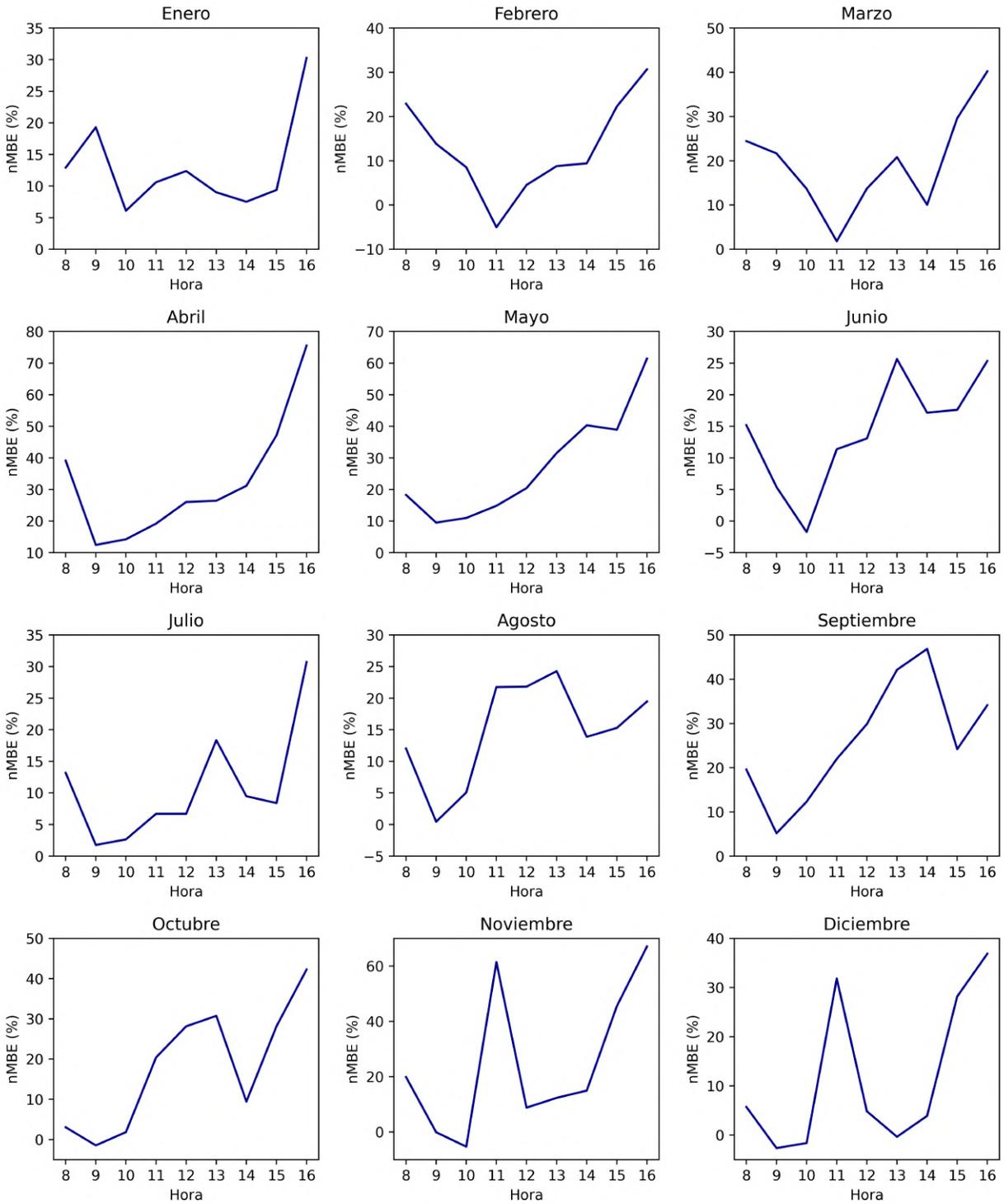


Figura 5.15: Ciclo diario de los Errores de Sesgo Medio normalizados (nMBE) obtenidos para las estimaciones de GOES-16 en el Valle de Aburrá, para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020.

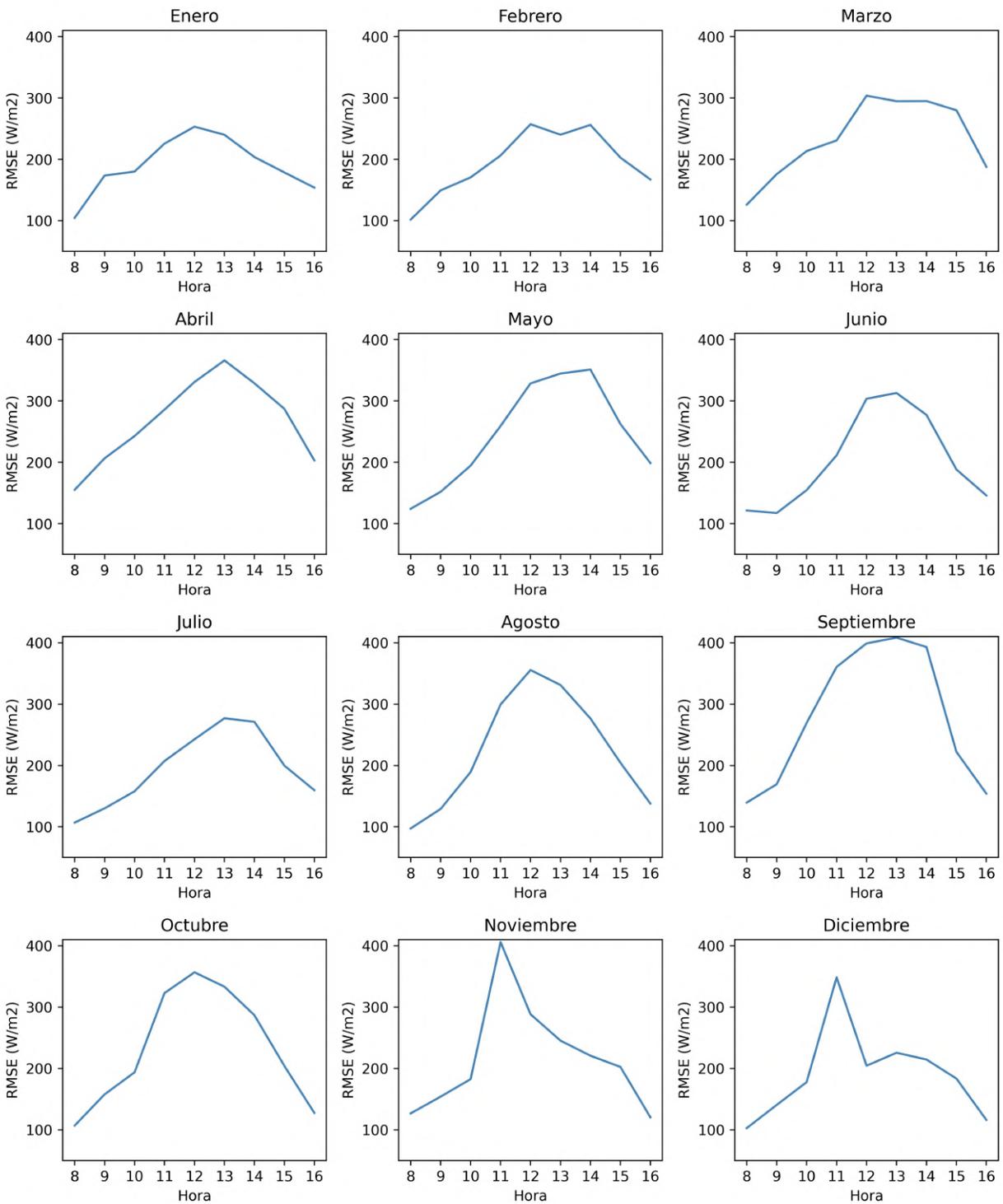


Figura 5.16: Ciclo diario de los Errores Cuadráticos Medios (RMSE), obtenidos para las estimaciones de GOES-16 en el Valle de Aburrá, para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020.

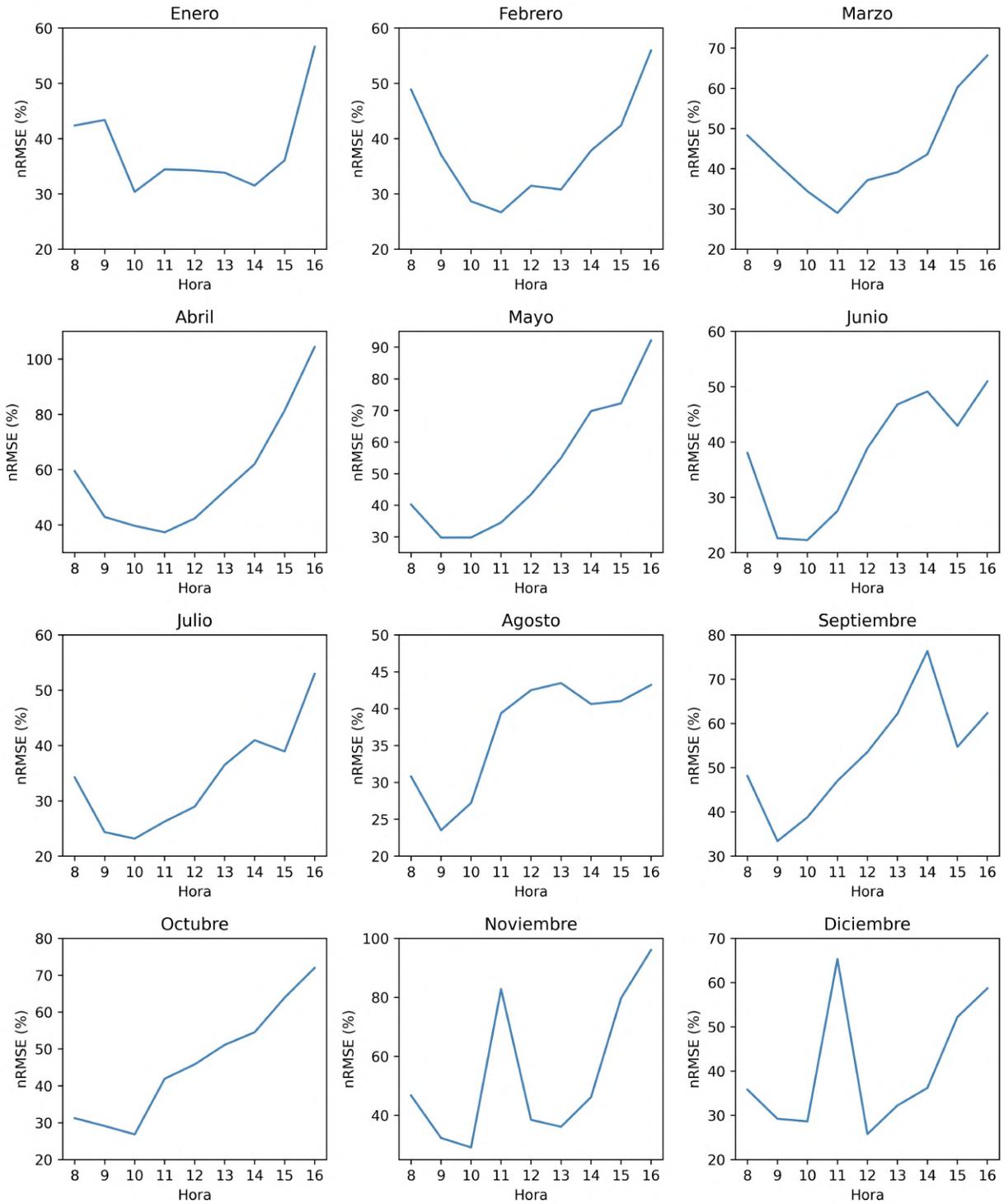


Figura 5.17: Ciclo diario de los Errores Cuadráticos Medios normalizados (RMSE), obtenidos para las estimaciones de GOES-16 en el Valle de Aburrá, para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020.

el Valle de Aburrá se caracteriza por presentar eventos de lluvia convectiva de alta intensidad y de corta duración en las tardes (14:00 LT-17:00LT) y precipitaciones estratiformes poco intensas pero de alta duración en las madrugadas (00:00 LT - 04:00 LT), mientras que en las mañanas se presentan los mínimos de precipitación.

5.2.7. Escala horaria de la radiación solar de GOES-16

Las distribuciones mensuales para los promedios horarios de irradiancia solar en superficie derivados del conjunto de datos de GOES-16 y de las observaciones de SIATA, son presentados en la Figura 5.18. Un primer contraste entre los promedios horarios correspondientes a GOES-16 y los obtenidos a partir de las observaciones consiste en que, para todos los meses, los valores de radiación solar con magnitudes en el rango entre 0 W/m^2 - 200 W/m^2 y superiores a 1000 W/m^2 se presentan con mayor frecuencia para el conjunto de datos correspondiente a SIATA 10-min en comparación con las estimaciones de GOES-16. Específicamente, se observa que la diferencia entre las frecuencias de SIATA 10-min y GOES-16 para valores bajos es más pronunciada en meses como marzo, abril, mayo, octubre y noviembre, pertenecientes a las temporadas húmedas del Valle de Aburrá; mientras que las frecuencias para valores altos de radiación de ambos conjuntos, divergen de forma notable en julio y agosto, meses que hacen parte de la segunda temporada seca del Valle de Aburrá en la cual, típicamente, se presentan valores altos de radiación solar. Lo anterior sugiere que las estimaciones derivadas de GOES-16 y su producto ABI L2+DSR, no reproducen bien los valores extremos para los promedios horarios de irradiancia solar. Por otra parte, se muestra que las distribuciones de los promedios horarios para GOES-16 presentan altas frecuencias para los valores de radiación solar comprendidos en el rango entre 300 W/m^2 y 900 W/m^2 para todos los meses, es decir, la concentración de los datos no varía de forma abrupta a lo largo del año. En contraste, las distribuciones para los promedios horarios de las observaciones de SIATA 10-min presentan diversos cambios durante año, por ejemplo, en marzo, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre se observa una concentración de los datos hacia los valores con magnitudes bajas, principalmente en el rango entre 0 W/m^2 y 500 W/m^2 ; mientras que en meses como enero, febrero y septiembre se presentan con frecuencia tanto valores altos como valores bajos de radiación solar en superficie.

En la Tabla 5.4 se encuentra consignados los coeficientes de correlación de Pearson entre las anomalías horarias de SIATA 10-min y las correspondientes a GOES-16, en el período de estudio para el Valle de Aburrá. Se obtiene que para el primer año de registros de GOES-16, la representación de la variabilidad horaria con respecto a las observaciones es baja, al encontrarse coeficientes de correlación menores al 50 % durante todo el año e incluso se obtienen valores cercanos a cero en abril, mayo y junio. Se destaca que, en junio de 2018, la correlación fue de -0.003 indicando que el comportamiento y el signo de las fluctuaciones de las observaciones no fue bien reproducido por las estimaciones de GOES-16. Para 2019, se obtienen correlaciones superiores a 0.3 para todos los meses, excepto septiembre, mejorando la representación de la variabilidad horaria en la mayoría de los meses con respecto al año anterior. En 2019 se encuentran correlaciones de Pearson sustanciales entre las anomalías de SIATA 10-min y las correspondientes al producto de GOES-16, al obtenerse valores superiores a 0.4 para todos los meses, así mismo, GOES-16 aumenta la representación de la variabilidad horaria de la radiación solar con respecto a los años anteriores de estudio.

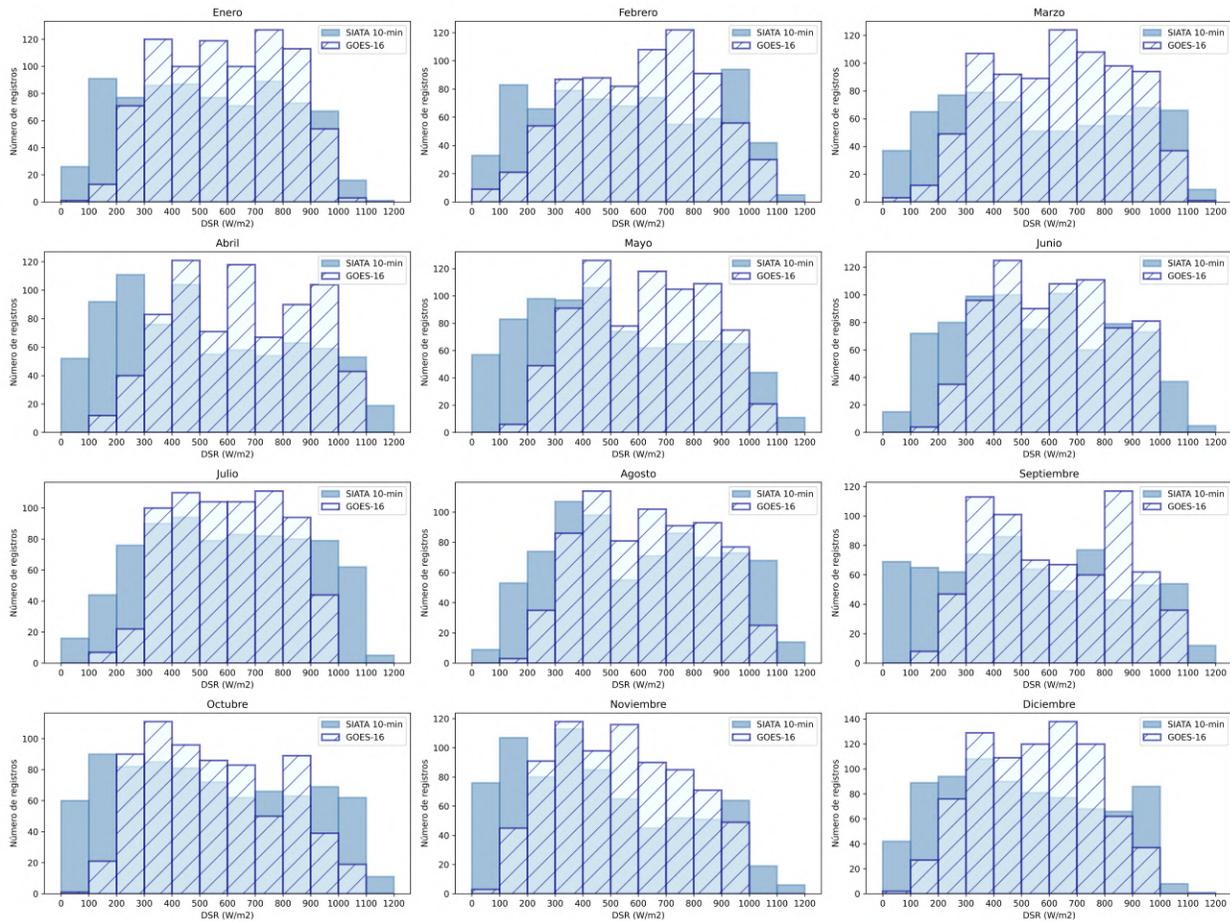


Figura 5.18: Histogramas mensuales de los promedios horarios de radiación solar en el Valle de Aburra, obtenidos a partir de las estimaciones ABI L2+DSR de GOES-16 y de los registros de SIATA , para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020.

Tabla 5.4: Coeficiente de correlación de Pearson entre las anomalías horarias de radiación solar obtenidas para las observaciones de SIATA 10-min y las estimaciones del producto ABI L2+DSR de GOES-16, para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020 en el Valle de Aburrá. Las correlaciones resaltadas en negrilla son estadísticamente significativas con un nivel de la prueba de 0.01.

Correlación de Pearson			
Mes	2018	2019	2020
Enero	0.25	0.62	0.67
Febrero	0.39	0.58	0.54
Marzo	0.23	0.51	0.67
Abril	0.15	0.33	0.57
Mayo	0.00	0.50	0.55
Junio	0.09	0.36	0.59
Julio	0.22	0.33	0.52
Agosto	0.37	0.40	0.41
Septiembre	0.46	0.13	0.57
Octubre	0.45	0.37	0.50
Noviembre	0.39	0.49	0.58
Diciembre	0.45	0.40	0.43

5.3. Descripción y evaluación de la radiación solar proveniente del reanálisis ERA5

5.3.1. Ciclo Anual de la radiación solar proveniente del reanálisis ERA5

En la Figura 5.19 se presenta el ciclo anual correspondiente a la radiación solar en el Valle de Aburrá derivada del reanálisis ERA5, así como el ciclo anual asociado a las observaciones de SIATA, para el período de estudio. De acuerdo con las estimaciones del reanálisis ERA5, la radiación solar en el área de estudio comienza a aumentar en enero, alcanzando su primer valor máximo del año en febrero al obtenerse un promedio mensual multianual de 442.53 W/m^2 . En marzo, los valores de radiación solar comienzan a reducirse progresivamente hasta mayo, mes en el cual se alcanza el primer mínimo con un promedio mensual multianual de 419.31 W/m^2 . En junio, la radiación comienza a incrementar nuevamente en magnitud alcanzando su segundo valor máximo en agosto con un promedio multianual de 520.77 W/m^2 . Posteriormente, los valores de radiación disminuyen y se obtiene el segundo mínimo en noviembre cuyo promedio mensual multianual es de 362 W/m^2 .

En términos generales, ERA5 capta el carácter bimodal de la radiación solar en superficie descrito por las observaciones al mostrar los diferentes períodos que, típicamente, tienen altas o bajas magnitudes de radiación solar. Así mismo se encuentra un coeficiente de correlación sustancial de 0.75 entre el ciclo anual de SIATA y ERA5, cuya magnitud es superior al coeficiente de correlación encontrado entre el ciclo anual de GOES-16 y las observaciones (0.61, ver Figura 5.8). Sin embargo, se muestran diferencias importantes entre las magnitudes de ERA5 y SIATA. Específicamente, en meses como enero, febrero, octubre y noviembre los promedios mensuales multianuales de ERA5 presentan magnitudes menores que las calculadas a partir de los registros de SIATA, mientras que en los meses restantes los valores de radiación solar son mayores para ERA5 que para las observaciones, siendo más notables las diferencias durante junio, julio, agosto y septiembre.

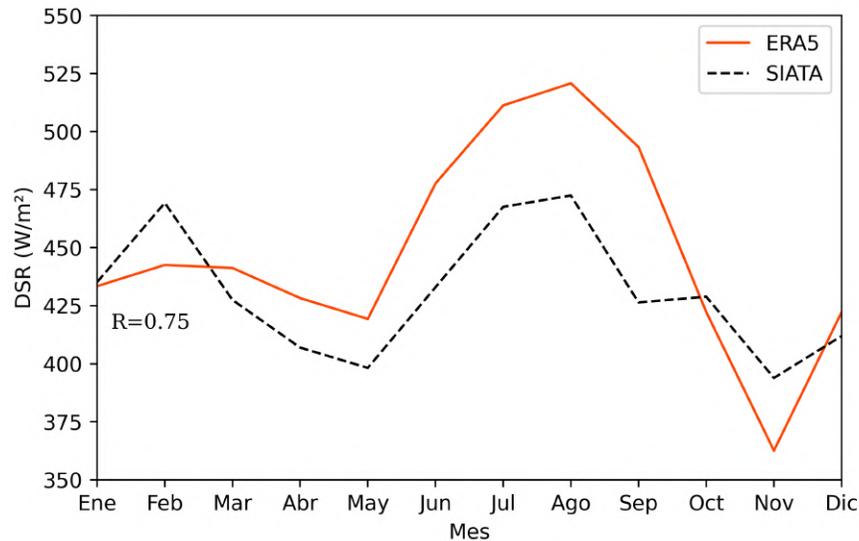


Figura 5.19: Ciclo anual de la radiación solar en el Valle de Aburrá a partir del conjunto de datos del reanálisis ERA5 y de los registros de SIATA, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020.

