



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### VALIDACIÓN DE DATOS SATELITALES DE RADIACIÓN SOLAR UTILIZANDO MEDICIONES TERRESTRES PARA EL ECUADOR

#### TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**VACA REVELO DIEGO GUSTAVO**

diego.vaca@epn.edu.ec

**DIRECTOR:**

**Dr. ORDÓÑEZ MALLA FREDDY**

freddy.ordonez@epn.edu.ec

**CODIRECTOR:**

**Dr. LÓPEZ VILLADA JESÚS**

jesus.lopez@epn.edu.ec

Quito, marzo 2018

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Diego Gustavo Vaca Revelo**, bajo nuestra supervisión.

---

Dr. Freddy Ordóñez Malla

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

---

Dr. Jesús López Villada

**CODIRECTOR DEL PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Yo, **Diego Gustavo Vaca Revelo**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Diego Gustavo Vaca Revelo

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo y la culminación de esta gran etapa en mi vida a mis padres Alfonso Vaca y Yolanda Revelo por enseñarme el camino hacia la superación y guiarme para cumplir mis metas.

Igualmente a mis hermanas por demostrarme que no existe lo imposible cuando se lucha por lo que uno más quiere.



## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco al Dr. Freddy Ordóñez y Dr. Jesús López, director y codirector de tesis, por su invaluable colaboración y paciencia para el desarrollo de este proyecto.

De igual manera reconozco gratamente a la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) por la ayuda prestada al facilitar los datos de irradiación solar de sus estaciones meteorológicas y responder varias interrogantes surgidas en el transcurso del desarrollo del proyecto.

Al Dr. Jesús Portilla por enseñarme las bases de la estadística descriptiva, cuyas herramientas fueron de gran ayuda para la realización de este trabajo.

Además, reconozco a Valeria Díaz y Carlos Bolaños, miembros de la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito; José Olmedo, José Bracero, Santiago Ramón, Iván Rodríguez y César Tonato, integrantes del INAMHI; y a Geovanna Villacreses, miembro del INER; por la ayuda brindada y el interés en el desarrollo de esta investigación.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

Certificación .....	i
Declaración.....	ii
Dedicatoria .....	iii
Agradecimiento .....	iv
Índice de figuras .....	viii
Índice de tablas .....	xi
Resumen.....	xii
Abstract .....	xiii
Glosario de términos.....	xiv
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
Pregunta de Investigación.....	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
Alcance .....	2
<b>1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
1.1. Componentes medibles de irradiancia solar.....	4
1.2. Instrumentos de mediación de irradiancia solar .....	5
1.3. Bases de datos mundiales de radiación solar .....	6
1.4. Datos satelitales de radiación solar para el Ecuador .....	7
1.4.1. <i>NASA Surface Meteorological and Solar Energy (SSE)</i> .....	7
1.4.2. <i>Global solar atlas</i> .....	8
1.4.3. <i>National Renewable Energy Laboratory (NREL)</i> .....	9
1.5. Método de obtención de datos de NREL .....	10
1.5.1. Validación de datos obtenidos por NREL.....	12
1.6. Base de datos medidos de irradiación solar en Ecuador .....	13
1.7. Atlas solar del Ecuador .....	14
1.8. Paquete computacional para realizar un estudio estadístico comparativo.....	15