5.3.2. Ciclo anual de los errores asociados a ERA5

En la Figura 5.20 se presentan los ciclos anuales para los errores asociados a las estimaciones de radiación solar del reanálisis ERA5 en el Valle de Aburrá, para el período desde enero de 2017 hasta diciembre de 2020. Las Figuras 5.20.a y 5.20.b muestran que, en promedio, el reanálisis ERA5 tiende a sobreestimar los valores de radiación para todos los meses, exceptuando a noviembre al obtenerse un MBE de -5.25 W/m^2 . Las sobreestimaciones más marcadas se presentan en junio con un MBE de 44.94 W/m^2 (10.37%), en julio con un MBE de 40.70 W/m^2 (8.70%), en agosto con un MBE de 45.15 W/m^2 (9.56%) y en septiembre, siendo este último el mes con el mayor sesgo al encontrarse un valor de 73.71 W/m^2 que corresponde a un nMBE de aproximadamente el 17%. En las Figuras 5.20.c y 5.20.d se observa que, en promedio, los RMSE tienen magnitudes superiores a 150 W/m^2 para todos los meses, en ese sentido, los errores con valores más bajos de ERA5 tienen magnitudes superiores a las encontradas para GOES-16 (Figura 5.9); sin embargo, los promedios mensuales de RMSE para ERA5 no exceden los 220 W/m^2 , mientras que para GOES-16 se encuentran magnitudes de hasta 280 W/m^2 aproximadamente. Adicionalmente, se muestra que los valores de nRMSE aumentan su magnitud durante los trimestres MAM y SON correspondientes a las temporadas de altas precipitaciones en el área de estudio, en contraste, los nRMSE disminuyen en los trimestres DEF y JJA. Específicamente, se encuentra que en MAM los valores de nRMSE oscilan entre 45% - 47%, y durante SON oscilan entre 45%-52%; mientras que, en DEF y JJA los errores son inferiores al 41% para todos los meses. Septiembre es el mes donde el reanálisis tiene un desempeño más bajo al encontrarse un nRMSE asociado del 51.62%, mientras que julio es el mes en el cual ERA5 se desempeña mejor puesto que su nRMSE es de 34.48%. Se destaca que los valores para el ciclo anual de nMBE de ERA5 son bajos, incluso con magnitudes cercanas a cero como en el caso de febrero y noviembre, sin embargo, las magnitudes de nRMSE son altas indicando que ERA5 presenta tanto sobreestimaciones como subestimaciones de la radiación solar, lo cual puede representar una desventaja al momento de buscar un ajuste de los datos con respecto al comportamiento de la radiación solar proveniente de las observaciones.

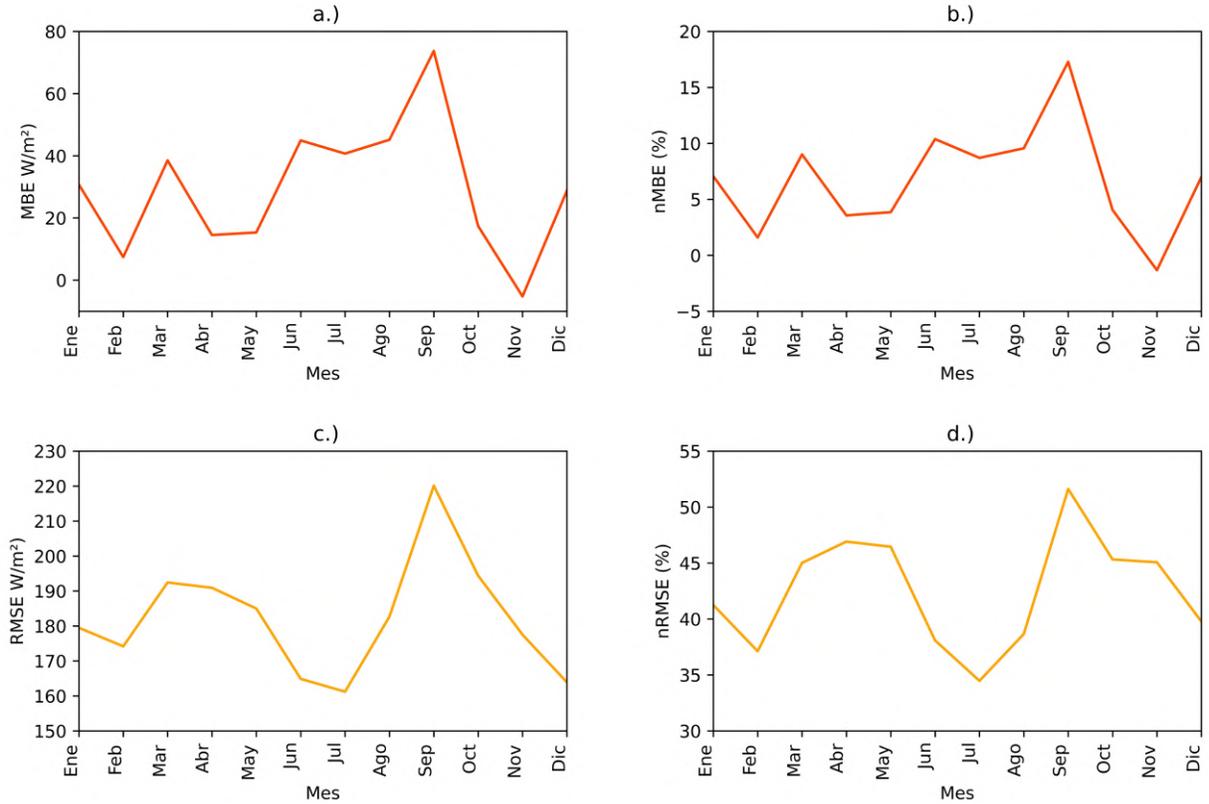


Figura 5.20: Ciclo anual de los errores para las estimaciones de radiación solar en el Valle de Aburra, derivadas del reanálisis ERA5, en el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020. a.) Error de sesgo medio (MBE). b.) Error de sesgo medio estandarizado (nMBE). c.) Error Cuadrático Medio (RMSE). (d.) Error Cuadrático Medio estandarizado (nRMSE)

5.3.3. Promedios mensuales de la radiación solar del reanálisis ERA5

En la Figura 5.21 se exhibe el comportamiento de los promedios mensuales de radiación solar para ERA5 y se contrasta con los registros de SIATA. En primera instancia, se encuentra que la correlación de Pearson equivalente a 0.63, sugiriendo una relación sustancial entre los promedios mensuales de ERA5 y SIATA, a su vez este valor es superior al encontrado para la correlación entre GOES-16 y las observaciones (Figura 5.10). Además, se muestra que ERA5 capta frecuentemente los patrones de aumento y disminución de la radiación solar en superficie en el Valle de Aburrá durante el período de estudio, no obstante, existen diferencias notables entre las magnitudes de los promedios mensuales correspondientes a ERA5 con respecto a las observaciones, específicamente, ERA5 presenta valores de radiación solar mayores que las observaciones en meses como junio, julio y agosto de los primeros de tres años de análisis, alcanzando magnitudes cercanas a 550 W/m^2 , mientras que los valores de radiación solar de SIATA no superan los 500 W/m^2 . Igualmente se destaca que para todos los noviembre de la serie de tiempo, ERA5 presenta valores mensuales de radiación solar inferiores con respecto a las observaciones, encontrándose que la menor subestimación para el mes de noviembre se presenta en 2019 debido a que el valor medio para ERA5 corresponde a 381.95 W/m^2 y para SIATA corresponde a 386.85 W/m^2 .

Además, es posible observar que en 2019 ERA5 mejora la representación de los promedios

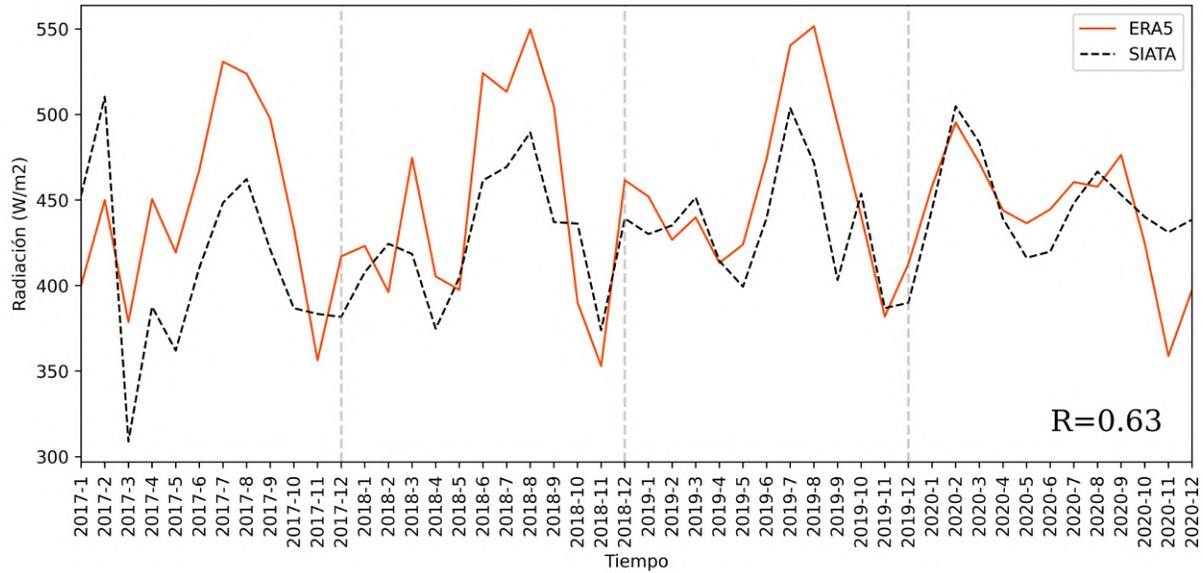


Figura 5.21: Serie de tiempo de los promedios mensuales de radiación solar en superficie en el Valle de Aburrá para los registros de SIATA y para las estimaciones derivadas del reanálisis ERA5 durante el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020.

mensuales en el primer semestre del año en relación con 2017 y 2018, teniendo en cuenta que ERA5 exhibe un patrón que capta de forma menos sesgada tanto las magnitudes como la variabilidad de la radiación solar que alcanza la superficie del Valle de Aburrá. Igualmente, se observa que en el año 2020 las discrepancias entre las magnitudes de la radiación solar de ambos conjuntos de datos no son tan marcadas con respecto a los años anteriores, principalmente durante la segunda temporada seca en donde las estimaciones de ERA5 muestran promedios de 444.60 W/m^2 , 460.51 W/m^2 y 457.82 W/m^2 para junio, julio y agosto respectivamente, mientras que para SIATA se obtienen valores de 419.87 W/m^2 , 448.24 W/m^2 y 466.61 W/m^2 .

5.3.4. Escala diaria de la radiación solar del reanálisis ERA5

De acuerdo con la Figura 5.22 y la Tabla 5.5, las distribuciones de la energía diaria de ERA5 se centran en valores superiores a los asociados a SIATA, encontrándose que esta diferencia entre las medianas es menor en noviembre puesto que se obtienen valores de 4.39 kWh/m^2 para ERA5 y 4.38 kWh/m^2 para SIATA, y en febrero al obtenerse medianas de 5.35 kWh/m^2 para ERA5 y 5.32 kWh/m^2 para SIATA. Para noviembre, también se destaca que ERA5 y SIATA presentan concentraciones similares para el 50% de los valores de energía más cercanos a la medianas (es decir, los valores que comprenden la caja), e igualmente la longitud de los bigotes no diverge de forma importante, exceptuando que ERA5 registra valores atípicos con magnitudes cercanas a 1 kWh/m^2 . Adicionalmente, se observa que en junio, julio, agosto y septiembre el reanálisis sobreestima de forma importante los valores de energía al obtenerse que aproximadamente el 75% de los datos de energía diaria provenientes de ERA5 presentan magnitudes superiores a las medianas correspondientes a las distribuciones asociadas a SIATA, igualmente se muestra que los bigotes inferiores son más cortos a los obtenidos para las distribuciones de SIATA en dichos meses, indicando que el 25% de los valores más bajos de energía correspondientes a ERA5 tienen magnitudes superiores y menor variabilidad con respecto a las observaciones. En marzo se observa que las dis-

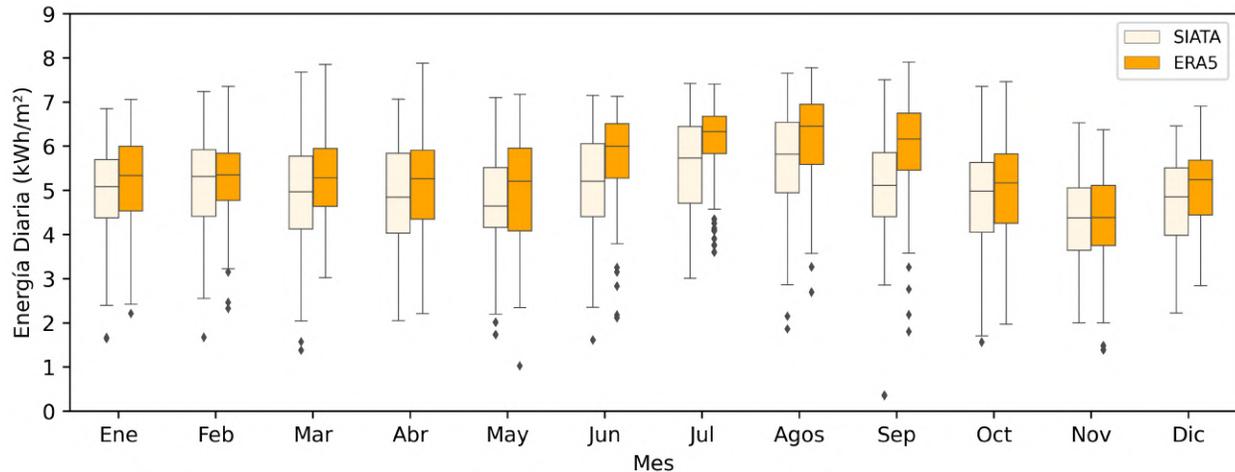


Figura 5.22: Distribución de la energía media diaria para las estimaciones derivadas del reanálisis ERA5 y para los registros de SIATA, en el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.

tribuciones de la energía para ERA5 se concentran hacia valores más altos que las observaciones, obteniéndose también que los valores mínimos para ERA5 pueden alcanzar valores ligeramente inferiores a 3 kWh/m^2 mientras que los valores mínimos para SIATA pueden ser menor a 2 kWh/m^2 . En abril, también se observa una distribución para ERA5 concentrada hacia valores más altos que SIATA, obteniéndose la energía derivada del reanálisis pueden alcanzar valores máximos cercanos a 8 kWh/m^2 mientras que los valores máximos de SIATA pueden alcanzar magnitudes cercanas a 7 kWh/m^2 .

En la Figura 5.23 se muestran los diagramas de dispersión mensuales para los promedios diarios de radiación solar en superficie de ERA5 y SIATA, así como los coeficientes de correlación entre ambos conjuntos de datos. Se observa que las mayores correlaciones de Pearson se presentan en marzo, junio y octubre con coeficientes equivalentes a 0.7, 0.68 y 0.6, respectivamente. En septiembre, abril y agosto se observa alta dispersión de los datos, siendo estos meses los que presentan las menores correlaciones de Pearson al obtenerse coeficientes de 0.39, 0.44 y 0.46 respectivamente. Se resalta que ERA5 presenta mejores coeficientes de correlación de Pearson frente a GOES-16 para todos meses correspondientes a las temporadas húmedas del año, exceptuando a noviembre donde GOES-16 presenta una correlación importante con las observaciones (Figura 5.12).

5.3.5. Ciclo diurno para la radiación solar de ERA5

En la Figura 5.24 se presenta la variabilidad mensual de los ciclos diurnos de la radiación solar sobre la superficie terrestre del Valle de Aburrá, calculados a partir de las estimaciones del reanálisis ERA5 para cuatro años de estudio. De acuerdo con las estimaciones de ERA5, los valores de radiación solar mayores que 300 W/m^2 se comienzan a presentar, generalmente, entre las 8:00 LT y las 9:00 LT; en las siguientes horas, la radiación continúa incrementando sus magnitudes alcanzando valores máximos que oscilan entre 700 W/m^2 y 1000 W/m^2 en el rango horario de las 11:00 LT y las 14:00 LT, luego la radiación solar comienza a disminuir progresivamente hasta alcanzar valores entre 100 W/m^2 y 0 W/m^2 alrededor de las 18:00 LT. Teniendo en cuenta lo anterior, ERA5 capta en términos generales la variabilidad diurna de la radiación solar en el área de estudio, al identificar

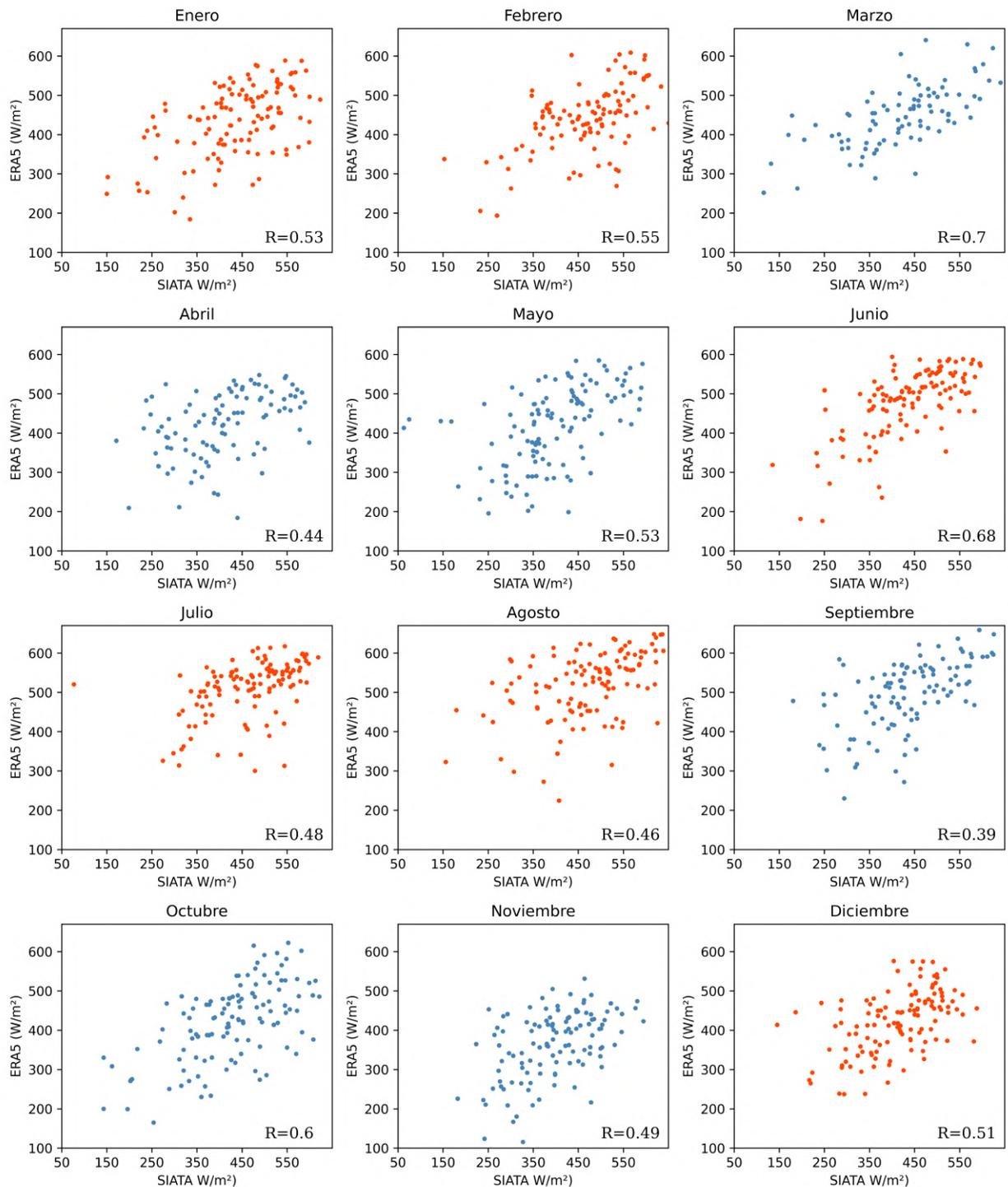


Figura 5.23: Correlación entre los promedios diarios de radiación solar derivados del reanálisis ERA5 y las observaciones de SIATA, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.

Tabla 5.5: Medianas de la energía media diaria de cada mes obtenida con base en las estimaciones de ERA5 y los registros de SIATA, para los diferentes años de estudio.

Energía diaria (kWh/m² -día)		
Mes	ERA5	SIATA
Enero	5.34	5.09
Febrero	5.35	5.32
Marzo	5.29	4.97
Abril	5.27	4.85
Mayo	5.21	4.65
Junio	6	5.21
Julio	6.34	5.74
Agosto	6.45	5.82
Septiembre	6.17	5.12
Octubre	5.17	4.98
Noviembre	4.39	4.38
Diciembre	5.24	4.86

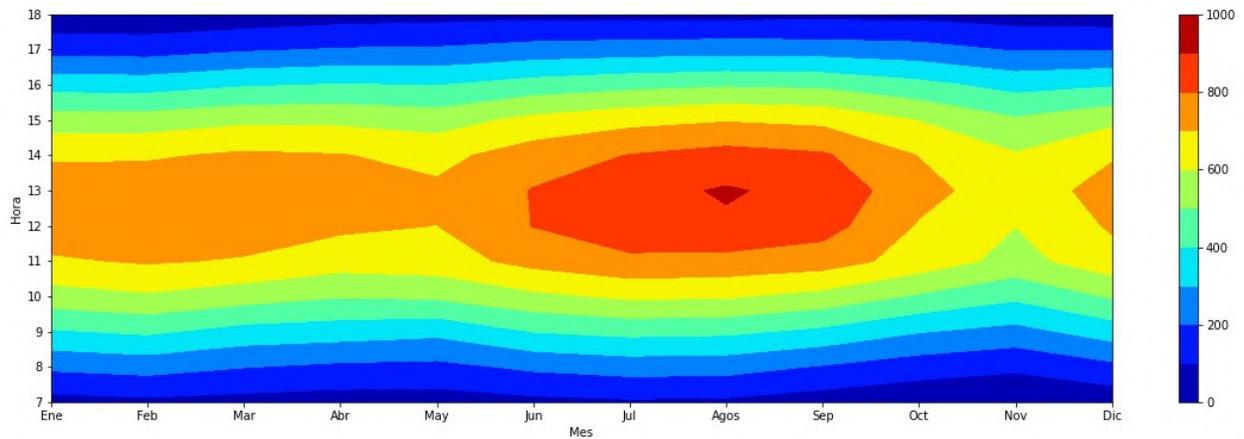


Figura 5.24: Evolución mensual de los ciclos diurnos multianuales en el Valle de Aburrá, obtenidos a partir de las estimaciones de ERA5 en el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020.

los crecimientos, decrecimientos, así como las franjas horarias de máxima radiación como se muestra en las observaciones, sin embargo, las magnitudes de la radiación son frecuentemente mayores que las obtenidas a partir de los registros de SIATA (Figura 5.4). Respecto a la variabilidad mensual, se observa que ERA5 identifica los valores altos de radiación solar que típicamente se presentan en el trimestre JJA, sin embargo, sus magnitudes al mediodía son superiores en comparación con las observaciones puesto que para SIATA los valores máximos oscilan entre 600 W/m^2 y 900 W/m^2 en ese trimestre, mientras que en ERA5 se alcanzan valores máximos entre 700 W/m^2 y 1000 W/m^2 . De igual forma, se muestra que ERA5 extiende la temporada de valores altos de radiación de JJA hasta septiembre, presentándose en este último valores de radiación solar mayores que 800 W/m^2 al mediodía.

En el trimestre DEF, correspondiente a la primera temporada seca del año, se observa que ERA5 no representa adecuadamente los valores altos de radiación solar al mediodía, principalmente en febrero, debido a que se estiman valores de radiación que oscilan entre 700 W/m^2 y 800 W/m^2 al medio día, mientras que las observaciones muestran valores superiores a 800 W/m^2 . Por otra parte, se destaca que ERA5 representa adecuadamente la disminución en la intensidad de la radiación, así como en la duración del día para los períodos abril-mayo y octubre-noviembre, al exhibir un estrechamiento de la banda de máximas magnitudes al mediodía, así como los valores bajos en las mañanas y al finalizar la tarde.

5.3.6. Ciclo diurno de los errores asociados a ERA5

De acuerdo con los ciclos diurnos asociados a los valores de MBE (Figura 5.25), ERA5 presenta tanto sesgos positivos como negativos, dado que se obtienen sobreestimaciones de hasta 150 W/m^2 como en los casos de enero a las 12:00 LT y de septiembre a las 14:00 LT; e igualmente, se obtienen MBE negativos que pueden alcanzar valores de hasta -103 W/m^2 como el promedio por hora para noviembre a las 13:00 LT. En adición, la Figura 5.26 muestra que es más común encontrar los mayores porcentajes de sobreestimación antes y después de las horas de máxima radiación (11:00 LT – 14:00 LT), mientras que alrededor del mediodía se presentan, generalmente, valores de nMBE menores al 10 % que, incluso, pueden llegar a ser subestimaciones de hasta el -10 % como se obtiene para las 13:00 LT de febrero, abril y diciembre. En meses como enero, febrero, mayo, junio, agosto y octubre las sobreestimaciones máximas presentan valores cercanos o inferiores al 30 %; mientras que en marzo, abril y diciembre los valores máximos de nMBE son cercanos al 40 % y, en los meses restantes las mayores sobreestimaciones son superiores al 50 % y alcanzan valores de hasta el 150 % como en noviembre a las 18:00 LT.

En la Figura 5.27 se muestra que los valores mínimos de RMSE tienen magnitudes que oscilan entre los 10 W/m^2 y 50 W/m^2 , y se presentan en las franjas horarias comprendidas entre las 7:00 LT y las 8:00 LT y entre las 17:00 y las 18:00 LT, en contraste, los valores máximos de RMSE son mayores a 200 W/m^2 y se presentan alrededor del mediodía. El ciclo diurno de RMSE para septiembre presenta altos promedios por hora, destacándose que a las 13:00 LT los errores pueden tener magnitudes de hasta 350 W/m^2 , por el contrario, en julio y diciembre se tienen valores máximos de RMSE inferiores a 250 W/m^2 . Los valores de nRMSE (Figura ??) muestran que en el rango horario comprendido entre las 9:00 LT y las 16:00 LT, la mayor parte de los valores de RMSE para las temporadas secas representan porcentajes mayores que el 25 % e inferiores al 50 %; mientras que para los meses correspondientes a las temporadas húmedas los errores oscilan entre el 30 % y el 57 %, para la misma franja horaria. En las horas restantes, los valores de nRSME generalmente son mayores que el 60 % e incluso pueden alcanzar magnitudes del 104 % como a las 7:00 LT de

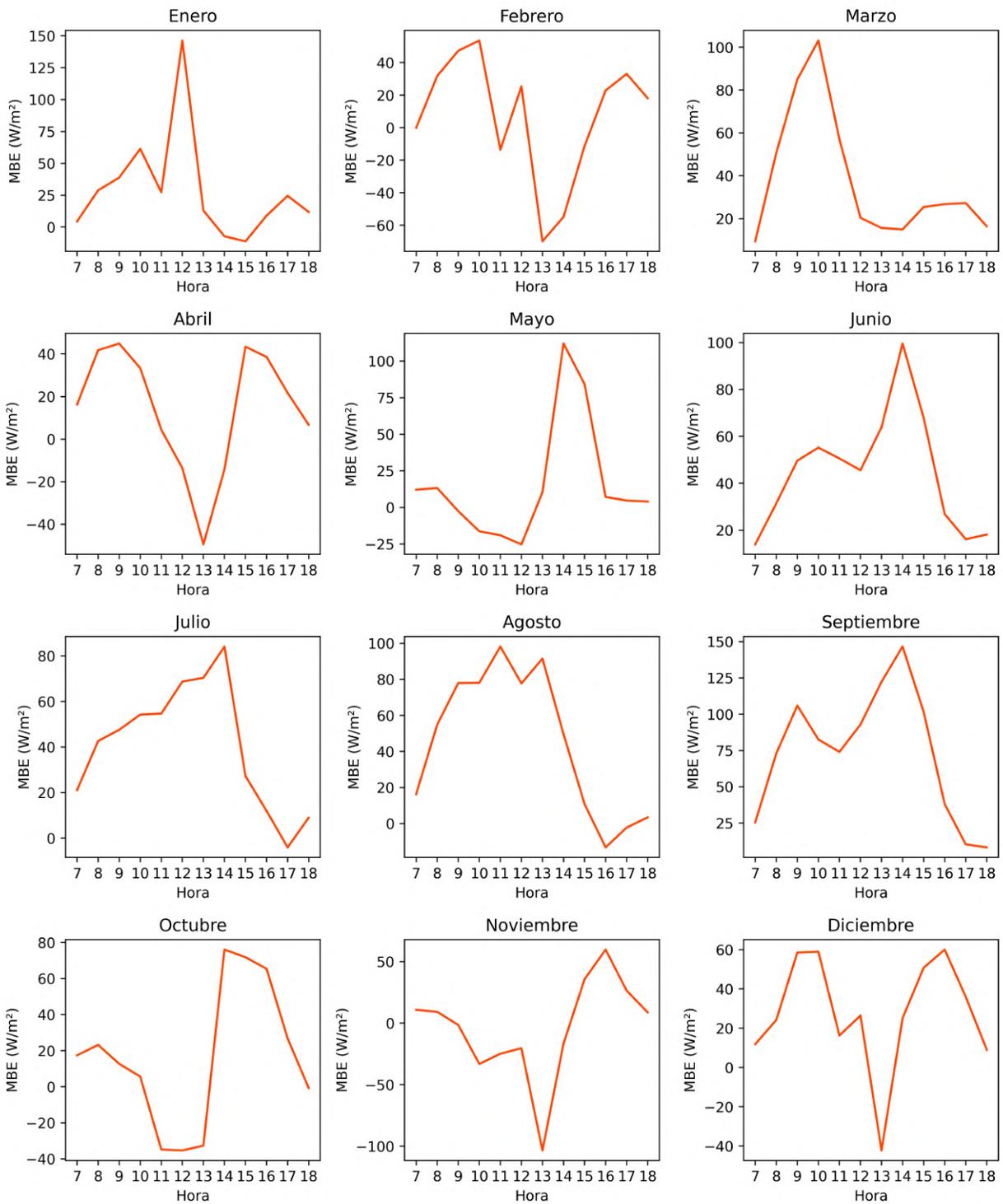


Figura 5.25: Ciclo diario de los Errores de Sesgo Medio (MBE) asociado a las estimaciones del reanálisis ERA5, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.

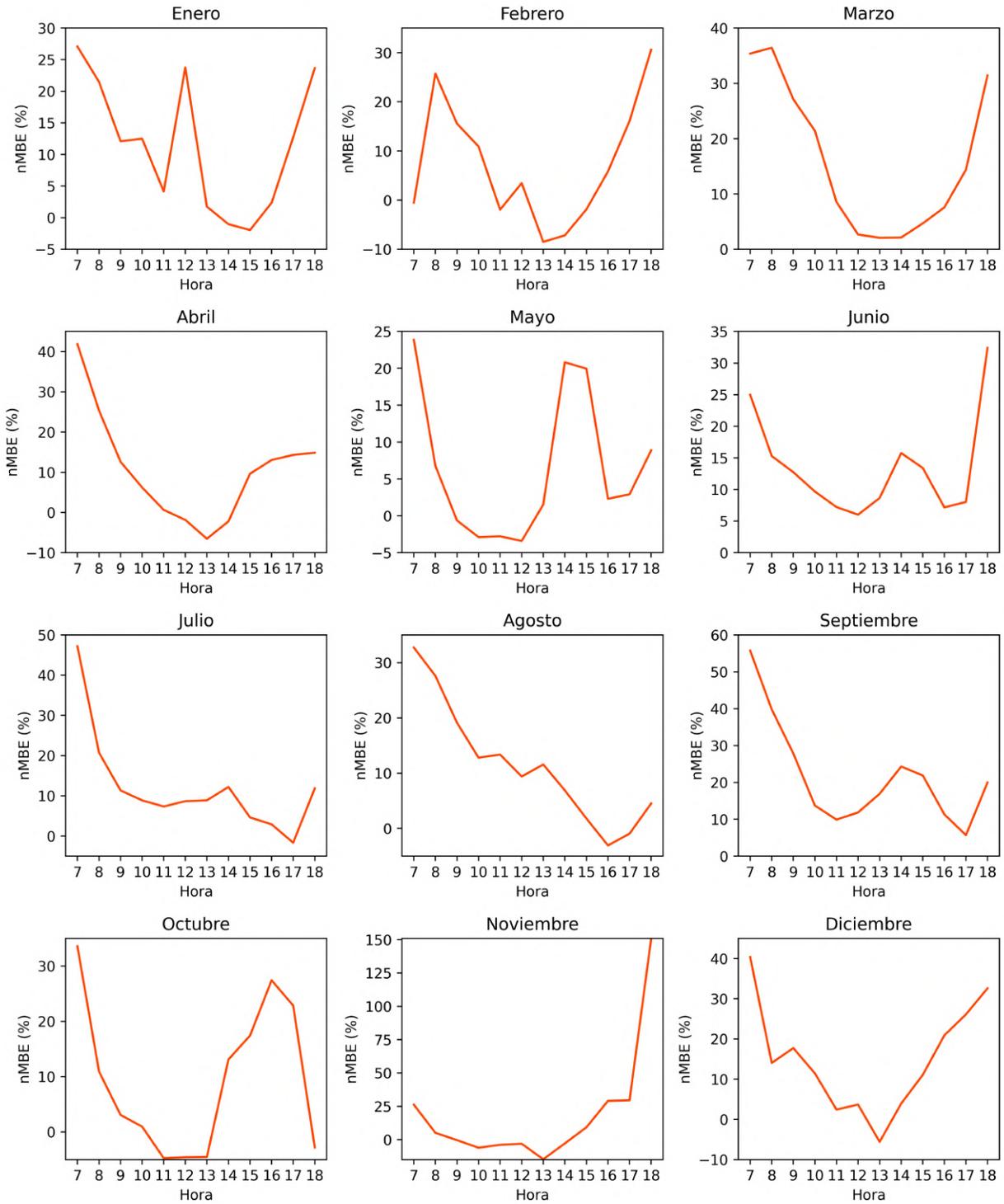


Figura 5.26: Ciclo diario de los Errores de Sesgo Medio estandarizados (nMBE) asociado a las estimaciones del reanálisis ERA5, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.

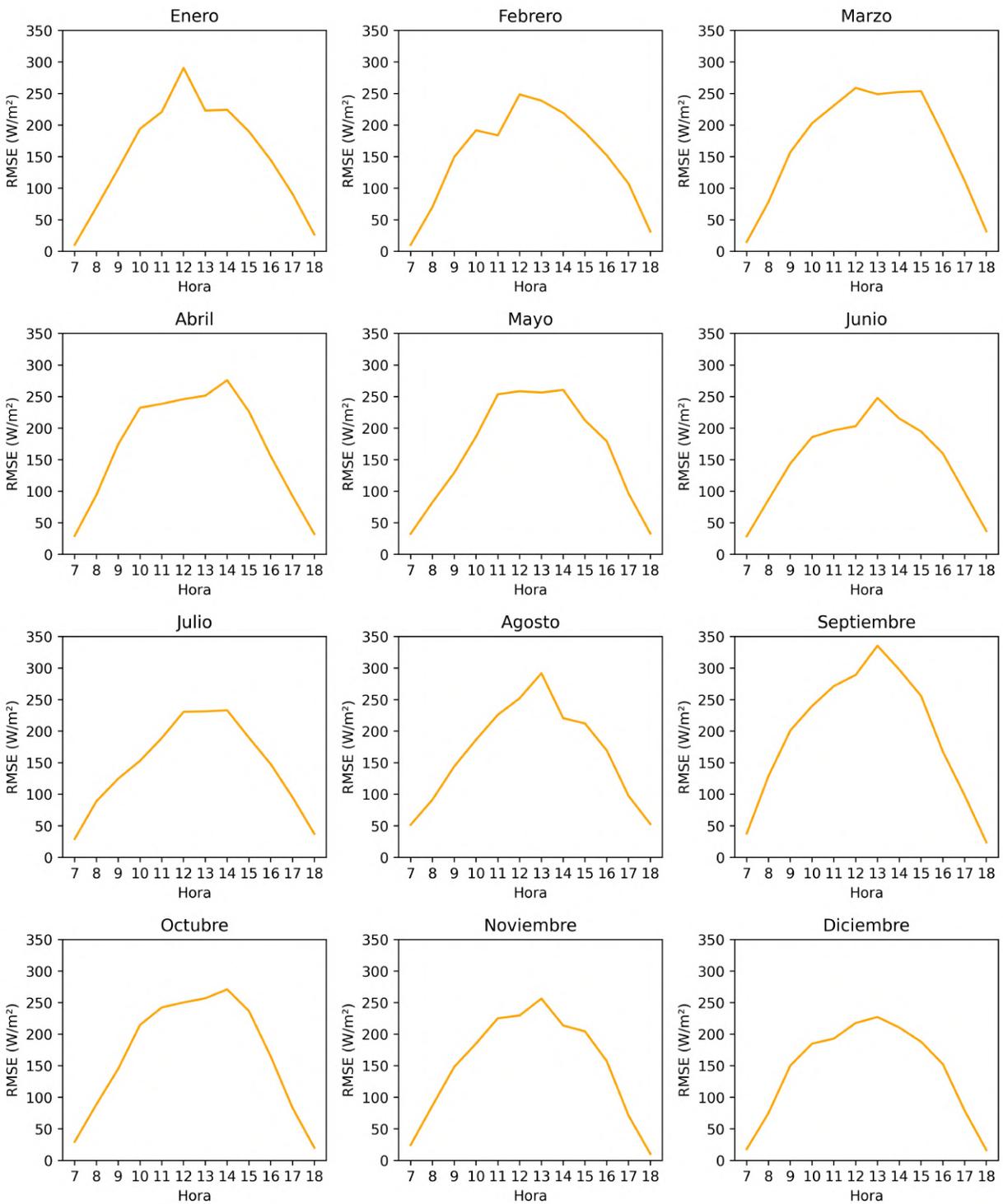


Figura 5.27: Ciclo diario de los Errores Cuadráticos Medios (RSME) asociado a las estimaciones del reanálisis ERA5, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.

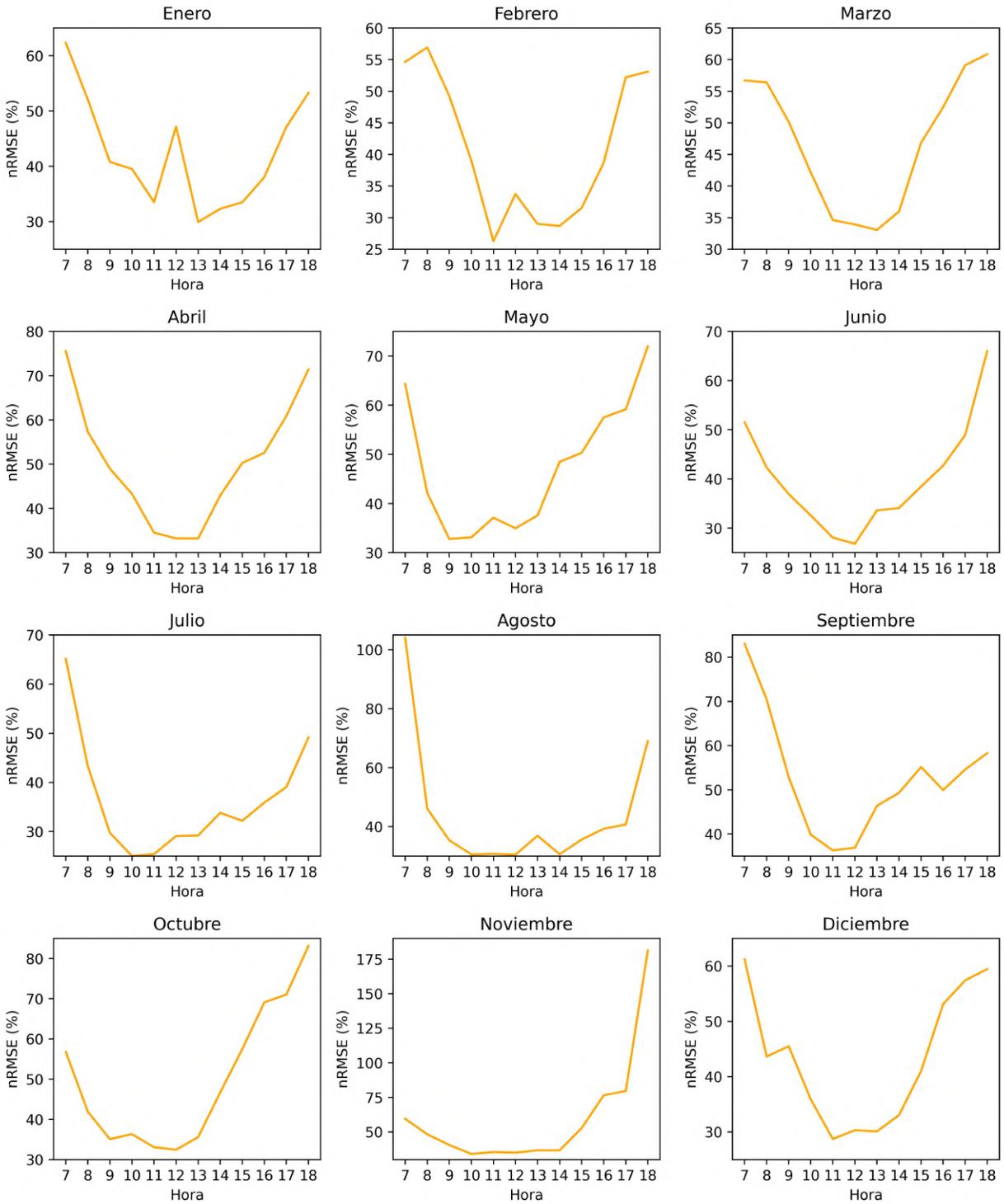


Figura 5.28: Ciclo diario de los Errores Cuadráticos Medios estandarizados (nRSME) asociado a las estimaciones del reanálisis ERA5, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.

agosto y del 181 % como a las 18:00 LT de noviembre. En términos generales, se encuentra que, aunque en las primera y últimas horas del día se encuentren valores bajos de RMSE, estos suelen tener asociados los mayores porcentajes de error debido a que las observaciones muestran valores bajos para el promedio de estas horas, mientras que al mediodía se presentan RMSE mayores pero que al compararse con el promedio de SIATA, representan porcentajes de error más bajos.

5.3.7. Escala horaria de la radiación solar de ERA5

En la Figura 5.29 se presentan las distribuciones para los promedios horarios de radiación solar en el Valle de Aburrá provenientes del reanálisis ERA5 y se contrasta con las distribuciones para los registros de SIATA. Se observa que, para los meses diferentes a enero, febrero, marzo y noviembre, ERA5 presenta mayores frecuencias con respecto a SIATA para los promedios horarios con valores entre los 0 W/m² y los 100 W/m². Por otra parte, se encuentra que los promedios horarios con magnitudes superiores a 900 W/m² son más comunes en las distribuciones de las observaciones que en las distribuciones relacionadas con las estimaciones del reanálisis, exceptuando las distribuciones de junio, julio, agosto y septiembre. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, ERA5 puede presentar ciertas limitaciones para representar las magnitudes de la radiación horaria, principalmente, cuando son valores muy altos o bajos. Por otra parte, los promedios horarios cuyas magnitudes son mayores que 400 W/m² y menores que 900 W/m² presentan mayor número de registros para ERA5 en comparación con SIATA, principalmente en marzo, abril, octubre y noviembre que pertenecen a las temporadas húmedas del año, esto puede estar relacionado con que ERA5 presenta dificultades para captar adecuadamente el efecto de las nubes sobre la cantidad de radiación de alcanza la superficie terrestre en el lugar de estudio.

En la Tabla 5.6 se exponen los coeficientes de correlación de Pearson entre las anomalías horarias de SIATA y las correspondientes a las estimaciones del reanálisis ERA5, en el período de estudio para el Valle de Aburrá. Se encuentra que para el año 2017, los coeficientes de correlación más altos se obtienen para abril, octubre y diciembre cuyos valores son de 0.62, 0.50 y 0.41 respectivamente, mientras que las correlaciones de Pearson más bajas se obtienen en febrero con un valor de 0.15 y en marzo, julio y agosto con valores de 0.32. En el 2018, se encuentra que la correlación de Pearson más alta se presenta en septiembre con un valor asociado de 0.42, mientras que la correlación más baja se presenta en enero con un valor de 0.16. Se destaca que, en 2019, las correlaciones son bajas encontrándose valores de 0.04 en marzo y de -0.01 en septiembre, indicando que ERA5 tuvo dificultades para interpretar tanto las magnitudes como el signo de las fluctuaciones de la radiación solar. En 2020, se obtienen correlaciones sustanciales en enero, marzo, mayo, junio y octubre, mientras que en diciembre la correlación de Pearson es de 0.10 indicando una relación débil entre la variabilidad presentada en las observaciones y la estimada por el reanálisis. En términos generales, la representatividad de la variabilidad horaria de la radiación es baja por parte del reanálisis ERA5, puesto que gran parte de las correlaciones consignadas en la tabla 5.6 son menores a 0.40, que usualmente es considerado como el umbral mínimo para definir correlaciones interesantes.