<b>2. METODOLOGÍA.....</b>	<b>17</b>
2.1. Estaciones meteorológicas seleccionadas .....	17
2.2. Metodología aplicada a la estación meteorológica Belisario.....	21
2.2.1. Obtención de datos de irradiancia solar .....	21
2.2.2. Organización de datos de irradiancia solar .....	21
2.2.2.1. Optimización de datos de irradiación solar .....	22
2.2.2.2. Agregación general de datos de irradiación solar.....	23
2.2.2.3. Diversas desagregaciones y agregaciones de datos de irradiación solar.....	23
2.2.3. Estadística descriptiva de los datos de irradiación solar.....	25
2.2.4. Estadística comparativa de los datos de irradiación solar .....	26
2.2.4.1. Estadística comparativa gráfica de los datos de irradiación solar .....	26
2.2.4.2. Indicadores estadísticos de comparación para datos de irradiación solar .....	27
2.2.5. Estadística predictiva.....	31
2.3. Metodología condensada aplicada al resto de estaciones meteorológicas .....	32
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>33</b>
3.1. Estación meteorológica Belisario .....	33
3.1.1. Estadística descriptiva .....	35
3.1.1.1. Series de tiempo.....	35
3.1.1.2. Desagregación horaria .....	36
3.1.1.3. Agregación de datos de la mañana y tarde.....	38
3.1.1.4. Agregación mensual .....	45
3.1.1.5. Agregación anual.....	46
3.1.2. Comparación de los datos terrestres y satelitales de irradiancia solar .....	47
3.1.2.1. Parámetros estadísticos de comparación aplicados a cada hora del día.....	48
3.1.2.2. Hipótesis de nubosidad.....	50
3.1.2.3. Indicadores estadísticos de comparación: .....	51
3.1.3. Estadística predictiva mensual.....	53
3.2. Estaciones meteorológicas operadas por la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito .....	54
3.3. Estaciones meteorológicas operadas por INAMHI.....	57
3.4. Estaciones meteorológicas operadas por INER.....	62
3.4.1. Irradiación horizontal global (GHI).....	63
3.4.2. Irradiación difusa horizontal (DHI) .....	66
3.5. Resumen de resultados .....	71

<b>4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>74</b>
4.1. Conclusiones.....	74
4.2. Recomendaciones .....	76
4.3. Trabajos futuros .....	77
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>78</b>
ANEXO I. COMPARACIÓN DE LOS SOFTWARES MATLAB, PYTHON Y R STUDIO .....	82
ANEXO II. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS SELECCIONADAS .....	87
ANEXO III. DESCARGA DE DATOS METEOROLÓGICOS DE LA PÁGINA WEB DEL NREL.....	91
ANEXO IV. INDICADORES ESTADÍSTICOS CALCULADOS PARA CADA ESTACIÓN .....	94
ANEXO V. DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL .....	108

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 1

Figura 1. 1. Interacción de la irradiancia con la atmósfera terrestre.....	4
Figura 1. 2. (a) Piranómetro SR11 (b) Pirheliómetro DR02. ....	5
Figura 1. 3. <i>NASA Surface meteorology and Solar Energy</i> . ....	7
Figura 1. 4. Global solar atlas. ....	8
Figura 1. 5. Alcance geográfico de NREL-Physical Solar Model.....	9
Figura 1. 6. Ubicación de los satélites geoestacionarios alrededor de la Tierra.....	10
Figura 1. 7. PSM para estimar irradiancia solar. ....	11
Figura 1. 8. Atlas Solar del Ecuador desarrollado por <i>CONELEC</i> . ....	14

### Capítulo 2

Figura 2. 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas de INAMHI en el Ecuador. ....	18
Figura 2. 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas de la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito. ....	18
Figura 2. 3. Ubicación de las estaciones meteorológicas de INER en (a) el cantón Cuenca, y (b) la provincia de Chimborazo. ....	19
Figura 2. 4. Resumen de la metodología seguida en la estación meteorológica de Belisario. ...	31
Figura 2. 5. Metodología aplicada a las estaciones meteorológicas en esta investigación. ....	32

### Capítulo 3

Figura 3. 1. Infraestructura externa de la estación meteorológica de Belisario.....	33
Figura 3. 2. Placa del piranómetro instalado en la estación meteorológica de Belisario. ....	34
Figura 3. 3. Geografía en la localidad de la estación meteorológica de Belisario. (a) Vista hacia el este, y (b) hacia el oeste.....	34
Figura 3. 4. Series de tiempo para los datos terrestres (a), y satelitales (b) de la estación meteorológica de Belisario de todos los años recopilados.....	35
Figura 3. 5. Serie de tiempo para datos satelitales de la estación meteorológica de Belisario año 2004.....	35
Figura 3. 6. Agregación nocturna para los datos terrestres (a) y satelitales (b) de la estación meteorológica de Belisario de todos los años recopilados.....	36
Figura 3. 7. Desagregación horaria para los datos terrestres (a) y satelitales (b) de la estación meteorológica de Belisario de todos los años recopilados.....	37
Figura 3. 8. Histograma de las agregaciones de la mañana de datos terrestres (a) y satelitales (b) de la estación meteorológica de Belisario de todos los años recopilados.....	38