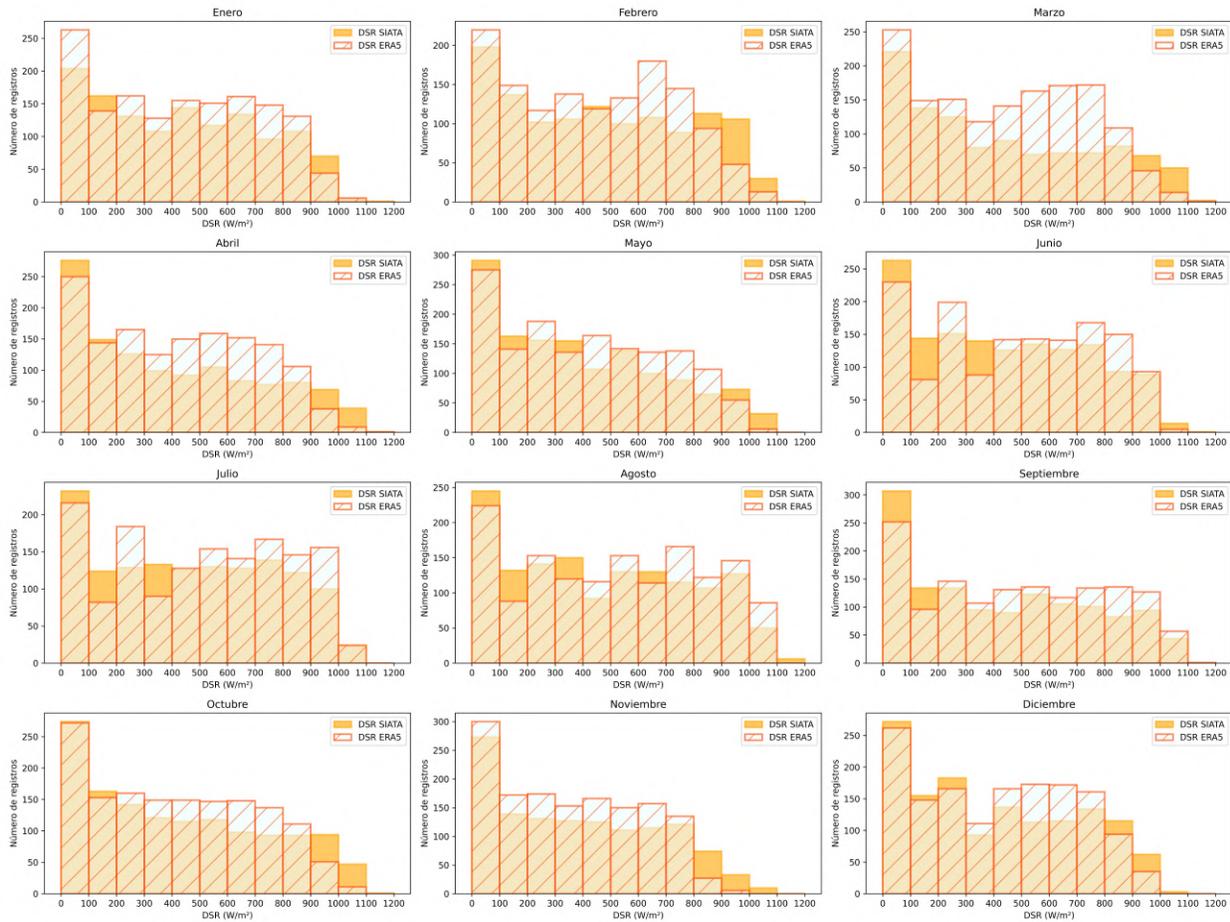


Figura 5.29: Histogramas mensuales de los promedios horarios de radiación solar en el Valle de Aburra, obtenidos a partir de los registros de SIATA y las estimaciones del reanálisis ERA5, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020.

Tabla 5.6: Coeficiente de correlación de Pearson entre las anomalías horarias de radiación solar obtenidas para los registros de SIATA y las estimaciones del reanálisis ERA5, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020 en el Valle de Aburrá. Las correlaciones resaltadas en negrita son estadísticamente significativas con un nivel de la prueba de 0.01.

Correlación de Pearson				
Mes	2017	2018	2019	2020
Enero	0.33	0.16	0.35	0.45
Febrero	0.15	0.28	0.45	0.27
Marzo	0.32	0.35	0.04	0.42
Abril	0.62	0.21	0.13	0.22
Mayo	0.34	0.27	0.31	0.50
Junio	0.38	0.32	0.36	0.41
Julio	0.32	0.30	0.15	0.23
Agosto	0.40	0.39	0.25	0.25
Septiembre	0.32	0.42	-0.01	0.21
Octubre	0.50	0.21	0.28	0.43
Noviembre	0.35	0.17	0.33	0.28
Diciembre	0.41	0.22	0.38	0.10

5.4. Análisis de radiación solar derivada de ERA5 en el período 1979-2020

5.4.1. Ciclo Anual

El ciclo medio anual de radiación solar a largo plazo sobre la superficie del Valle de Aburrá es mostrado en la Figura 5.30. La radiación solar sobre este valle perteneciente a la región Andina de Colombia exhibe un carácter bimodal. Se observan dos temporadas de mayor radiación solar en superficie entre febrero y marzo y desde julio hasta agosto, y dos temporadas de disminución de la radiación solar en abril- mayo y desde septiembre hasta noviembre. El pico del primer período de alta radiación se presenta en marzo y su promedio mensual multianual corresponde de 433 W/m^2 , y el segundo pico se presenta en agosto con un promedio de 505.20 W/m^2 . En contraste, el primer mínimo se presenta en abril con un promedio asociado de 401.20 W/m^2 y el segundo mínimo ocurre noviembre que, a su vez, corresponde al mes en el que típicamente se presentan menores valores de radiación, pues su promedio mensual multianual es de 355.79 W/m^2 . En términos generales, el ciclo anual a largo plazo obtenido a través de las estimaciones de ERA5 muestra las generalidades del ciclo anual para la radiación solar en el Valle de Aburrá evidenciado para los cuatro años de observaciones de SIATA (Figura 5.2). Sin embargo, se observa que el período de máxima radiación de DEF se extiende hasta marzo. Estas sobreestimaciones en marzo por parte de ERA5 pueden ser el resultado de la conjugación de dos factores, la alta intensidad de la radiación solar en el tope de la atmósfera durante marzo-abril y la presencia de sistemas convectivos derivados del paso de la ZCIT que pueden ser difíciles de representar para el reanálisis. Las variaciones entre las observaciones y las estimaciones a largo plazo de ERA5 también pueden deberse a las diferencias en el período abarcado por ambos conjuntos.

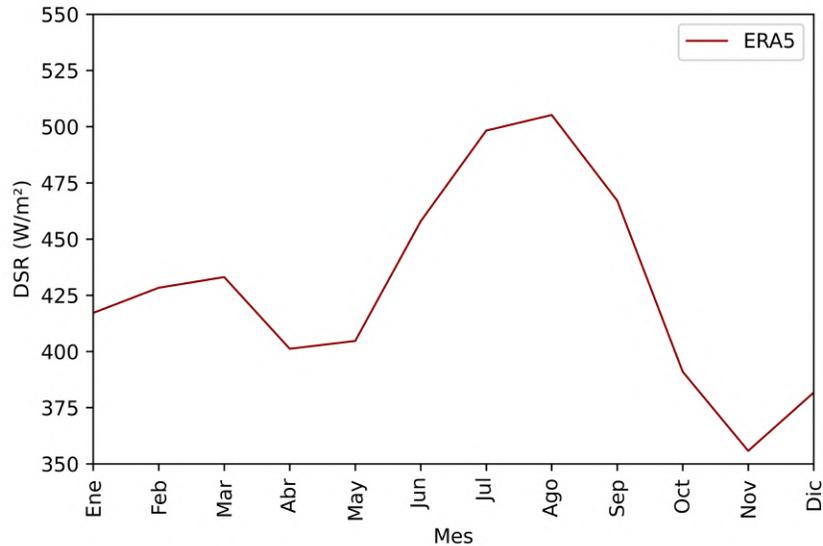


Figura 5.30: Ciclo anual de la radiación solar en el Valle de Aburrá a partir del conjunto de datos del reanálisis ERA5 entre 1979 y 2020.

5.4.2. Eventos ENSO y variaciones mensuales de la radiación solar

Las distribuciones de los promedios mensuales y de las anomalías de radiación solar en superficie para el Valle de Aburrá durante la presencia del patrón climático ENSO, son mostradas en las Figuras 5.31.a y 5.31.b, respectivamente. En términos generales, los promedios mensuales de irradiancia solar presentan magnitudes mayores que 300 W/m^2 y menores que 570 W/m^2 , adicionalmente, se encuentra que la dispersión de sus distribuciones es baja, exceptuando el trimestre SON donde los promedios mensuales exhiben un amplio rango de oscilación de sus magnitudes. Las fluctuaciones de los promedios mensuales, típicamente, tienen valores que se encuentran comprendidos entre 100 W/m^2 y -100 W/m^2 .

Para el trimestre DEF, se observa que la distribución de la radiación solar correspondiente a condiciones neutras se encuentra concentrada hacia los valores de menor magnitud y su mediana tiene un valor de 391.51 W/m^2 ; asimismo, se muestra que sus anomalías positivas pueden tener valores de hasta 100 W/m^2 y sus anomalías negativas son mayores que -75 W/m^2 . En contraste, la distribución de los promedios mensuales de radiación solar en DEF relativa a eventos El Niño se concentra hacia las magnitudes más altas, de tal forma que su mediana tiene un valor de 430.27 W/m^2 y más del 75% de los promedios mensuales tiene valores superiores que la mediana correspondiente a la distribución de la radiación solar para condiciones neutras de este mismo trimestre. Por otra parte, la distribución de DEF para los promedios mensuales durante eventos La Niña tiene una asimetría positiva y se centra en 390.57 W/m^2 , un valor cercano a la mediana bajo condiciones neutras; además, se resalta que sus fluctuaciones oscilan entre 45 W/m^2 y -62 W/m^2 y que más del 75% de las anomalías tienen valores negativos.

En los trimestres MAM y JJA se muestra que la mediana para la distribución de los promedios mensuales bajo condiciones neutras es menor que la distribución durante eventos El Niño, sin embargo, las anomalías para condiciones neutras oscilan en un rango más amplio que el encontrado para condiciones el Niño, sugiriendo que la señal de las estimaciones de ERA5 frente a los aumentos

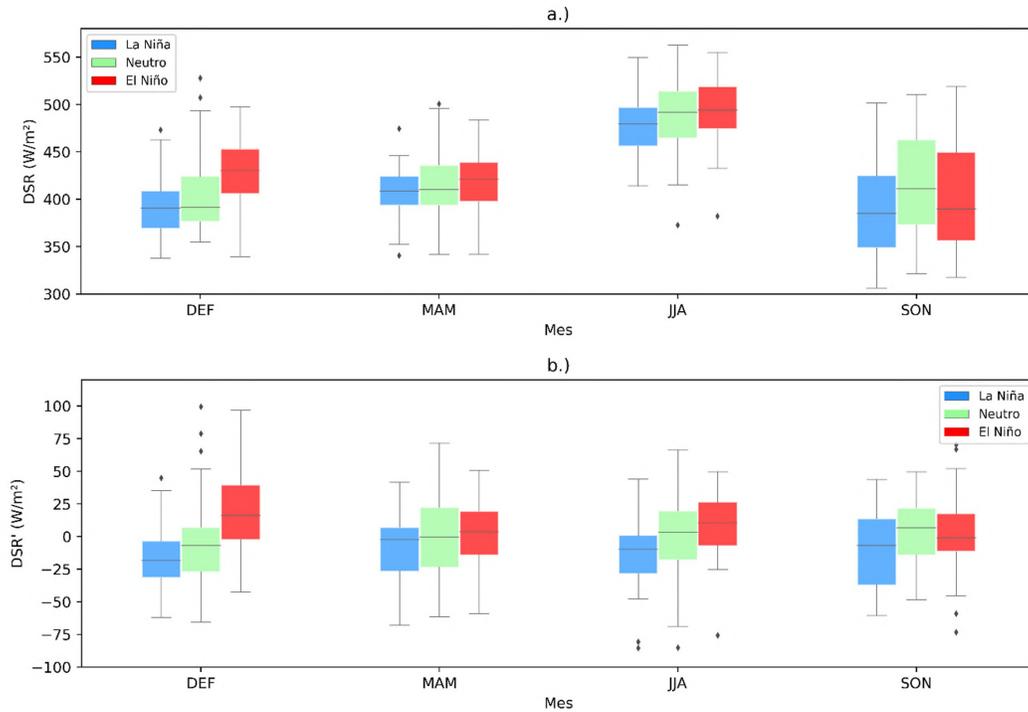


Figura 5.31: Distribución estacional de la radiación solar en superficie derivada de ERA5 para el período 1979-2020 en el Valle de Aburrá. (a.) Promedios mensuales. (b.) Anomalías con respecto al ciclo anual. Los diagramas azules corresponden a los valores de radiación bajo la ocurrencia de condiciones La Niña. Los diagramas verdes corresponden a los valores de radiación en condiciones neutras. Los diagramas rojos corresponden a los valores de radiación bajo la ocurrencia de condiciones El Niño.

de radiación solar durante eventos El Niño no es tan clara para estos trimestres como se encontró para el trimestre DEF. Durante eventos La Niña en MAM y JJA, las anomalías presentan una asimetría positiva y los promedios mensuales tienen una mediana más baja con respecto a condiciones neutras, sin embargo, la diferencias de magnitudes entre las medianas no es muy marcada. En SON, contrario a los otros trimestres, se observa que la mediana correspondiente a eventos ENSO en su fase cálida es menor que durante condiciones neutras y se encuentra que las anomalías durante El Niño alcanzan valores mínimos de -73.37 W/m^2 y valores máximos de 70.33 W/m^2 . Para eventos La Niña en SON, se observa que la radiación solar en superficie suele tener valores menores que durante condiciones neutras y El Niño, debido a que su rango intercuartil se encuentra concentrado hacia valores más bajos.

5.4.3. Ciclos diurnos de la radiación solar bajo condiciones ENSO

Los ciclos diurnos para cada estación del año son presentados en la Figura 5.32. En general, las distribuciones muestran que las mayores dispersiones de los datos se presentan alrededor del mediodía y en las tardes, mientras que entre las 7:00 LT y las 9:00 LT y desde las 17:00 hasta las 18:00 el rango de variabilidad de los promedios horarios es más bajo. Respecto a las distribuciones de los ciclos diurnos durante eventos La Niña, se observa que el rango intercuartil para todas las horas y todas las estaciones se encuentra comprendido entre valores inferiores con respecto a las condiciones

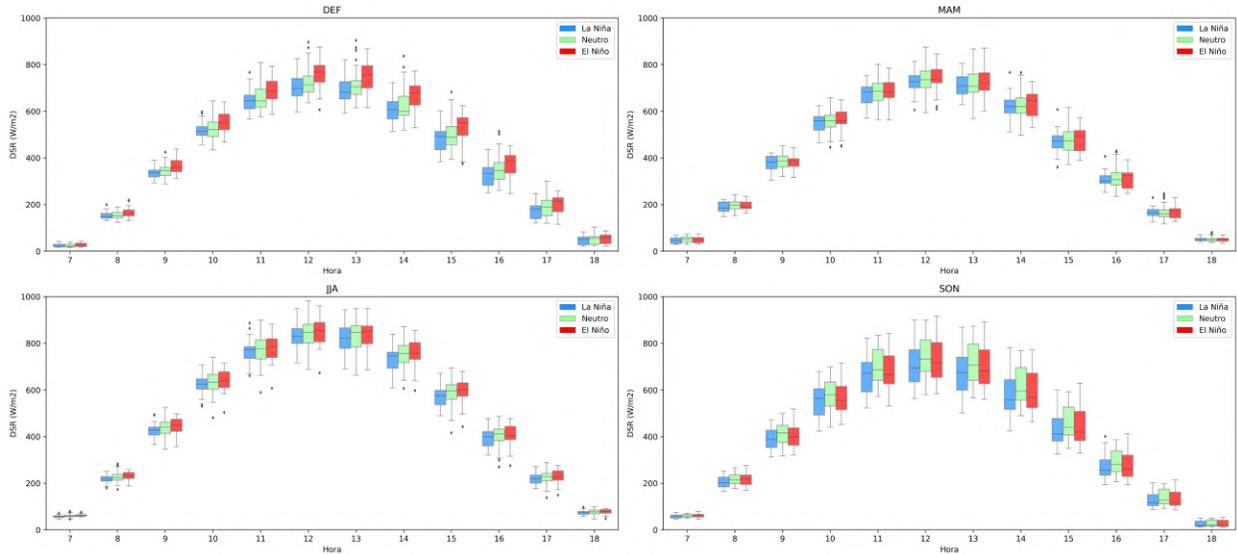


Figura 5.32: Distribución estacional de los ciclos diurnos de radiación solar en superficie derivada de ERA5 para el período 1979-2020 en el Valle de Aburrá. Los diagramas azules corresponden a los valores de radiación bajo la ocurrencia de condiciones La Niña. Los diagramas verdes corresponden a los valores de radiación en condiciones neutras. Los diagramas rojos corresponden a los valores de radiación bajo la ocurrencia de condiciones El Niño.

neutras, principalmente en horas posteriores a las 12:00 LT. En contraste, el rango intercuartil para las distribuciones de los ciclos diurnos durante eventos El Niño, se encuentra centrado en valores más altos con respecto a condiciones neutras para todas las horas de los trimestres DEF y JJA, siendo más pronunciadas las altas magnitudes durante DEF donde se observa que, entre las 7:00 LT y las 15:00 LT, el cuartil 0.25 de las distribuciones para eventos El Niño es mayor que la mediana para condiciones neutras. En MAM, se muestra que entre las 7:00 LT y las 12:00 LT las distribuciones para El Niño pueden estar centradas en valores cercanos o inferiores a las medianas correspondientes a condiciones neutras, mientras que en las tardes las distribuciones para el Niño generalmente tienen asimetrías negativas y medianas mayores que en condiciones neutras. En SON, el rango intercuartil para los eventos ENSO en sus dos fases se encuentran comprendidos entre valores de menor magnitud para casi todas las horas sugiriendo que, en este trimestre ante la ocurrencia tanto de La Niña como de El Niño, la radiación solar en superficie en el Valle de Aburrá presenta, típicamente, valores inferiores en comparación con condiciones neutras.

Capítulo 6

Discusiones y conclusiones

La caracterización y el entendimiento del recurso solar en un lugar determinado es fundamental para el despliegue de nuevos proyectos de energía solar, lo cual hace de vital importancia la disponibilidad de estimaciones de irradiancia solar a largo plazo y continuas. No obstante, en el Valle de Aburrá se dispone de mediciones en tierra para un período corto y frecuentemente se presentan valores perdidos, e incluso gran parte del territorio de Colombia no cuenta con redes de medición in situ. Frente a la escasez de datos locales, los conjuntos de datos derivados de satélites y reanálisis constituyen una herramienta alterna y la evaluación de su desempeño comprende un paso necesario para determinar su utilidad en los diferentes campos de aplicación. En este estudio se usaron mediciones en tierra de SIATA y datos derivados del reanálisis ERA5 y del satélite GOES-16 para dimensionar el recurso solar sobre el Valle de Aburrá. Adicionalmente, se compararon las observaciones con las estimaciones del reanálisis y de los datos satelitales para evaluar su rendimiento al representar el comportamiento típico y la variabilidad de la radiación solar en el lugar de estudio.

La radiación solar proveniente de la estación Torre SIATA se analizó entre el 1 de enero de 2017 y el 31 de diciembre de 2020, para el rango horario comprendido entre las 7:00 LT y las 18:00 LT. A escala anual, se encontró que el recurso solar exhibe un carácter bimodal, presentándose una disminución de la radiación solar durante MAM y SON, correspondientes a las temporadas de alta nubosidad y precipitación del lugar de estudio, mientras que en DEF y JJA, períodos con frecuentes cielos despejados, se observa mayor incidencia de radiación solar de onda corta descendente sobre la superficie del Valle de Aburrá. Febrero y agosto son los meses con mayor disponibilidad del recurso solar, mostrando promedios mensuales multianuales de 469.28 W/m^2 y 472.44 W/m^2 , respectivamente. En contraste, mayo y noviembre son los meses que reciben menor cantidad de radiación al exhibir valores mensuales medios de 398.21 W/m^2 y 393.89 W/m^2 , respectivamente. En ese sentido, durante estos meses los sistemas de energía solar pueden presentar sus menores rendimientos. Igualmente, se encuentra que los meses correspondientes a las temporadas húmedas, principalmente marzo y octubre, presentan mayor variabilidad de los promedios horarios de irradiancia solar en superficie puesto que sus anomalías horarias pueden ser menores que -700 W/m^2 y mayores que 400 W/m^2 ; mientras que en épocas secas las anomalías horarias oscilan, generalmente, entre -600 W/m^2 y 350 W/m^2 . Además, las observaciones mostraron que el ciclo diurno de irradiancia solar en el Valle de Aburrá exhibe sus valores máximos entre las 11:00 LT y las 14:00 LT, y sus magnitudes oscilan en un rango entre 600 W/m^2 y 900 W/m^2 . Por otra parte, los valores de irradiancia que exhiben magnitudes menores que 300 W/m^2 se presentan entre 7:00 LT y las 8:00 LT y entre las 16:00 y las 18:00 LT. Asimismo, se encontró que el ciclo diurno presenta ligeras variaciones en el año, dado que para abril-mayo y octubre-noviembre disminuye la duración del día, así como la intensi-

dad de la radiación solar obteniéndose que para estos dos períodos los valores de irradiancia solar superiores a los 300 W/m^2 se alcanzan alrededor de las 9:00 LT, mientras que en meses como febrero y agosto a esa misma hora, ya se han alcanzado promedios de radiación cercanos a los 400 W/m^2 .

La evaluación de las estimaciones de radiación solar provenientes del producto ABI L2 de GOES-16 mostró que al comparar los datos satelitales con los datos de una ubicación dentro del lugar de estudio, se exhiben altos sesgos. En promedio, el producto de GOES-16 sobreestima la irradiancia solar en superficie para todos meses con valores mensuales de MBE entre 40 W/m^2 y 140 W/m^2 , obteniéndose que las mayores limitaciones se presentan bajo condiciones de nubosidad. Durante los meses correspondientes a las temporadas secas, en promedio, los valores mensuales de RMSE oscilan entre 193 W/m^2 y 225 W/m^2 que corresponde a porcentajes entre 32 % y 40 %. En contraste, las temporadas húmedas muestran mayores valores mensuales de RMSE, los cuales fluctúan entre 225 W/m^2 y 280 W/m^2 , correspondientes a porcentajes entre 42 % y 52 %. En la escala diaria, el análisis mostró que los datos satelitales presentan altas sobreestimaciones de los valores de energía diaria durante MAM, dado que para SIATA la distribución de la energía se centra en 4.72 kWh/m^2 mientras que para GOES la mediana es de 5.63 kWh/m^2 . No obstante, este comportamiento no es observado durante la segunda temporada de precipitaciones, donde la energía para GOES-16 y para las observaciones oscila alrededor de 4.5 kWh/m^2 . Lo anterior puede estar relacionado con diferencias en la estructura de los sistemas convectivos de ambas temporadas, siendo posible que, en SON la conjugación del paso de la ZCIT con la dinámica del Chorro del Chocó y con el paso de ondas tropicales del este sobre la región genere sistemas convectivos de gran extensión (Bedoya-Soto et al., 2019; Poveda, 2004; Poveda & Mesa, 1999), cuyos efectos sobre la extinción de la radiación pueden ser captados y sobredimensionados por el satélite. A escala diurna, se encontró que el satélite exhibe mayores porcentajes de error ($\text{nRMSE} > 40\%$) en las tardes, período caracterizado por presentar altas precipitaciones. En términos generales, los resultados sugieren un mejor desempeño del ABI L2 + DSR bajo condiciones de cielo despejado, mientras que la presencia de nubes genera dificultades en la representatividad de la variabilidad de la radiación solar por parte del satélite. Los estudios relacionados con la evaluación del recurso solar derivado de GOES-16 son limitados, por lo tanto, no es posible establecer si los errores encontrados son típicos, o si son mayores con respecto a otras regiones, o si son debidos a la ubicación geográfica y complejidad de la topografía del territorio de estudio.

Por su parte, los resultados para la evaluación del desempeño del reanálisis ERA5 mostraron que, en general, este conjunto de datos representa bien la estacionalidad de la irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá, puesto que exhibe los períodos de aumento y disminución de la radiación solar a lo largo del año y presenta una correlación de Pearson de 0.75 con el ciclo anual de las observaciones. No obstante, el reanálisis tiene limitaciones al estimar las magnitudes de la irradiancia solar, encontrándose que los valores mensuales de RMSE oscilan entre 34 % y 52 %, siendo más pronunciados los errores durante las temporadas de lluvias en la región en los trimestres MAM y SON. En los valores diarios de energía se encontró que, en general, las distribuciones se concentran hacia valores mayores que las observaciones, siendo más altos los sesgos para el trimestre JJA. A escala horaria, se encontró que ERA5 sobreestima, entre un 20 % y un 60 %, la irradiancia solar en superficie en las primeras horas de la mañana y finalizando la tarde, y que los valores de RMSE para los promedios por hora son mayores durante los meses de alta precipitación, alcanzando porcentajes de error de hasta 181 %. Adicionalmente, se encontró que ERA5 no representa adecuadamente las fluctuaciones de los promedios horarios de irradiancia solar al encontrarse coeficientes de correlación de Pearson con las observaciones entre -0.01 y 0.50 para las anomalías con respecto al ciclo diurno. Estudios previos han mostrado que el desempeño de

ERA5 es bajo en áreas con altas precipitaciones, indicando que el reanálisis tiene dificultades para interpretar las propiedades de las nubes y sus efectos sobre la radiación que incide en la superficie (Babar et al., 2019; Jiang et al., 2020; Salazar et al., 2020). En términos generales, los estimados de irradiancia solar en superficie para el Valle de Aburrá derivados del reanálisis ERA5 presentan menores valores de RMSE y mayores correlaciones con las observaciones que los datos satelitales, en las diferentes escalas temporales de análisis. Además, el conjunto de datos de ERA5 tiene estimaciones disponibles para un período más extenso que los datos satelitales y cobertura para todo el dominio espacial de Colombia. En ese sentido, ERA5 puede representar una mejor alternativa, en comparación con los datos satelitales, para dar un primer estimado del recurso solar en el Valle de Aburrá y en regiones de Colombia donde no se disponga de instrumentos para la medición in situ de la radiación solar en superficie.

Por otra parte, la climatología de la radiación solar en superficie obtenida a partir de los ciclos diurnos mensuales de ERA5 entre 1979 y 2020, mostró que los datos derivados del reanálisis sugieren un aumento de al menos un 10% en los valores de radiación incidente sobre la superficie terrestre del Valle de Aburrá en DEF durante eventos ENSO en su fase cálida (El Niño), con respecto a condiciones neutras. Sin embargo, para las temporadas restantes y para la interpretación de la variabilidad de la irradiancia solar durante eventos La Niña, la señal de las estimaciones del reanálisis no es clara. Trabajos anteriores han expuesto que Colombia, en general, presenta alta dependencia de los recursos hídricos para la generación de energía eléctrica en el país, siendo particularmente vulnerable ante los períodos de sequía que se presentan durante la ocurrencia del patrón climático ENSO (Henaó et al., 2019; Zapata et al., 2018). Henaó et al. (2020) indican que durante El Niño, la entrada de agua hacia los sistemas hidroeléctricos del país se reduce considerablemente, afectando la producción de energía eléctrica. En ese sentido, los resultados encontrados en el presente estudio indican que los aumentos importantes en el recurso solar disponible en el Valle de Aburrá durante la ocurrencia de eventos El Niño, especialmente en DEF, pueden constituir una alternativa para complementar la energía hidroeléctrica en la región y reducir el riesgo en el suministro de energía.

El Valle de Aburrá cuenta con valores diarios de energía que, generalmente, oscilan entre 4 kWh/m² y 6 kWh/m² a lo largo del año, mientras que el promedio de Alemania, pionero en sistemas de energía solar, es de 3.0 kWh/m²-día. Teniendo en cuenta el alto potencial del lugar de estudio y la importancia de este recurso para minimizar brechas sociales y la vulnerabilidad del sector hidroeléctrico, se hace necesario seguir avanzando en el estudio del recurso solar en la región y asimismo, robustecer las metodologías para la evaluación de los conjuntos de datos que ofrecen información de irradiancia solar en superficie a largo plazo. Para ello, es importante ampliar los períodos de análisis, integrar mediciones in situ para otras ubicaciones dentro del área de estudio e implementar métodos avanzados que permitan rellenar los valores faltantes de las series de tiempo provenientes de las observaciones.

Anexos

Anexo A

Información general de los piranómetros de SIATA

Tabla A.1: Información de radiación solar disponible para las diferentes estaciones meteorológicas de SIATA.

Estación	ID	Desde	Hasta
Torre SIATA	6001	09/03/2016	31/12/2020
Concejo de Itagüí	6002	11/03/2016	30/04/2018
		01/07/2018	31/12/2020
I.E Joaquín Vallejo	6003	13/04/2016	31/12/2020
AMVA	6004	01/02/2018	31/12/2020
Parque de las Aguas	6005	01/02/2018	01/05/2019
		01/07/2019	31/12/2020

Anexo B

Información complementaria de la radiación solar derivada del producto ABI del satélite GOES-16

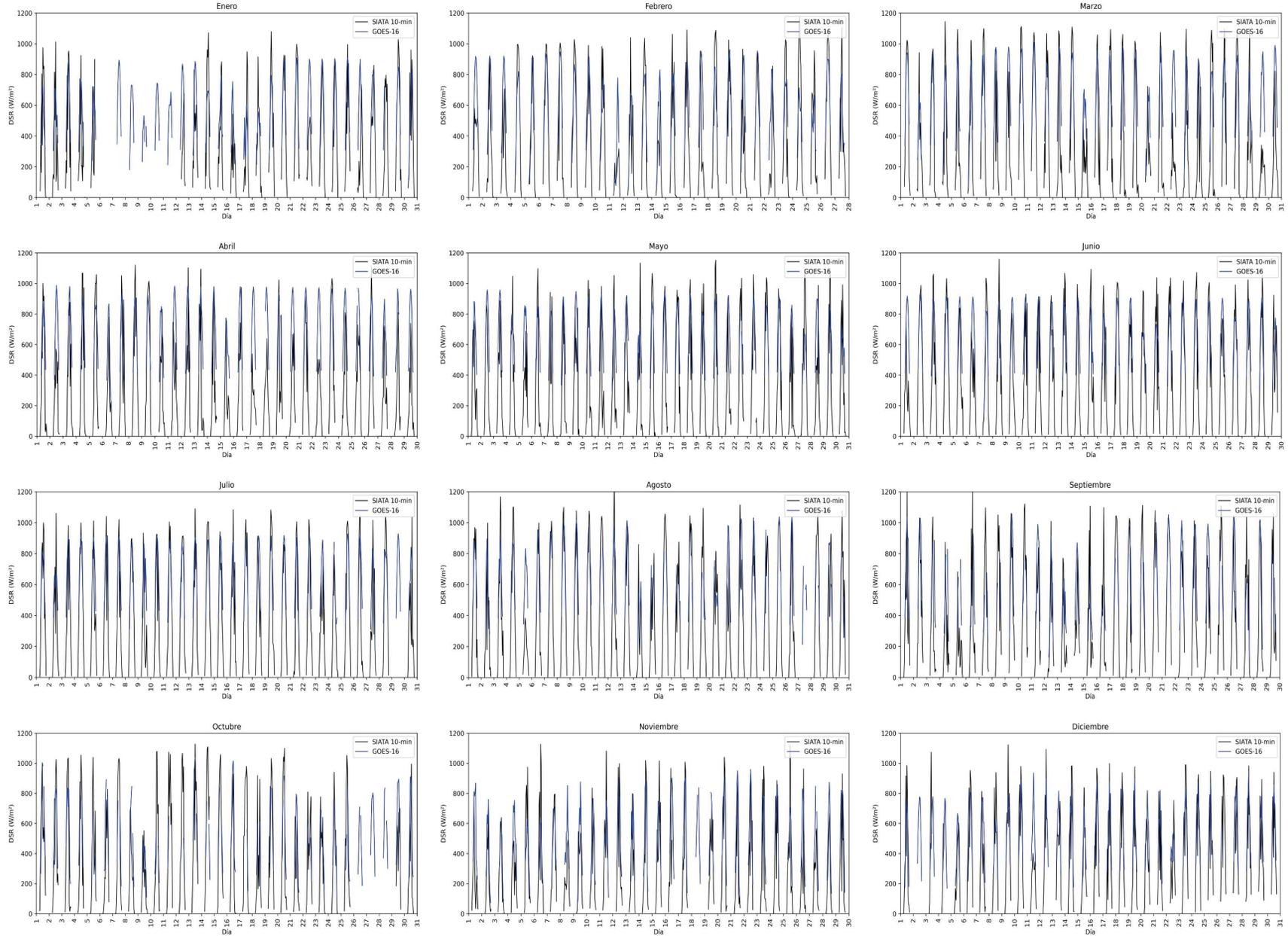


Figura B.1: Serie de tiempo de los promedios horarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2018, obtenida a partir de las estimaciones del producto ABI del GOES-16 vs los registros de SIATA 10-min.

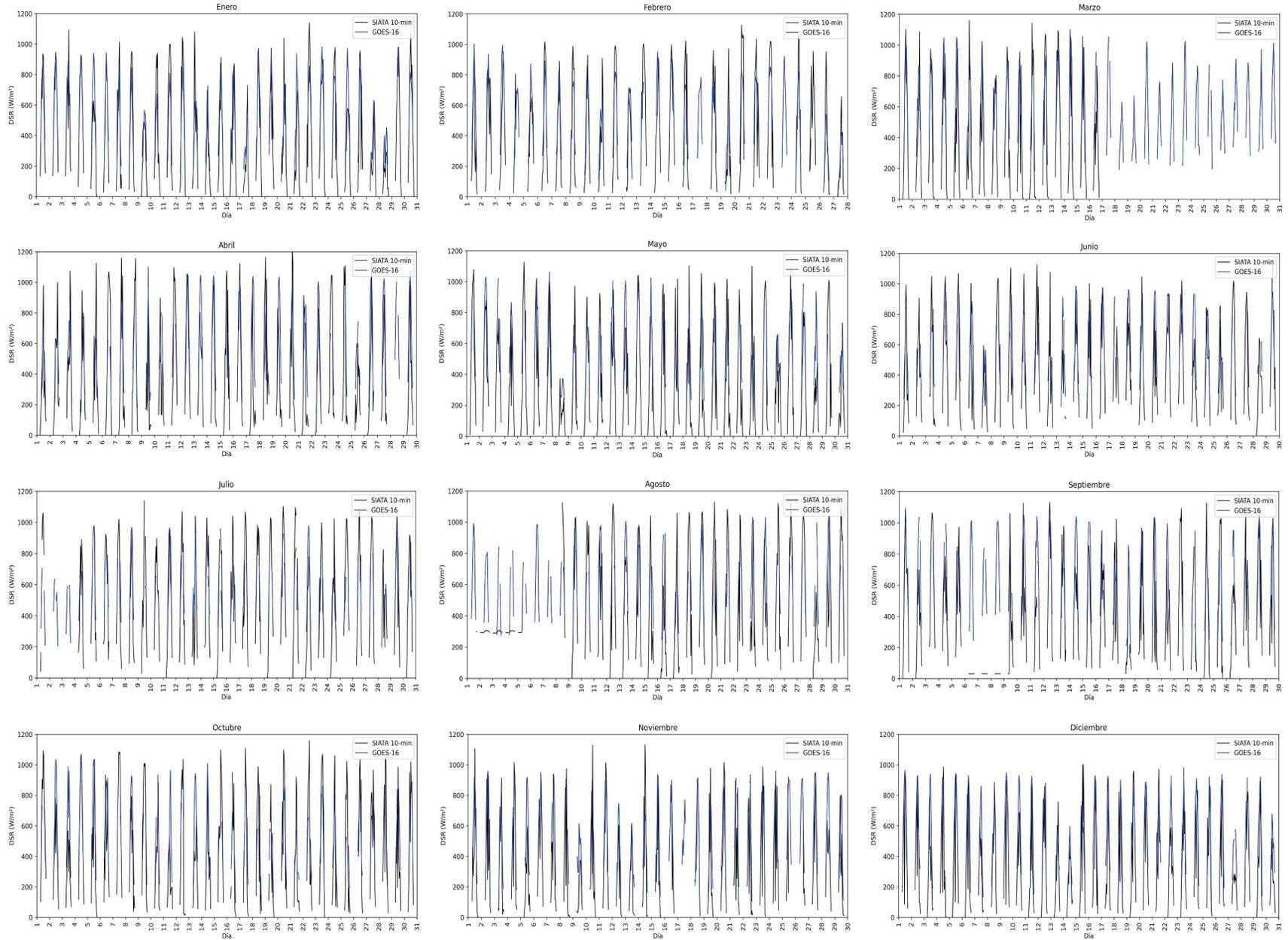


Figura B.2: Serie de tiempo de los promedios horarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2019, obtenida a partir de las estimaciones del producto ABI del GOES-16 vs los registros de SIATA 10-min.

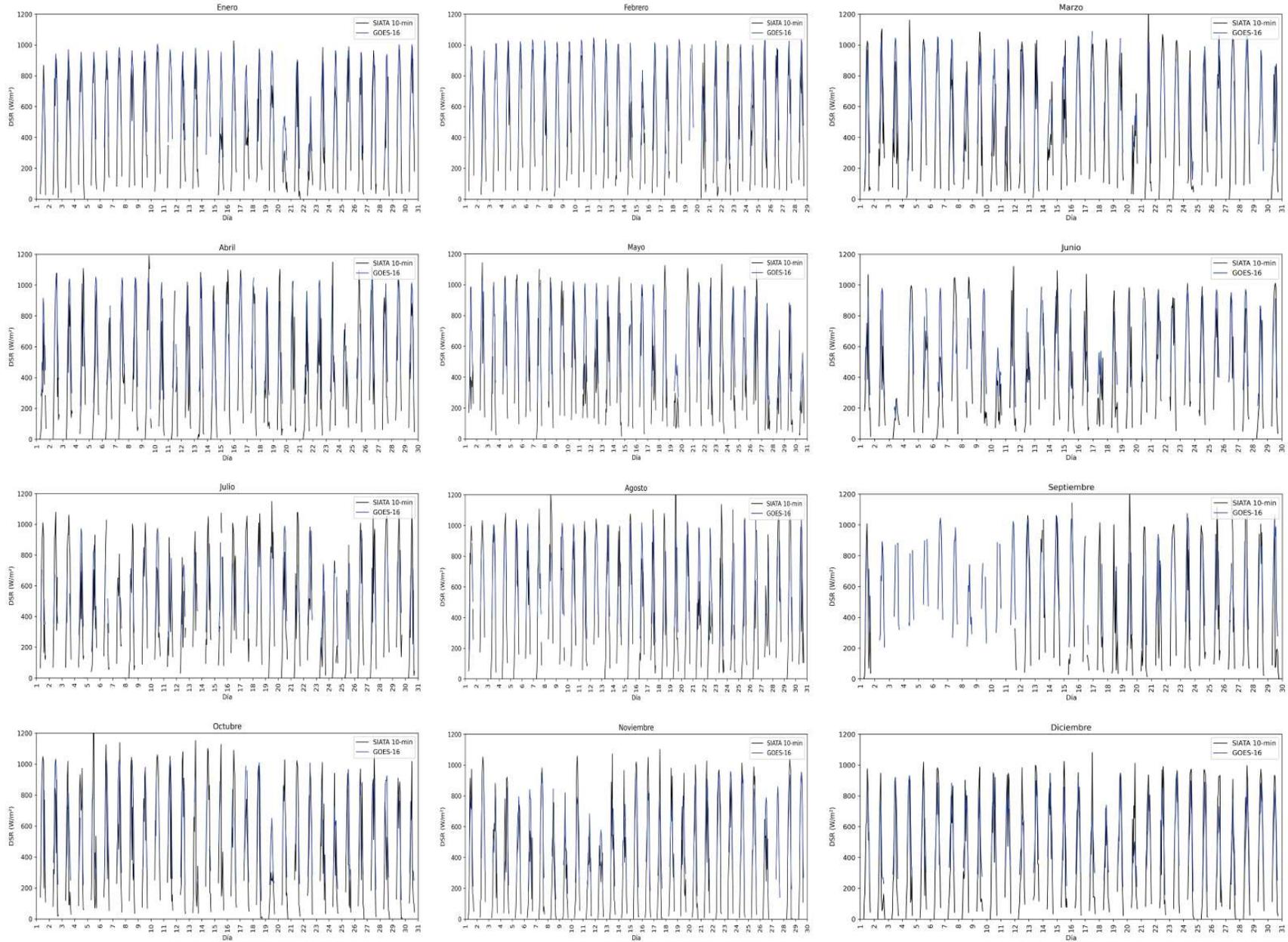


Figura B.3: Serie de tiempo de los promedios horarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2020, obtenida a partir de las estimaciones del producto ABI del GOES-16 vs los registros de SIATA 10-min.

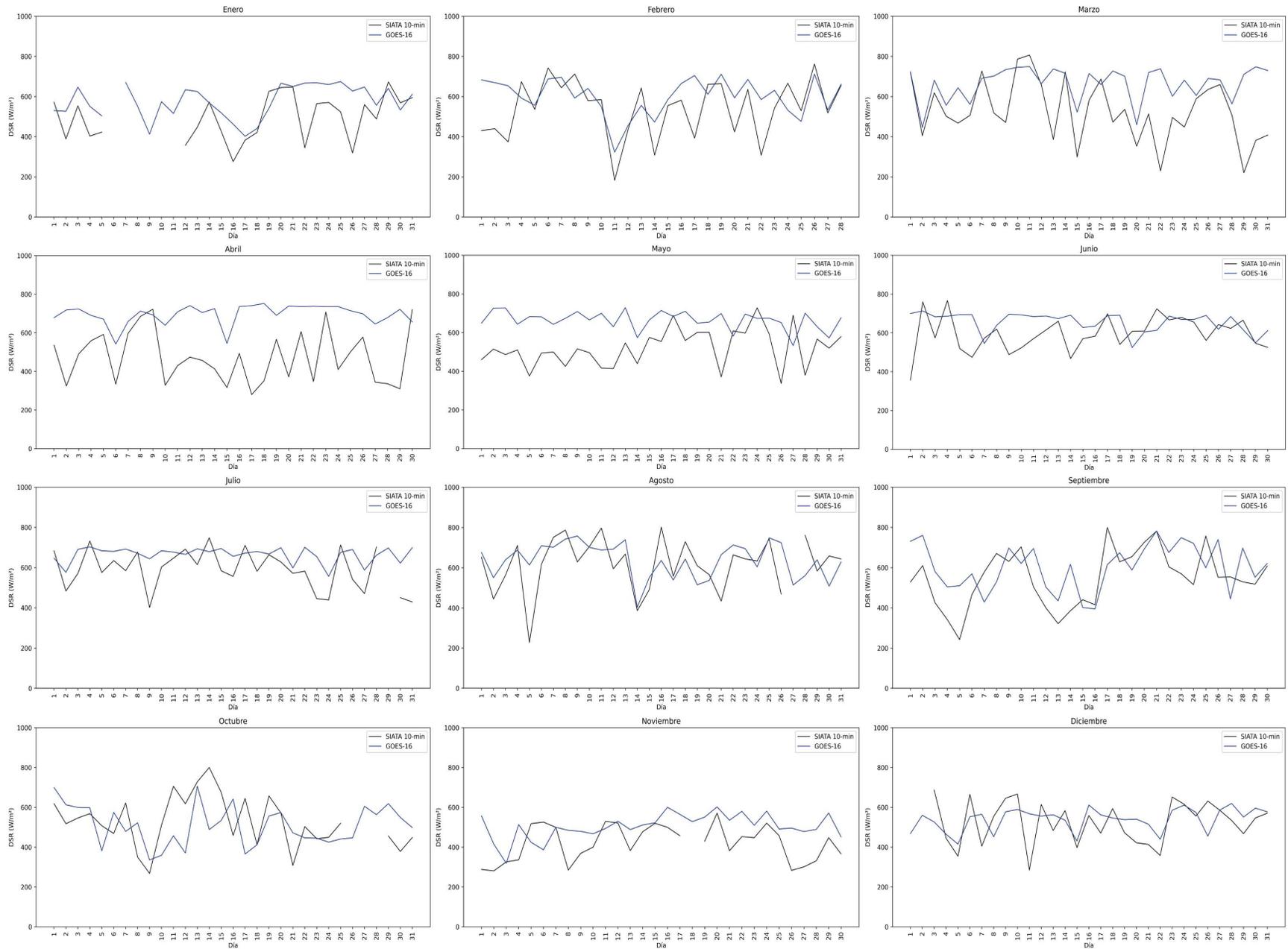


Figura B.4: Serie de tiempo de los promedios diarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2018 según las estimaciones del producto ABI del satélite GOES-16 vs los registros de SIATA.