Figura 3. 9. Probabilidad de supervivencia empírica y teórica de las agregaciones de la mañana de los datos terrestres (a) y satelitales (b) de la estación meteorológica de Belisario.....	39
Figura 3. 10. Comparación de la probabilidad empírica y teórica de supervivencia de las agregaciones de la mañana de los datos terrestres (a) y satelitales (b) para la estación meteorológica de Belisario. ....	40
Figura 3. 11. Histograma de las agregaciones de la tarde de los datos terrestres (a) y satelitales (b) de la estación meteorológica de Belisario.....	41
Figura 3. 12. Probabilidad de supervivencia empírica y teórica de las agregaciones de la tarde de los datos terrestres y satelitales de la estación meteorológica de Belisario. ....	43
Figura 3. 13. Comparación de la probabilidad empírica y teórica de supervivencia de las agregaciones de la tarde de los datos terrestres y satelitales para la estación meteorológica de Belisario.....	44
Figura 3. 14. Resumen mensual de los datos terrestres (a) y satelitales (b) de irradiancia solar de todos los años recopilados.....	45
Figura 3. 15. Resumen anual de los datos terrestres y satelitales de irradiancia solar. ....	46
Figura 3. 16. Comparación del rango intercuartil de los datos terrestres y satelitales de irradiación solar de la estación meteorológica de Belisario. ....	47
Figura 3. 17. Comparación de los datos terrestres y satelitales de irradiación solar horaria y diariamente todos los años recopilados. ....	47
Figura 3. 18. Parámetros estadísticos aplicados a irradiación horaria de la estación meteorológica de Belisario todos los datos recopilados. (a) MAE [W.h/m <sup>2</sup> ], (b) MBE [W.h/m <sup>2</sup> ], (c) RMSE [W.h/m <sup>2</sup> ] y (d) RMSE [%].....	48
Figura 3. 19. Parámetros estadísticos aplicados a irradiación horaria de la estación meteorológica de Belisario diferenciando el factor de nubosidad. (a) MAE [W.h/m <sup>2</sup> ], (b) MBE [W.h/m <sup>2</sup> ], (c) RMSE [W.h/m <sup>2</sup> ] y (d) RMSE [%].....	50
Figura 3. 20. Probabilidad de supervivencia de los datos mensuales de irradiación solar de la estación meteorológica de Belisario. ....	53
Figura 3. 21. Resumen de resultados de las estaciones meteorológicas operadas por la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito en todos los años recopilados. (a) RMSE [%], (b) MBE [%], (c) Probabilidad de acierto según el K-S test y (d) r cuadrado.....	55
Figura 3. 22. Resumen de resultados según la hipótesis de nubosidad planteada de las estaciones meteorológicas operadas por la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito con datos horarios. (a) RMSE [%]. (b) MBE [%].....	56
Figura 3. 23. RMSE [%] de las estaciones meteorológicas operadas por el INAMHI. ....	57
Figura 3. 24. MBE [%] de las estaciones meteorológicas operadas por el INAMHI. ....	58
Figura 3. 25. Probabilidad de aprobación del K-S test de las estaciones meteorológicas operadas por el INAMHI.....	59
Figura 3. 26. R cuadrado de las estaciones meteorológicas operadas por el INAMHI. ....	60
Figura 3. 27. Resumen de resultados según la hipótesis de nubosidad planteada para irradiación horaria de las estaciones meteorológicas operadas por el INAMHI. (a) RMSE [%]. (b) MBE [%]. ....	61