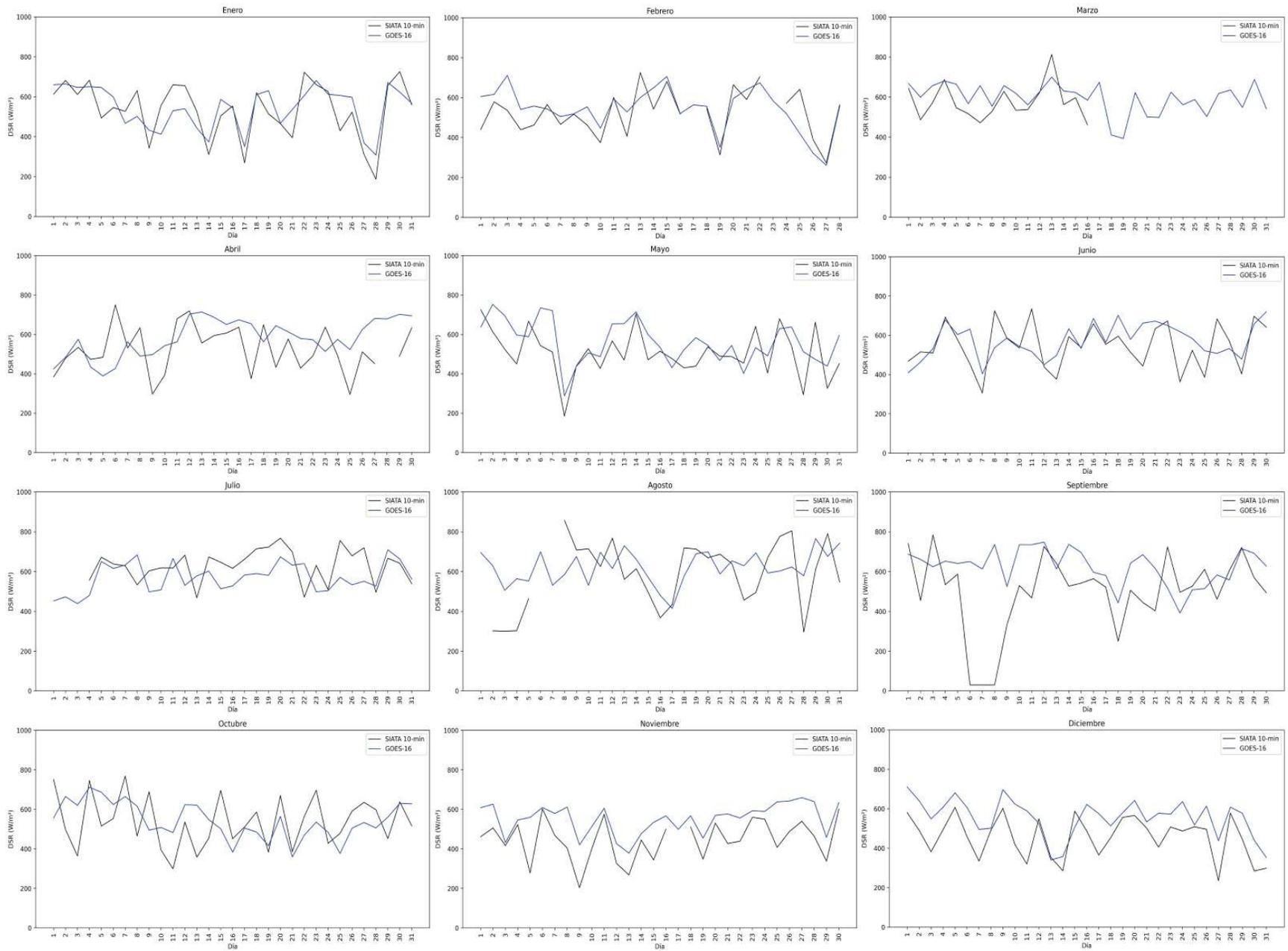


Figura B.5: Serie de tiempo de los promedios diarios de irradiación solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2019 según las estimaciones del producto ABI del satélite GOES-16 vs los registros de SIATA.

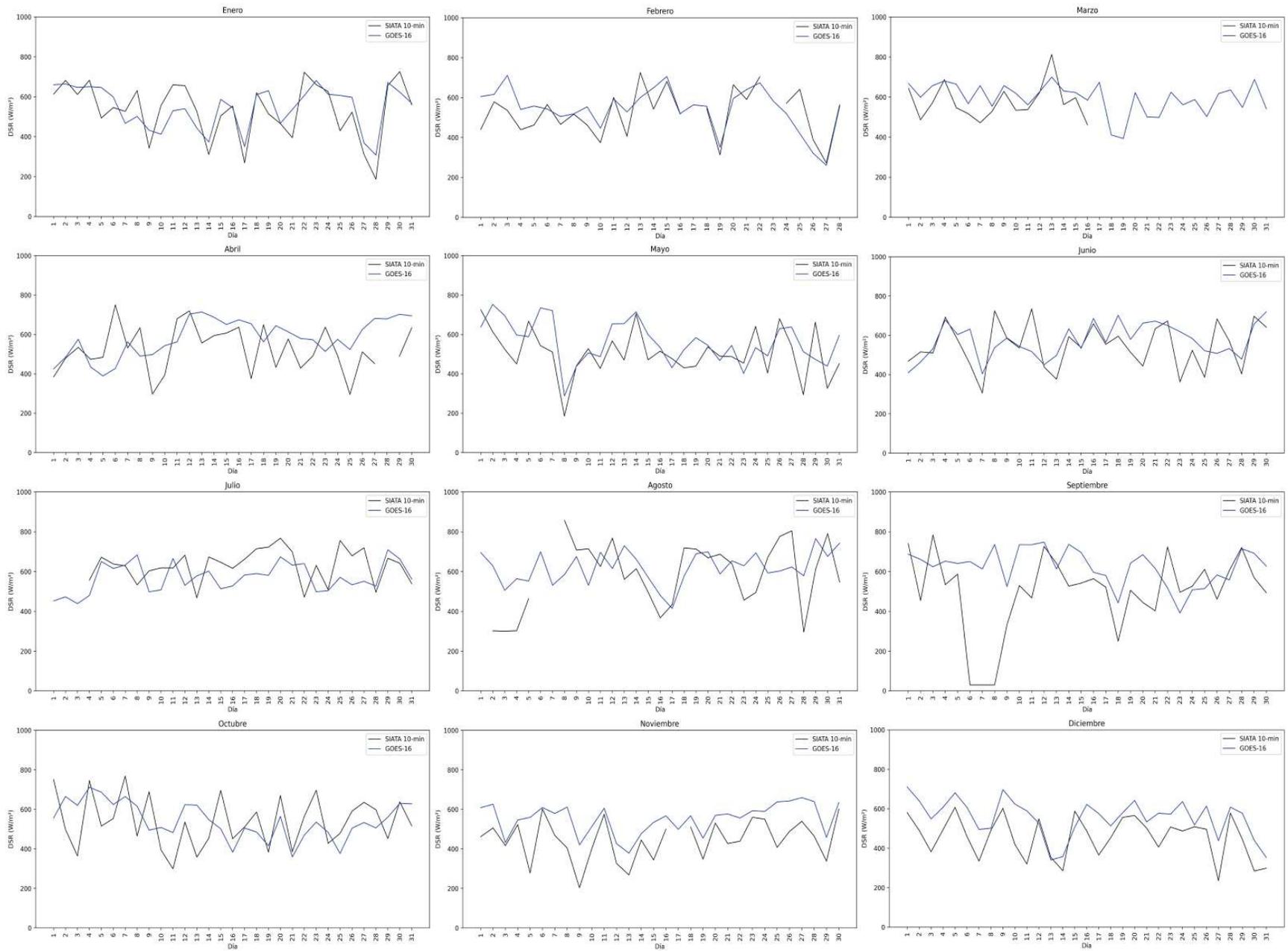


Figura B.6: Serie de tiempo de los promedios diarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2020 según las estimaciones del producto ABI del satélite GOES-16 vs los registros de SIATA.

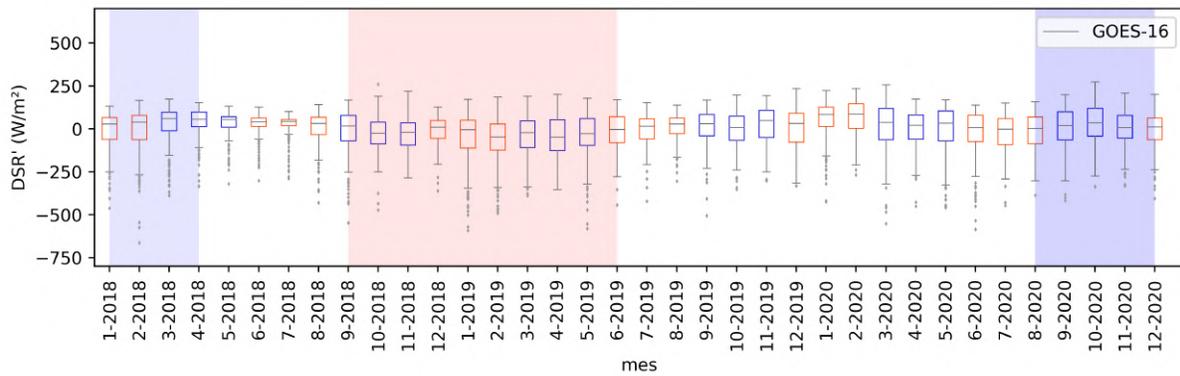


Figura B.7: Anomalías horarias de la irradiancia solar en superficie obtenidas a partir de las estimaciones del satélite GOES-16 en el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020

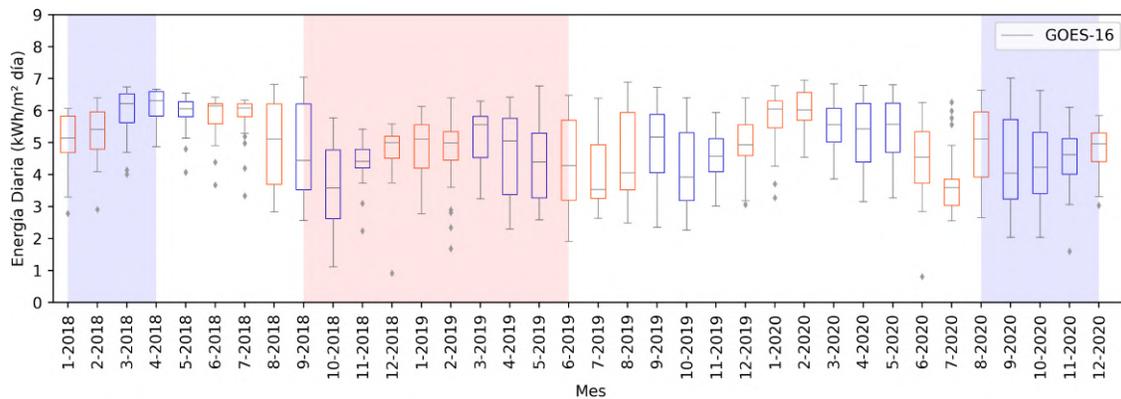


Figura B.8: Energía media diaria calculada con base en las estimaciones de radiación solar del satélite GOES-16 en el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020

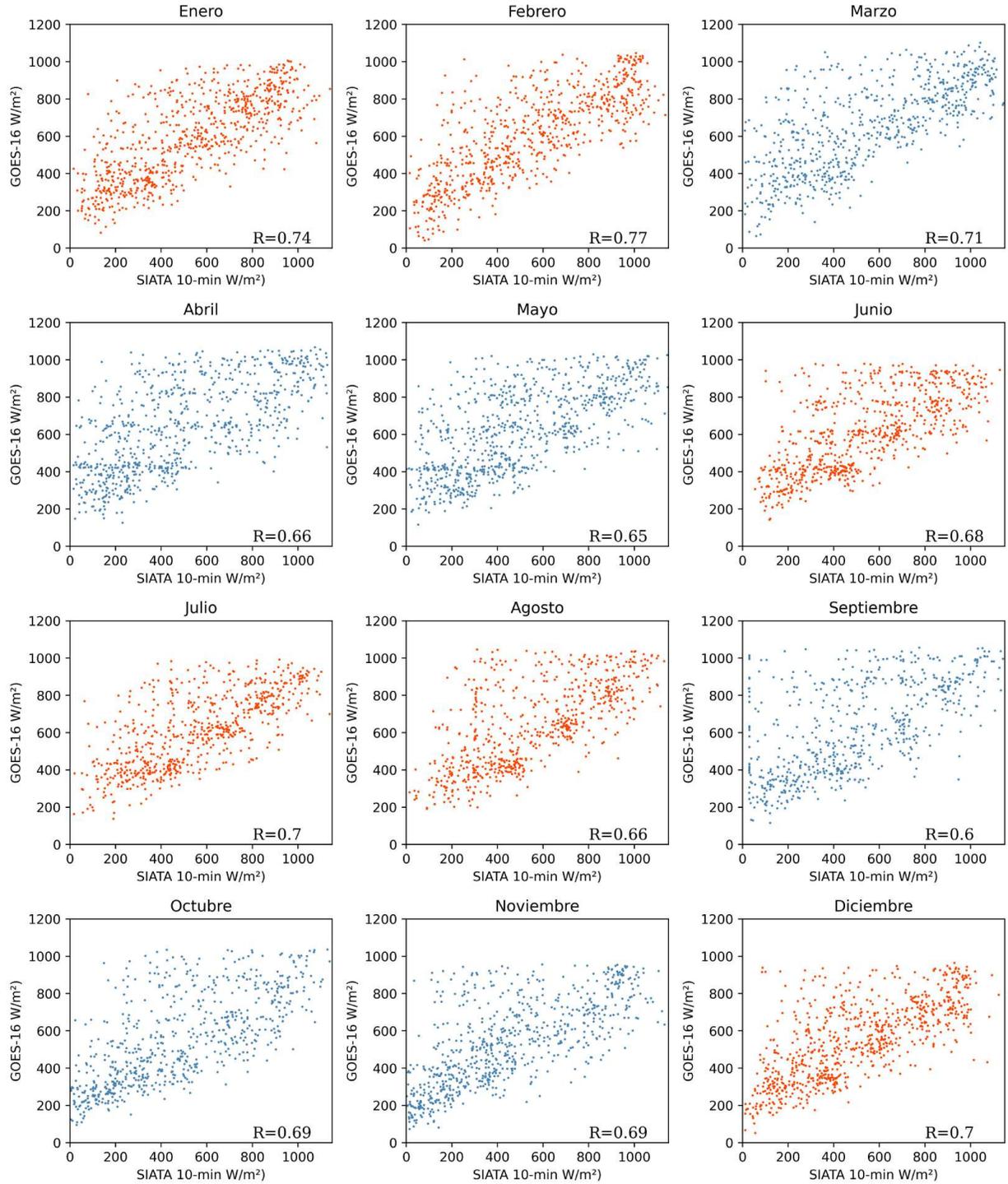


Figura B.9: Correlación entre los promedios horarios de radiación solar de GOES-16 y de las observaciones de SIATA 10-min, para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.

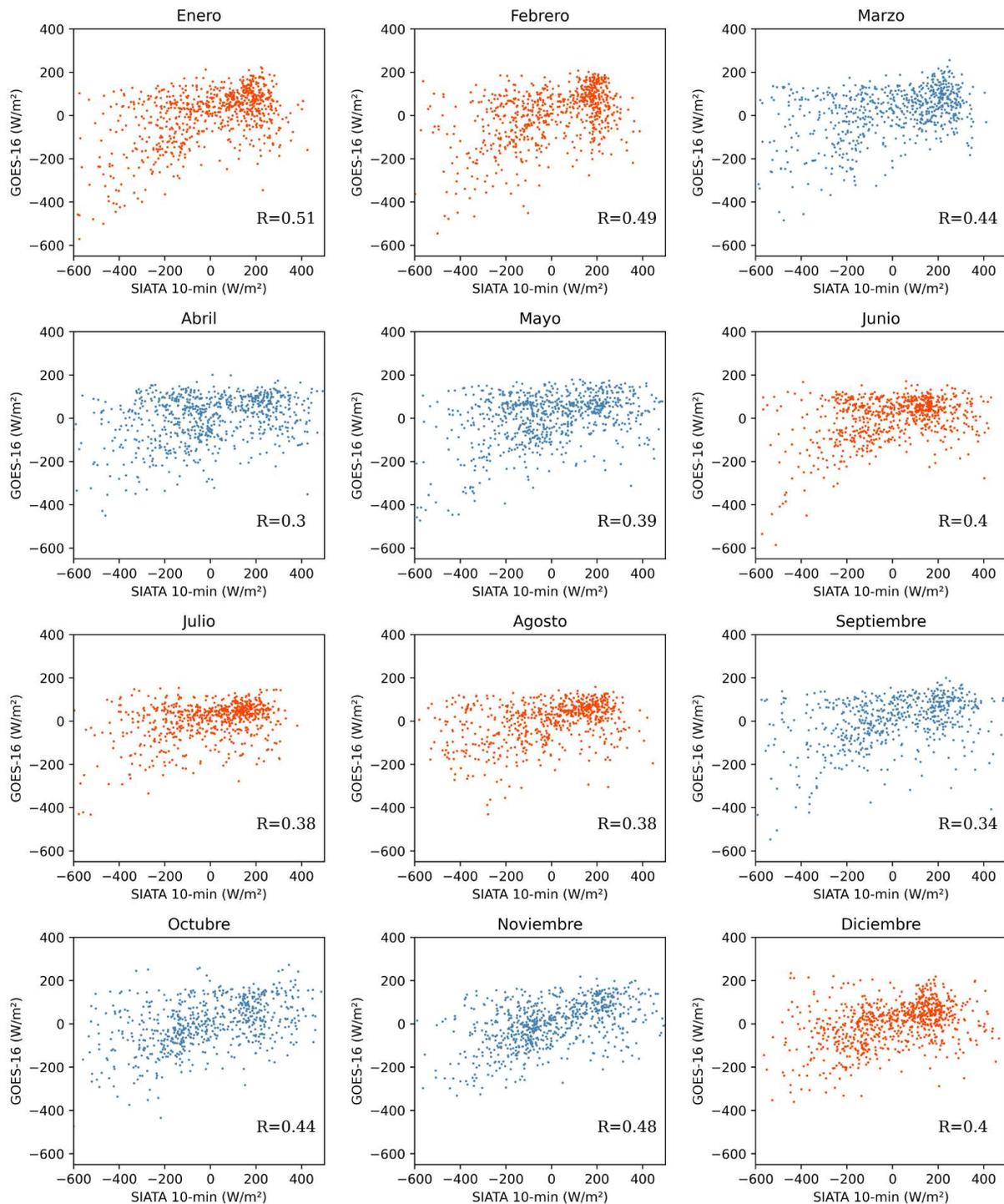


Figura B.10: Correlación entre las anomalías horarias de radiación solar de GOES-16 y de las observaciones de SIATA 10-min, para el período comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.

Anexo C

Información complementaria de la radiación solar derivada del reanálisis ERA5

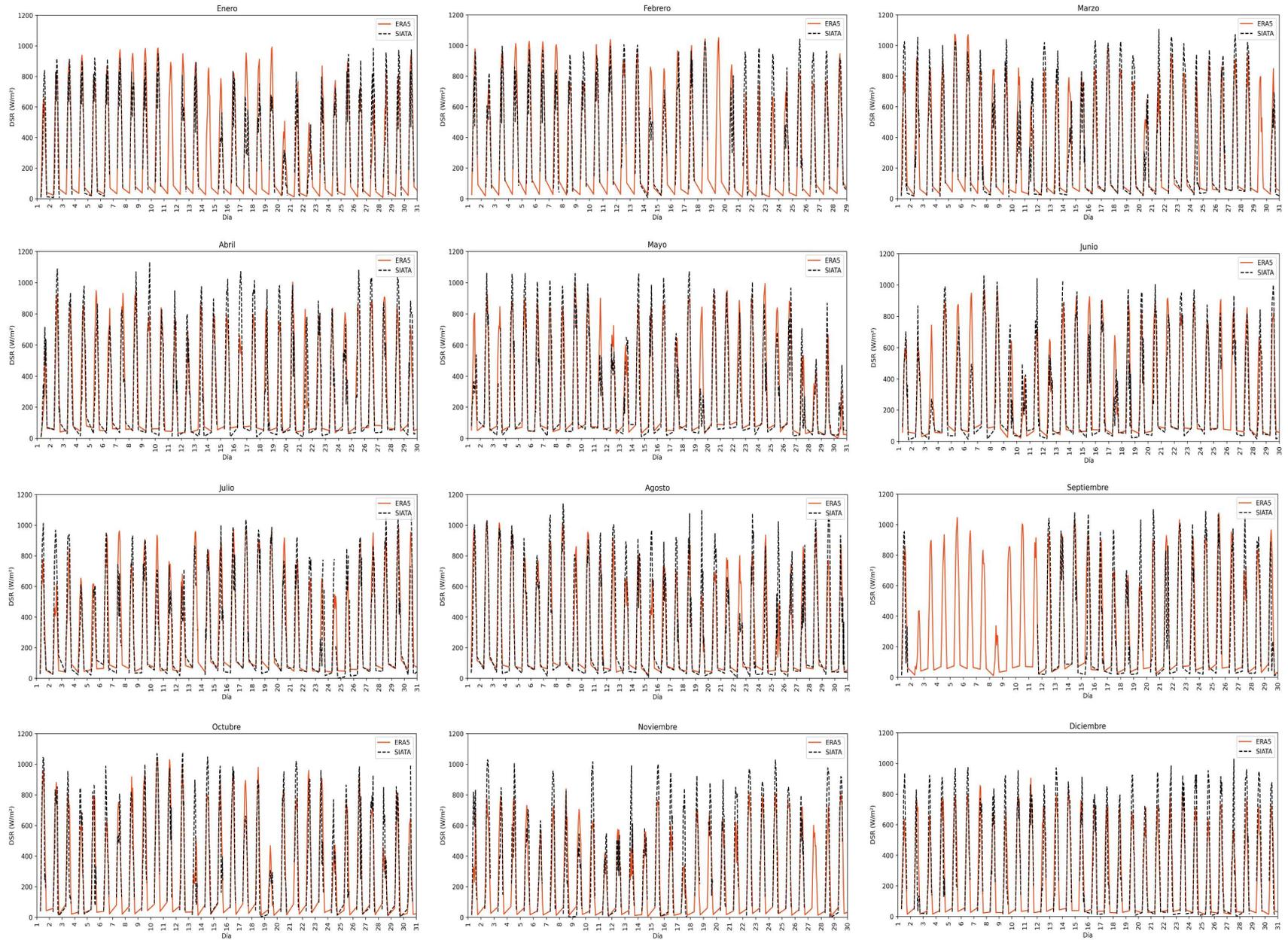


Figura C.1: Serie de tiempo de los promedios horarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2017 a partir de las estimaciones del reanálisis ERA5 vs los registros de SIATA.