Figura 3. 28. Resumen de resultados de las estaciones meteorológicas operadas por el INER para irradiación horizontal global (GHI). (a) RMSE [%], (b) MBE [%], (c) Probabilidad de acierto según el K-S test y (d) r cuadrado. ....	64
Figura 3. 29. Resumen de resultados según la hipótesis de nubosidad planteada de las estaciones meteorológicas operadas el INER para irradiación horizontal global (GHI) horaria. (a) RMSE [%]. (b) MBE [%].....	65
Figura 3. 30. Resumen de resultados de las estaciones meteorológicas operadas por el INER para irradiación horizontal difusa (DHI). (a) RMSE [%], (b) MBE [%], (c) Probabilidad de acierto según el K-S test y (d) r cuadrado. ....	67
Figura 3. 31. Comprobación de la mala ubicación del anillo de sombra de los piranómetros instalados en las estaciones meteorológicas manejadas por INER para la medición de irradiación horizontal difusa horaria. (a) RMSE mensual [%], (b) MBE [%] y (c) K-S test.....	69
Figura 3. 32. Resumen de resultados según la hipótesis de nubosidad planteada de las estaciones meteorológicas operadas por el INER para irradiación horizontal difusa (DHI). (a) RMSE [%]. (b) MBE [%].....	70
Figura 3. 33. Comportamiento del indicador estadístico MBE [%] e irradiación media diaria conforme varía la altura sobre el nivel del mar de la localidad de la estación meteorológica. La izquierda de la figura pertenece a la región costa, pasando a la región sierra y finalmente la región amazónica. ....	72
Figura 3. 34. Comportamiento del indicador estadístico RMSE mensual [%] e irradiación media diaria conforme varía la altura sobre el nivel del mar de la localidad de la estación meteorológica. La izquierda de la figura pertenece a la región costa, pasando a la región sierra y finalmente la región amazónica. ....	73

## ÍNDICE DE TABLAS

### Capítulo 1

Tabla 1. 1. Fuentes mundiales de datos de radiación solar. ....	6
Tabla 1. 2. Principales características de softwares para estadística.....	15

### Capítulo 2

Tabla 2. 1. Detalle de los instrumentos de medición de radiación solar instalados en las estaciones de estudio.....	20
Tabla 2. 2. Resumen de los valores aceptables de los indicadores estadísticos.....	30

### Capítulo 3

Tabla 3. 1. Parámetros de las curvas de ajuste de las agregaciones de la mañana de los datos terrestres y satelitales de la estación meteorológica de Belisario.....	38
Tabla 3. 2. Probabilidad empírica y teórica de supervivencia de las agregaciones de la mañana de los datos terrestres y satelitales de la estación meteorológica de Belisario. ....	40
Tabla 3. 3. Parámetros de las curvas de ajuste de la figura 3.10. ....	41
Tabla 3. 4. Parámetros de las curvas de ajuste de las agregaciones de la tarde de los datos terrestres y satelitales de la estación meteorológica de Belisario.....	42
Tabla 3. 5. Probabilidad empírica y teórica de supervivencia de las agregaciones de la tarde de los datos terrestres y satelitales de la estación meteorológica de Belisario. ....	43
Tabla 3. 6. Parámetros de las curvas de ajuste de la figura 3.13. ....	44
Tabla 3. 7. Resumen de resultados horarios (H), diarios (D) y mensuales (M) de comparación de la estación meteorológica de Belisario para cada año de medición. El color verde indica que la prueba K-S fue positiva y el rojo que fue negativa. ....	51



## RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo validar los datos satelitales de radiación solar del *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) utilizando mediciones terrestres en el Ecuador. El proyecto inició con la revisión bibliográfica, en la cual se citan trabajos de validación de modelos de radiación solar en diferentes regiones alrededor del mundo. Se recopilaron datos históricos satelitales y terrestres de radiación solar de las estaciones meteorológicas pertenecientes a la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y al Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER). La estación meteorológica de Belisario fue seleccionada como caso de estudio debido a que es la estación que más datos de radiación solar posee, registrando 12 años de mediciones. Los datos satelitales y terrestres de esta estación fueron descritos y comparados estadísticamente mediante el uso de series de tiempo, histogramas, diagramas caja-bigote, indicadores estadísticos de dispersión y de similitud de distribución en el paquete computacional Matlab. El resultado comparativo evidencia que los datos satelitales mensuales de radiación solar pueden utilizarse confiablemente en la localidad de la estación de Belisario, ya que todos los períodos anuales muestran coincidencia mensual entre los datos satelitales y terrestres. Seguidamente se aplicó la metodología a los datos del resto de las estaciones meteorológicas incluidas en el estudio. La investigación muestra que los datos satelitales mensuales de radiación solar se los puede utilizar fiablemente en el 88% de las estaciones meteorológicas de estudio, las cuales se hallan dispersas por todo el territorio ecuatoriano. Consecuentemente los resultados expuestos sugieren que los datos satelitales mensuales calculados por el NREL en todo el Ecuador se los puede utilizar de manera confiable.