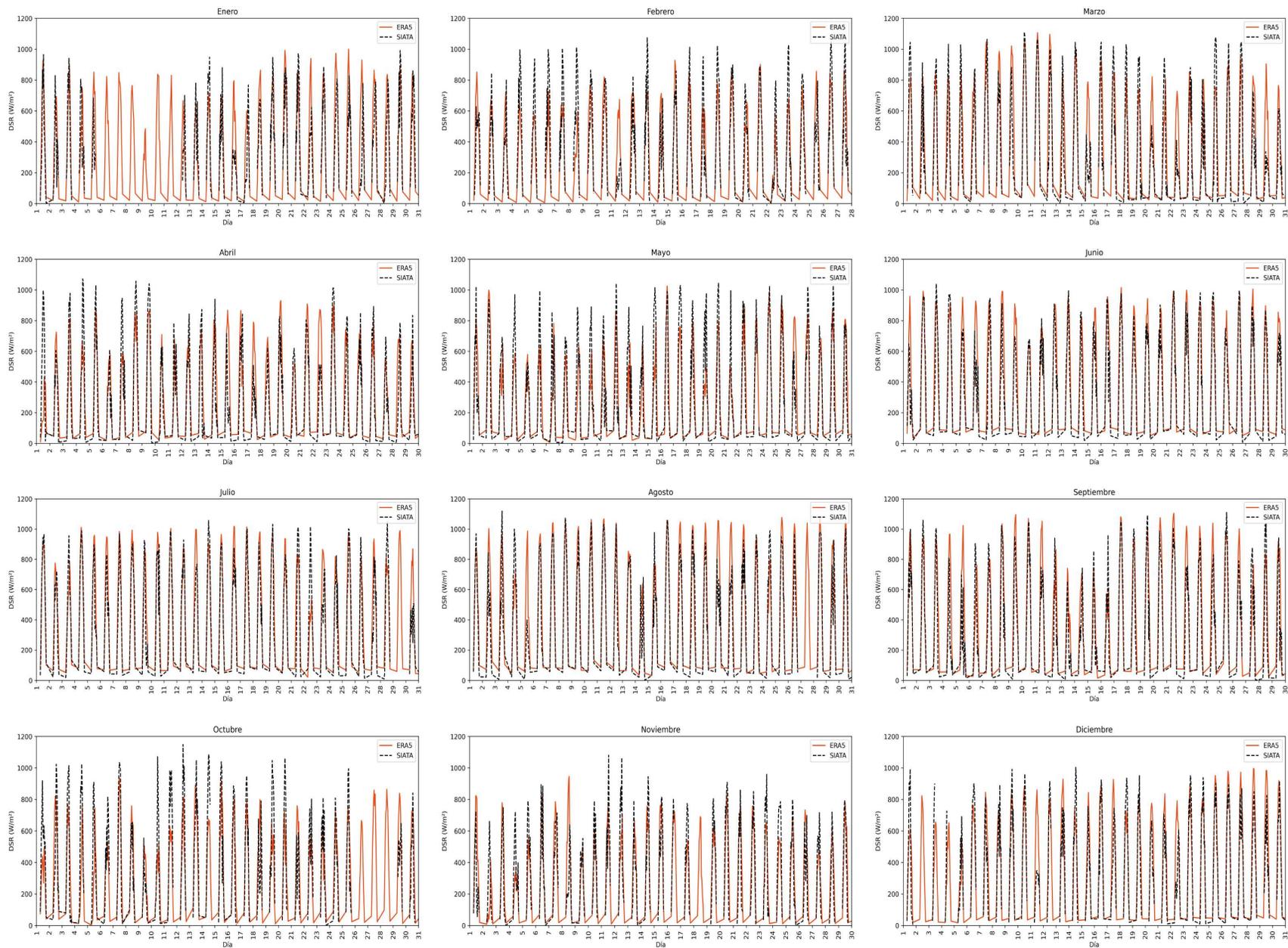


Figura C.2: Serie de tiempo de los promedios horarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2018 a partir de las estimaciones del reanálisis ERA5 vs los registros de SIATA.

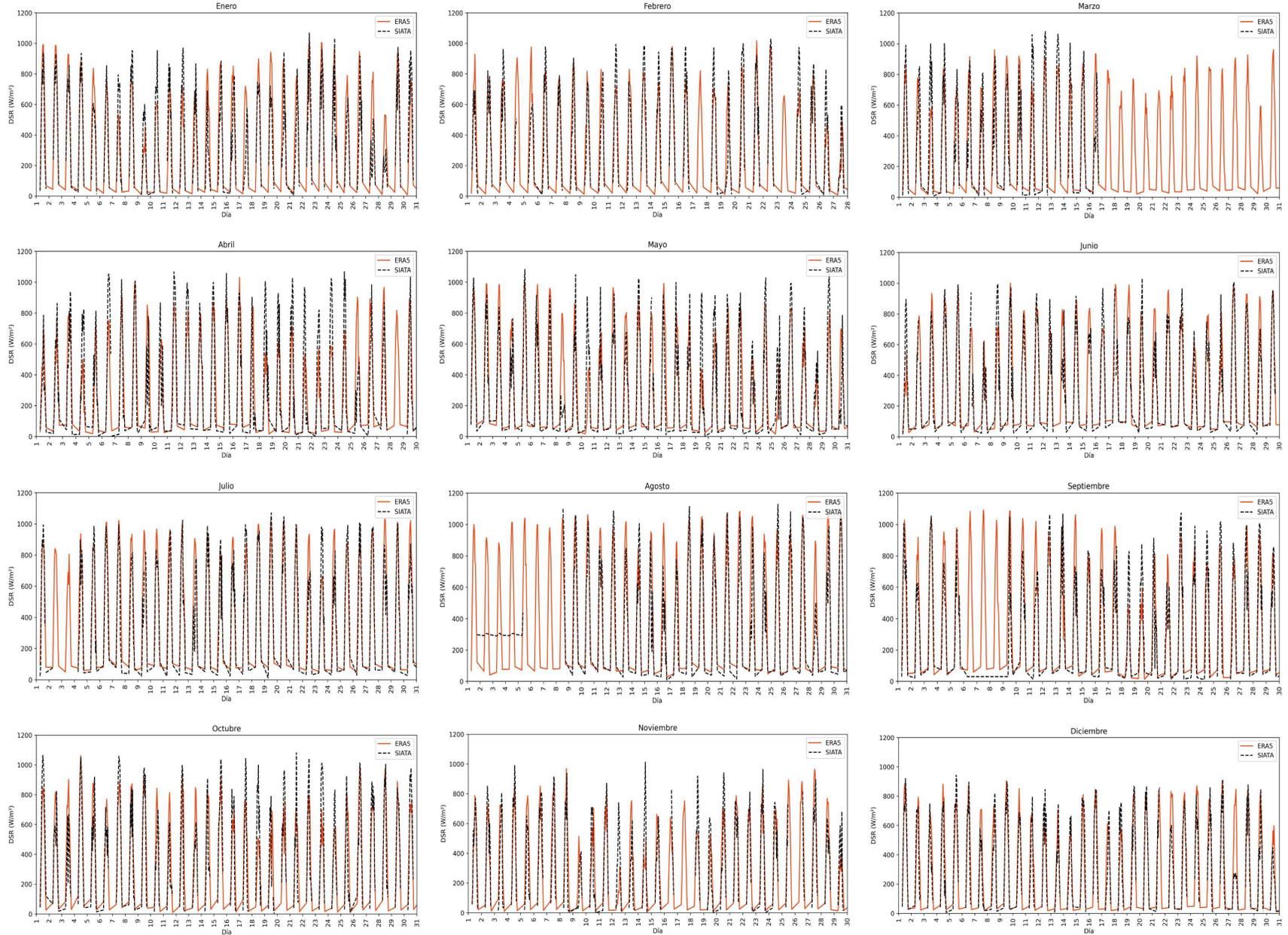


Figura C.3: Serie de tiempo de los promedios horarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2019 a partir de las estimaciones del reanálisis ERA5 vs los registros de SIATA.

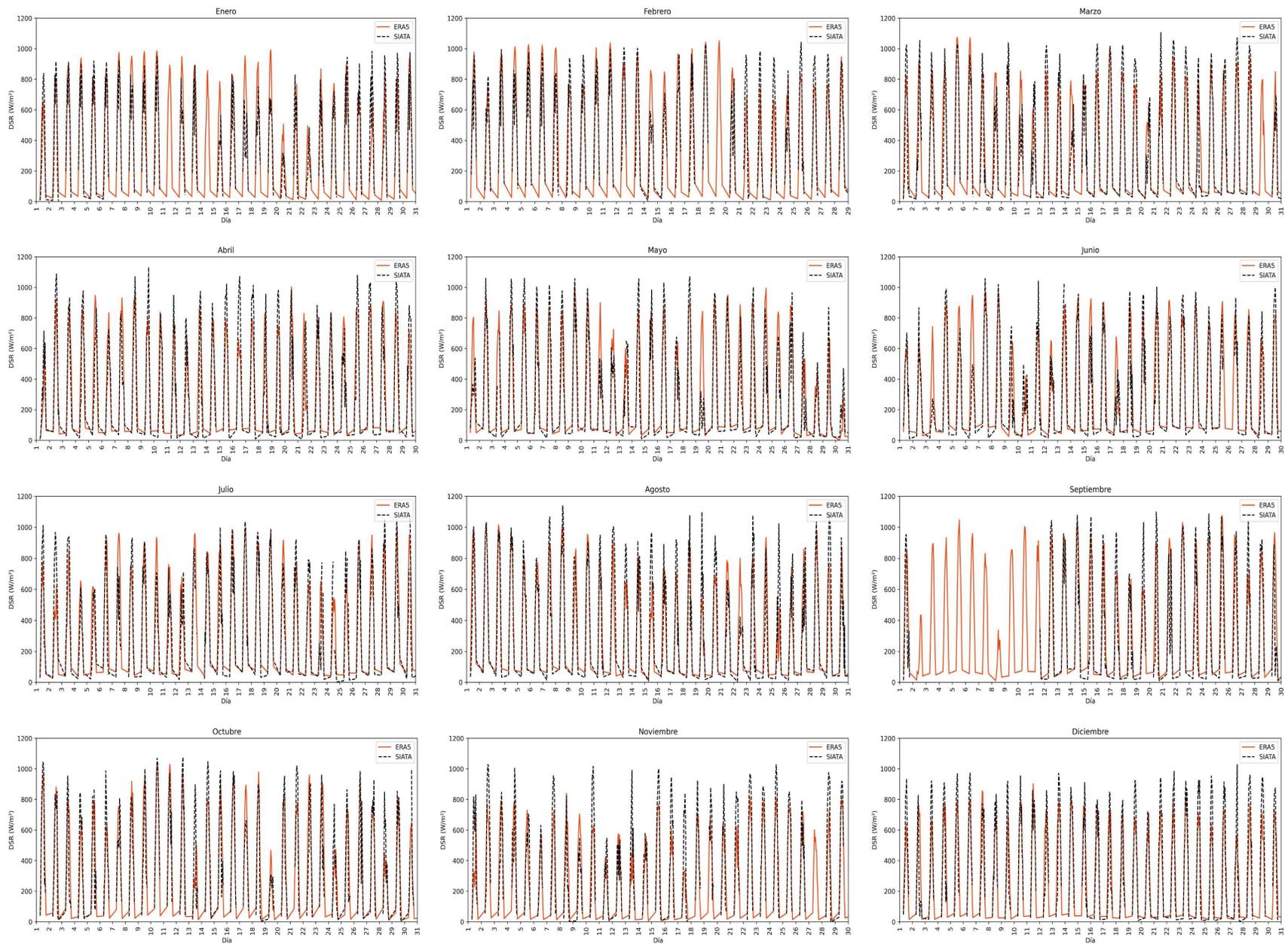


Figura C.4: Serie de tiempo de los promedios horarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2020 a partir de las estimaciones del reanálisis ERA5 vs los registros de SIATA.

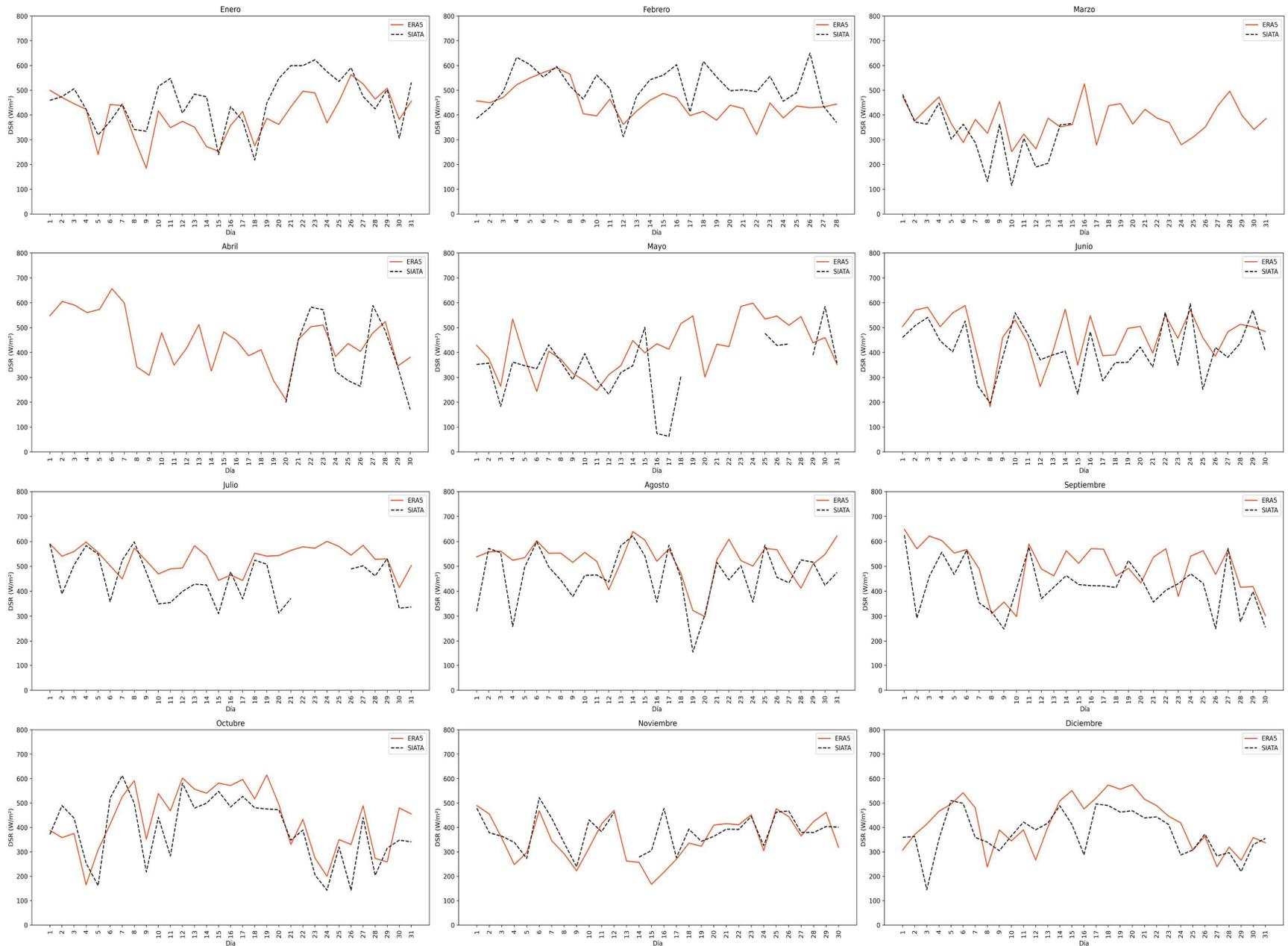


Figura C.5: Serie de tiempo de los promedios diarios de irradiación solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2017 según las estimaciones del reanálisis ERA5 vs los registros de SIATA.

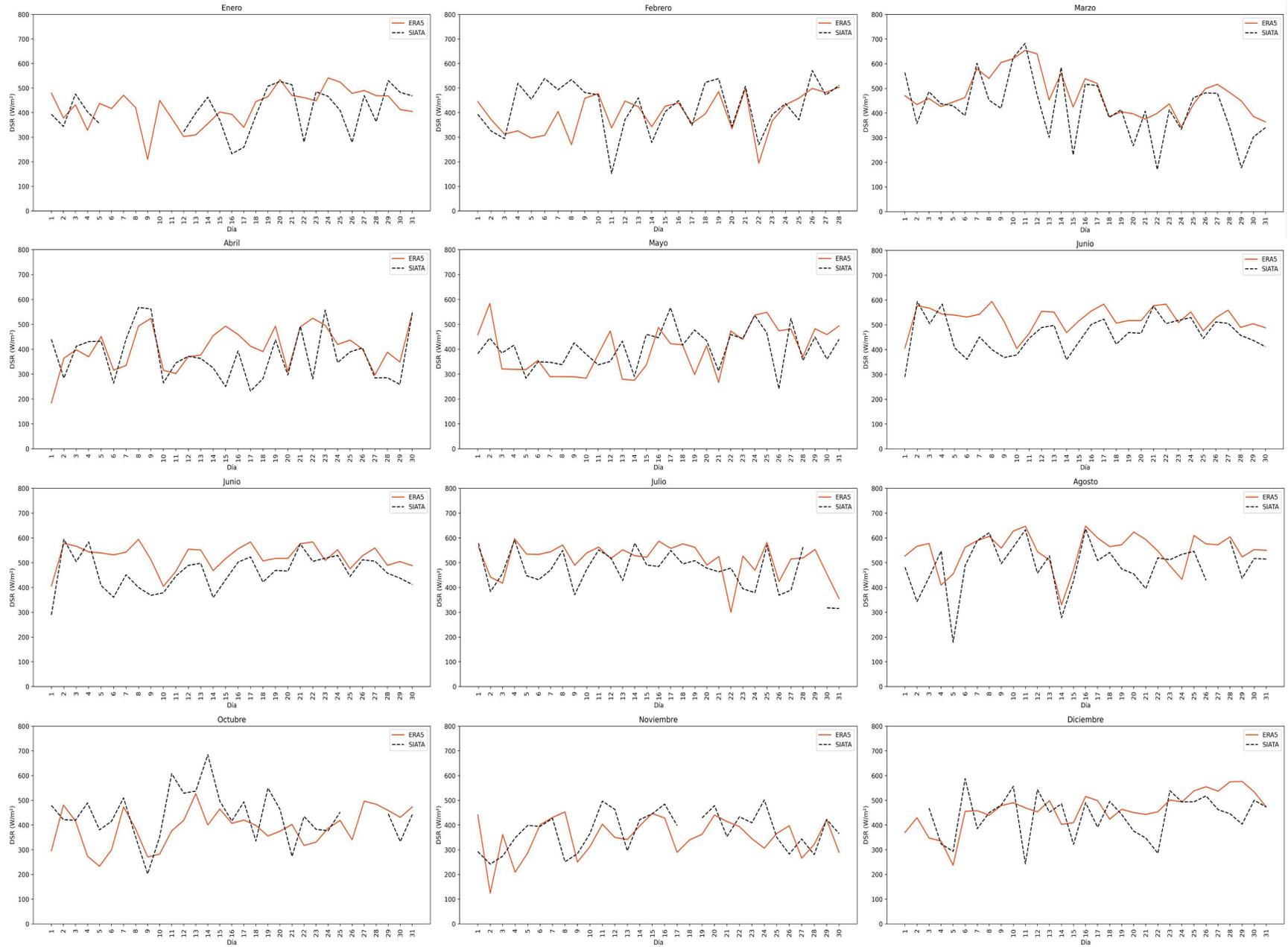


Figura C.6: Serie de tiempo de los promedios diarios de irradiación solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2018 según las estimaciones del reanálisis ERA5 vs los registros de SIATA.

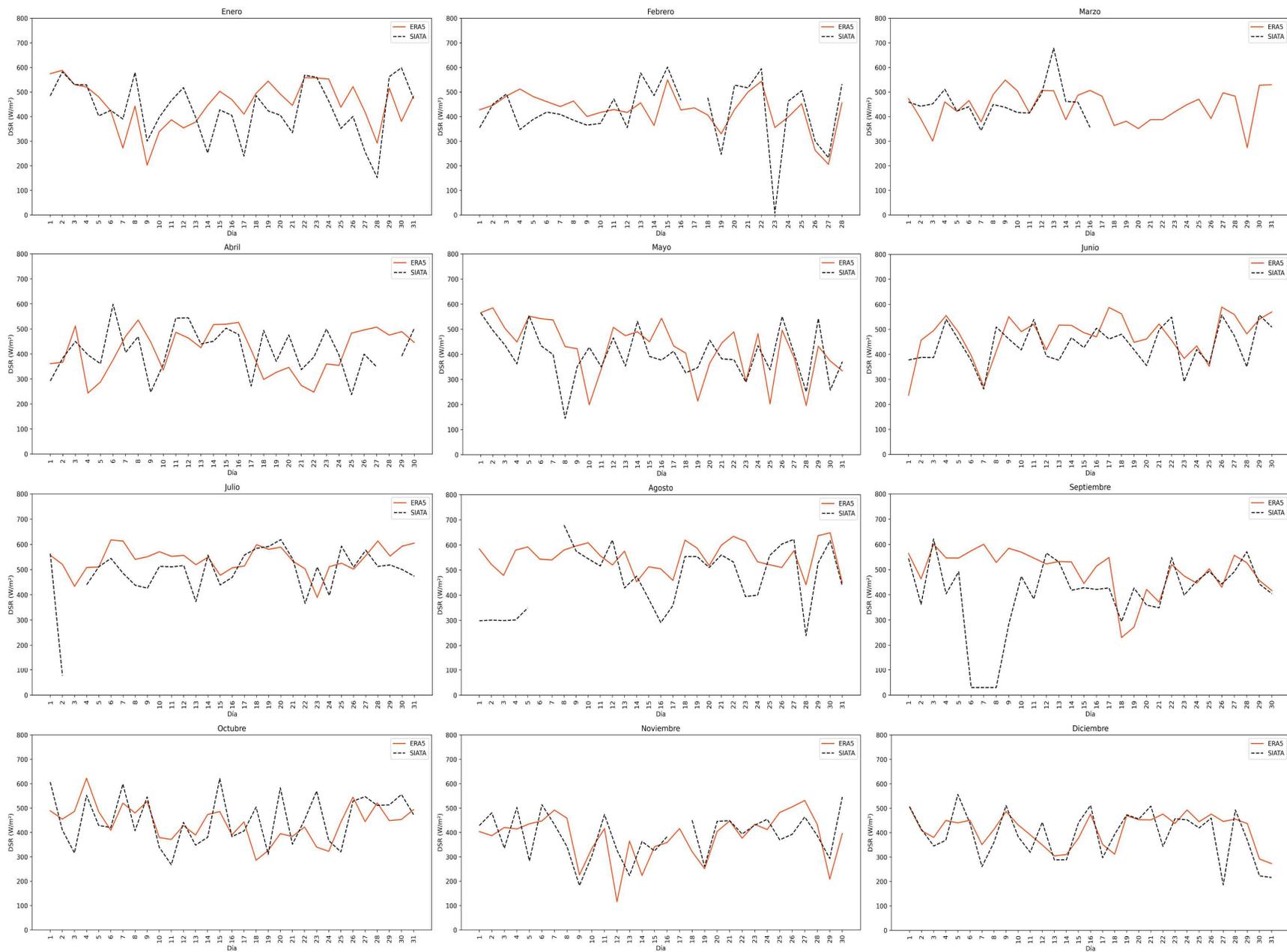


Figura C.7: Serie de tiempo de los promedios diarios de irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2019 según las estimaciones del reanálisis ERA5 vs los registros de SIATA.

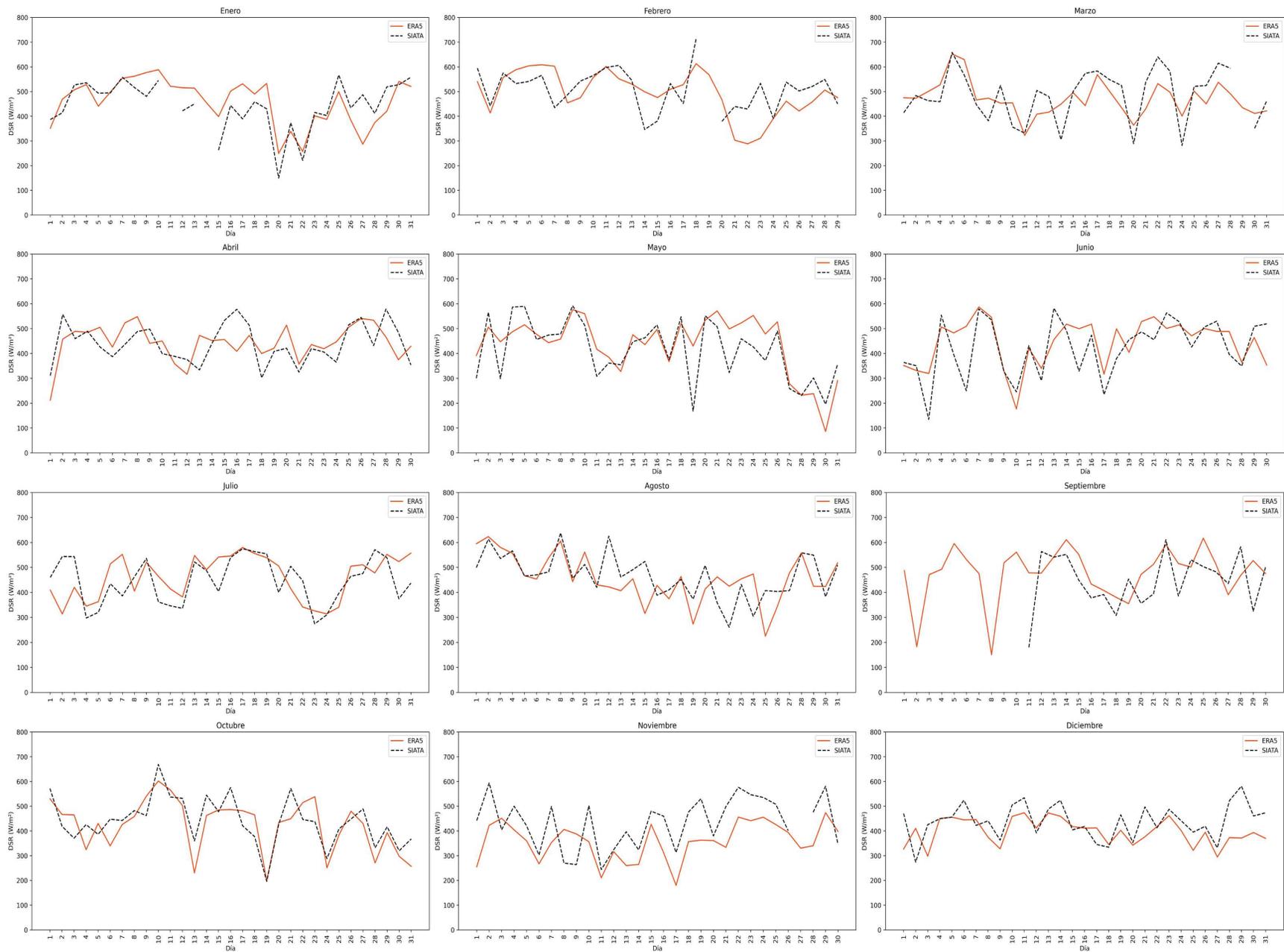


Figura C.8: Serie de tiempo de los promedios diarios de irradiación solar sobre la superficie del Valle de Aburrá en el año 2020 según las estimaciones del reanálisis ERA5 vs los registros de SIATA.

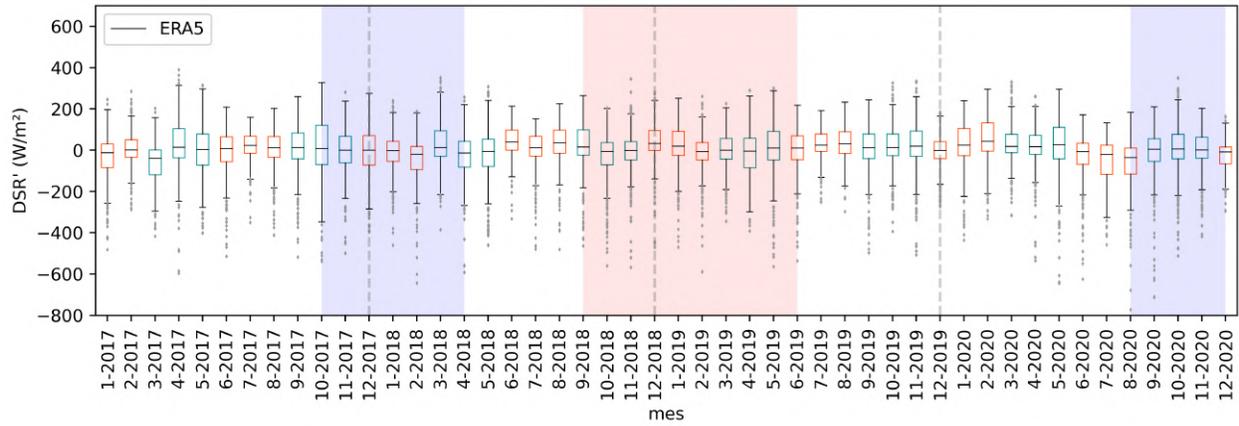


Figura C.9: Anomalías horarias de la irradiación solar en superficie obtenidas a partir de las estimaciones del reanálisis ERA5 en el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020

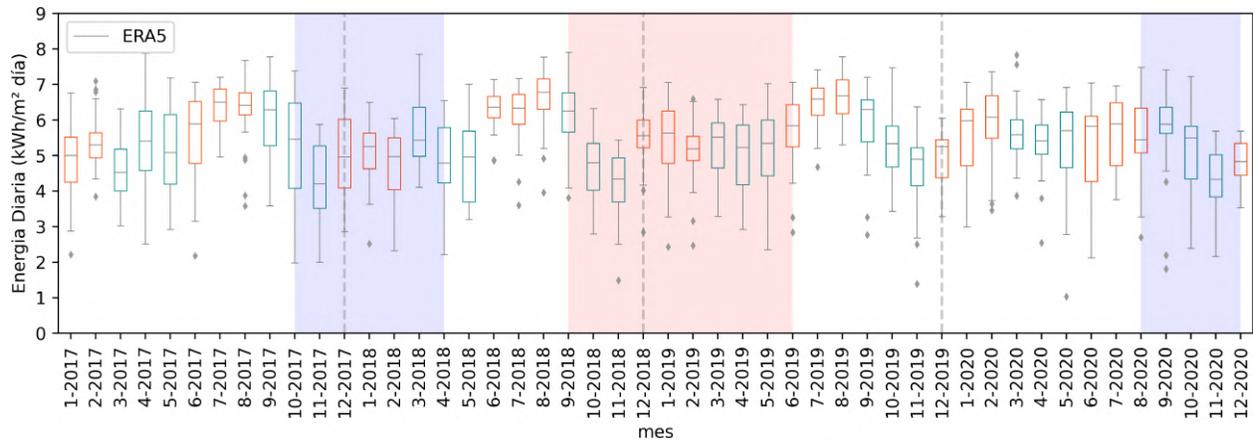


Figura C.10: Energía media diaria calculada con base en las estimaciones de radiación solar del reanálisis ERA5 en el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020

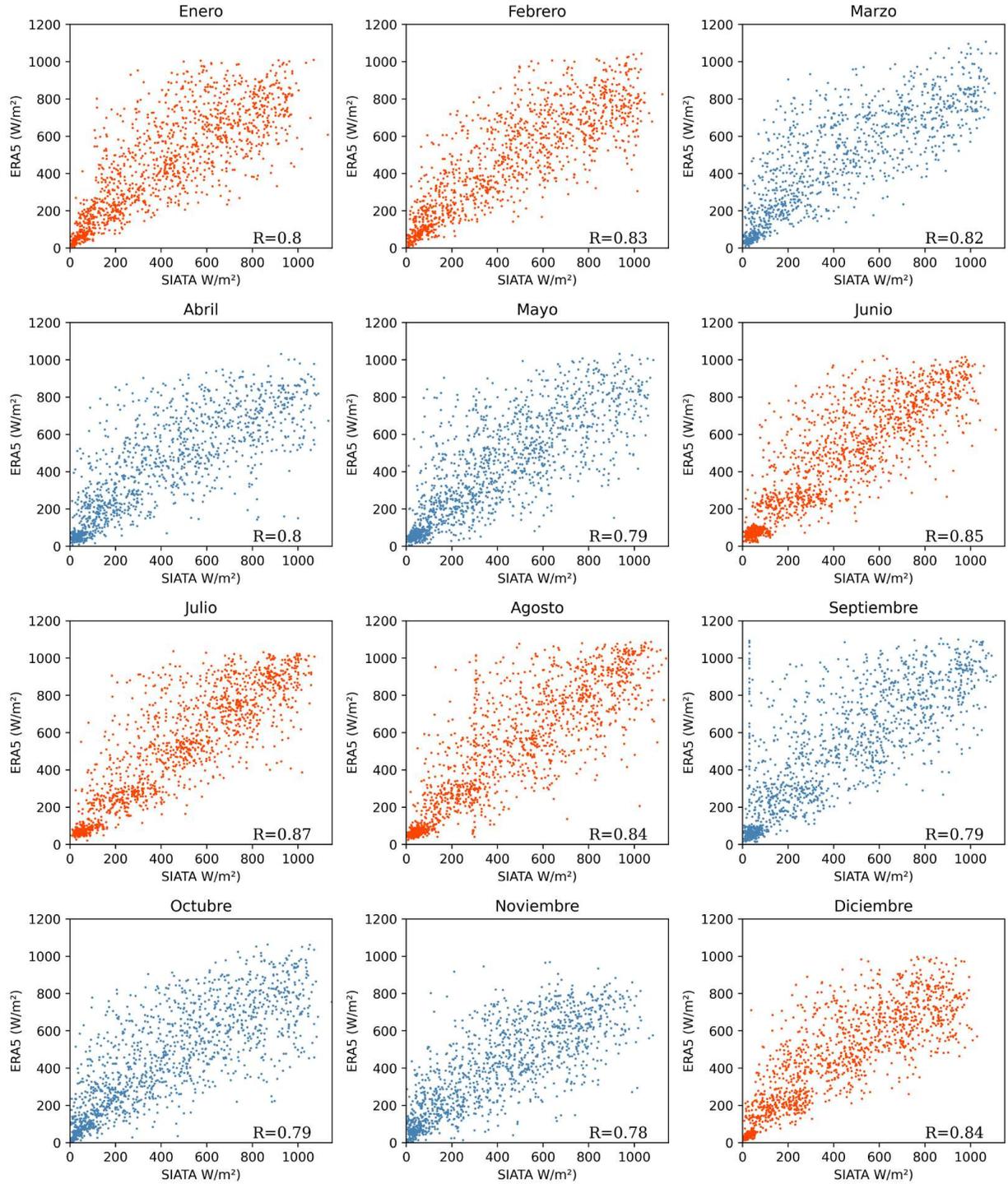


Figura C.11: Correlación entre los promedios horarios de radiación solar del reanálisis ERA5 y de las observaciones de SIATA, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.

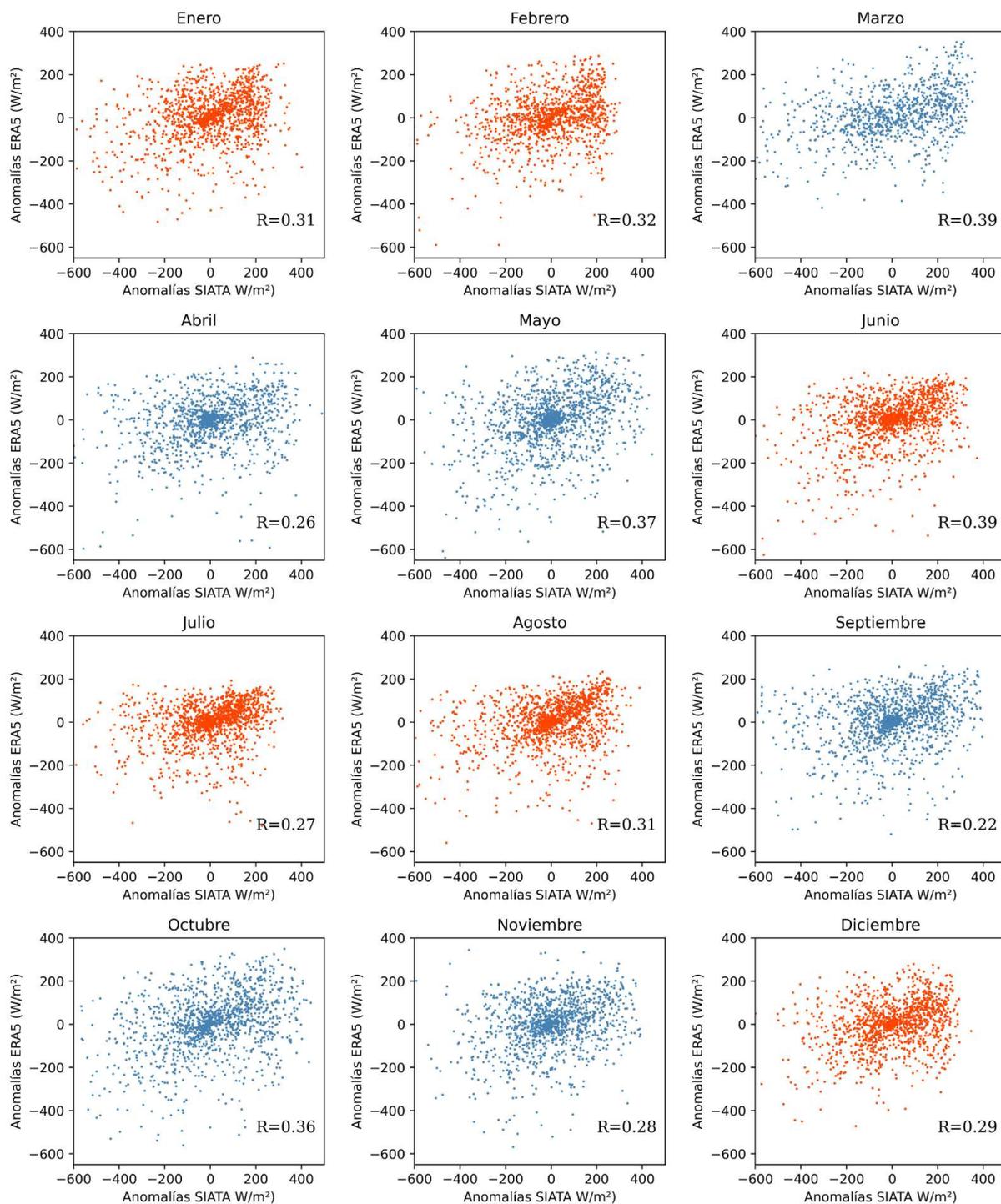


Figura C.12: Correlación entre las anomalías horarias de radiación solar del reanálisis ERA5 y de las observaciones de SIATA, para el período comprendido entre enero de 2017 y diciembre de 2020, en el Valle de Aburrá.

Referencias

- Almorox, J. & Hontoria, C. (2004). Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. *Energy Conversion and Management*, 45(9-10), 1529–1535.
- Babar, B., Graverson, R., & Boström, T. (2019). Solar radiation estimation at high latitudes: Assessment of the cmsaf databases, asr and era5. *Solar Energy*, 182, 397–411.
- Badescu, V. (2008). *Modeling solar radiation at the earth's surface*, volume 1. Springer.
- Bale, C. S., Varga, L., & Foxon, T. J. (2015). Energy and complexity: New ways forward. *Applied Energy*, 138, 150–159.
- Bedoya-Soto, J. M., Aristizábal, E., Carmona, A. M., & Poveda, G. (2019). Seasonal shift of the diurnal cycle of rainfall over Medellín's valley, central Andes of Colombia (1998–2005). *Frontiers in Earth Science*, 7, 92.
- Camargo, L. R. & Schmidt, J. (2020). Simulation of multi-annual time series of solar photovoltaic power: Is the era5-land reanalysis the next big step? *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100829.
- DANE (2020). *Censo nacional de población y vivienda 2018 - Valle de Aburrá*. Technical report, Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).
- Dincer, F. (2011). The analysis on photovoltaic electricity generation status, potential and policies of the leading countries in solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 713–720.
- Gómez, J. R. (2017). La energía solar fotovoltaica en Colombia: potenciales, antecedentes y perspectivas.
- Gong, J., Li, C., & Wasielewski, M. R. (2019). Advances in solar energy conversion. *Chemical Society Reviews*, 48(7), 1862–1864.
- González, J. F. B., Sepúlveda, A. L., Aponte, K. T., et al. (2014). *Zonas no interconectadas eléctricamente en Colombia: problemas y perspectiva*. Technical report, Universidad Nacional de Colombia-FCE-CID.
- Goodman, S. J., Schmit, T. J., Daniels, J., & Redmon, R. J. (2019). *The GOES-R series: a new generation of geostationary environmental satellites*. Elsevier.
- Henao, F., Rodríguez, Y., Viteri, J. P., & Dyer, I. (2019). Optimising the insertion of renewables in the Colombian power sector. *Renewable Energy*, 132, 81–92.
- Henao, F., Viteri, J. P., Rodríguez, Y., Gómez, J., & Dyer, I. (2020). Annual and interannual complementarities of renewable energy sources in Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110318.
- Hennermann, K. & Guillory, A. (2021). Era5: Data documentation. Last accessed 10 April 2021.
- Herrera-Mejía, L. & Hoyos, C. D. (2019). Characterization of the atmospheric boundary layer in a narrow tropical valley using remote-sensing and radiosonde observations and the WRF model: the Aburrá valley case-study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(723), 2641–2665.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J.,

- Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., et al. (2020). The era5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049.
- Iqbal, M. (2012). *An introduction to solar radiation*. Elsevier.
- Jiang, H., Yang, Y., Bai, Y., & Wang, H. (2020). Evaluation of the total, direct, and diffuse solar radiations from the era5 reanalysis data in china. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(1), 47–51.
- Kaygusuz, K. (2012). Energy for sustainable development: A case of developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1116–1126.
- Laszlo, I., Liu, H., Kim, H.-Y., & Pinker, R. T. (2020). Shortwave radiation from abi on the goes-r series. In *The GOES-R Series* (pp. 179–191). Elsevier.
- Li, K., Feng, W., Xu, J., Gao, P., Yang, L., Liang, H., & Zhan, L. (2012). Why is the solar constant not a constant? *The Astrophysical Journal*, 747(2), 135.
- Liou, K.-N. (2002). *An introduction to atmospheric radiation*. Elsevier.
- Liu, B. & Jordan, R. (1960). The interrelationship and of direct, diffuse and characteristic distribution total solar radiation. *Solar Energy*, 4(3), 1–19.
- Lohmann, G. M., Monahan, A. H., & Heinemann, D. (2016). Local short-term variability in solar irradiance. *Atmospheric chemistry and physics*, 16(10), 6365–6379.
- Mesa Sánchez, Ó. J., Poveda Jaramillo, G., Vélez Upegui, J. I., Mejía Valencia, J. F., Hoyos Ortiz, C. D., Mantilla Gutiérrez, R., Barco Mejía, O. J., Cuartas Pineda, L. A., Botero Hernández, B., & Montoya, M. I. (2000). Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en colombia.
- Moreno-Tejera, S., Silva-Pérez, M. A., Lillo-Bravo, I., & Ramírez-Santigosa, L. (2016). Solar resource assessment in seville, spain. statistical characterisation of solar radiation at different time resolutions. *Solar Energy*, 132, 430–441.
- NOAA (2018). *GOES-16 ABI L2 + Shortwave Radiation Budget (SBR) Release Provisional Data Quality. 3*. Technical report, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), (United States).
- Pagola, I., Gastón, M., Fernández-Peruchena, C., Moreno, S., & Ramírez, L. (2010). New methodology of solar radiation evaluation using free access databases in specific locations. *Renewable Energy*, 35(12), 2792–2798.
- Polo, J., Wilbert, S., Ruiz-Arias, J. A., Meyer, R., Gueymard, C., Suri, M., Martín, L., Mieslinger, T., Blanc, P., Grant, I., et al. (2016). Preliminary survey on site-adaptation techniques for satellite-derived and reanalysis solar radiation datasets. *Solar Energy*, 132, 25–37.
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 28(107), 201–222.
- Poveda, G. & Mesa, O. (1999). La corriente de chorro superficial del oeste (“del chocó”) y otras dos corrientes de chorro en colombia: climatología y variabilidad durante las fases del enso. *Revista Académica Colombiana de Ciencia*, 23(89), 517–528.
- Poveda, G., Mesa, O. J., Salazar, L. F., Arias, P. A., Moreno, H. A., Vieira, S. C., Agudelo, P. A., Toro, V. G., & Alvarez, J. F. (01 Jan. 2005). The diurnal cycle of precipitation in the tropical andes of colombia. *Monthly Weather Review*, 133(1), 228 – 240.
- Právělie, R., Patriche, C., & Bandoc, G. (2019). Spatial assessment of solar energy potential at global scale. a geographical approach. *Journal of Cleaner Production*, 209, 692–721.
- Ramachandra, T. (2006). Solar energy potential assessment using gis. *Energy Education Science and Technology*, 18(1/2), 101.
- Ren, G., Wan, J., Liu, J., & Yu, D. (2019). Spatial and temporal assessments of complementarity for renewable energy resources in china. *Energy*, 177, 262–275.
- Robledo-Delgado, V. (2020). Validación de datos satelitales de irradiancia solar de goes-east sobre

medellín-colombia.

- Salazar, G., Gueymard, C., Galdino, J. B., de Castro Vilela, O., & Fraidenraich, N. (2020). Solar irradiance time series derived from high-quality measurements, satellite-based models, and reanalyses at a near-equatorial site in brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109478.
- Schmit, T. J., Lindstrom, S. S., Gerth, J. J., & Gunshor, M. M. (2018). Applications of the 16 spectral bands on the advanced baseline imager (abi).
- Sengupta, M., Habte, A., Gueymard, C., Wilbert, S., & Renné, D. (2017). *Best practices handbook for the collection and use of solar resource data for solar energy applications*. Technical report, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- SPE (2020). Global market outlook for solar power 2020–2024. *Solar Power Europe: Brussels, Belgium*.
- SSPD (2019). Zonas no interconectadas-zni: Diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica 2019. *Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios-SSPD*, 68.
- Stanhill, G. & Cohen, S. (2001). Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agricultural and forest meteorology*, 107(4), 255–278.
- Stoffel, T., Renné, D., Myers, D., Wilcox, S., Sengupta, M., George, R., & Turchi, C. (2010). *Concentrating Solar Power: Best practices handbook for the collection and use of solar resource data (CSP)*. Technical report, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Suehrcke, H. & McCormick, P. (1988). The frequency distribution of instantaneous insolation values. *Solar energy*, 40(5), 413–422.
- UPME & IDEAM (2019). *Atlas de Radiación solar de Colombia*.
- Urrego-Ortiz, J., Martínez, J. A., Arias, P. A., & Jaramillo-Duque, Á. (2019). Assessment and day-ahead forecasting of hourly solar radiation in medellín, colombia. *Energies*, 12(22), 4402.
- Wallace, J. M. & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey*, volume 92. Elsevier.
- Zapata, S., Castaneda, M., Jimenez, M., Aristizabal, A. J., Franco, C. J., & Dyner, I. (2018). Long-term effects of 100% renewable generation on the colombian power market. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 30, 183–191.
- Zawilska, E. & Brooks, M. (2011). An assessment of the solar resource for durban, south africa. *Renewable Energy*, 36(12), 3433–3438.
- Zuluaga, C. F., Avila-Diaz, A., Justino, F. B., & Wilson, A. B. (2021). Climatology and trends of downward shortwave radiation over brazil. *Atmospheric Research*, 250, 105347.