**Palabras clave:** Validación, radiación solar, herramientas estadísticas descriptivas, indicadores estadísticos comparativos de dispersión y de semejanza de distribución.

## ABSTRACT

This research aims to validate the solar radiation data from the National Renewable Energy Laboratory (NREL) using terrestrial measurements in Ecuador. Similar researches about validation of solar radiation models in different regions around the world were reviewed. Historical satellite and terrestrial solar radiation data were collected from the meteorological stations belonging to the Environment Secretariat of Quito's Metropolitan District, the National Institute of Meteorology and Hydrology (INAMHI) and the National Institute of Energy Efficiency and Renewable Energy (INER). The meteorological station Belisario was selected as a study case because it is the station with the most solar radiation data, recording 12 years of measurements. The satellite and terrestrial data of this station were described and compared statistically by the use of time series, histograms, box plots, statistical indicators of dispersion and similarity of distribution in the software Matlab. The comparative result shows that the monthly satellite data of solar radiation can be used reliably in this location, due to the fact that all the annual periods show monthly coincidence between the satellite and terrestrial data. Then the methodology was applied to the rest of meteorological stations included. The research shows that the monthly satellite data of solar radiation can be reliably used in 88% of the meteorological study stations, which are scattered throughout the Ecuadorian territory. As a result, this research suggests the reliability of using the monthly satellite data calculated by NREL throughout Ecuador.

**Keywords:** Validation of solar radiation models, statistical descriptive tools, comparative statistical indicators of dispersion and similarity of distribution.

## Glosario de términos

DNI	Irradiancia directa normal ( <i>direct normal irradiance</i> )
GHI	Irradiancia global horizontal ( <i>global horizontal irradiance</i> )
DHI	Irradiancia horizontal difusa ( <i>diffuse horizontal irradiance</i> )
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
NSRDB	<i>National Solar Radiation Database</i>
PSM	<i>Physical Solar Model</i>
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
INER	Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables
RMSE	Media de la raíz del error cuadrático ( <i>root mean squared error</i> )
MAE	Media del error absoluto ( <i>mean absolute error</i> )
MBE	Media del error de sesgo ( <i>mean bias error</i> )
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinación (r cuadrado)
K-S test	Prueba Kolmogorov-Smirnov

# VALIDACIÓN DE DATOS SATELITALES DE RADIACIÓN SOLAR UTILIZANDO MEDICIONES TERRESTRES PARA EL ECUADOR

## INTRODUCCIÓN

El consumo de energía primaria a nivel mundial tiende a aumentar debido al incremento poblacional e industrial. Según el informe estadístico publicado por *BP (British Petroleum)* en el año 2017, se ha registrado incrementos porcentuales de consumo mundial de energía primaria de 0,9% y 1% en los años 2015 y 2016, respectivamente [1]. El sector industrial crece 0,7% al año, el transporte 1% al año y el sector de la construcción 1,1% al año [2]. El petróleo es la energía primaria más utilizada. En el año 2016, el consumo porcentual mundial de petróleo fue 33,6%, de carbón 28,4% y de gas natural 24,3% [1]. Sin embargo, se espera la decadencia de los recursos petroleros debido a sus niveles actuales de explotación y a la escasez de descubrimientos de nuevas reservas de petróleo [3].

En este contexto, las energías renovables han tomado importancia en los últimos años. A modo de ejemplo, en el año 2016 la producción de energía desde fuentes renovables alcanzó las 53 Mtoe, sin considerar la energía hidroeléctrica [1, 4]. El Sol es la fuente primaria de la mayoría de las energías renovables. La energía eólica, hidráulica y mareomotriz son formas de energía solar indirecta; mientras que, la captación térmica, captación fotovoltaica y la biomasa son formas de aprovechamiento de energía solar directa [5]. La energía solar térmica y fotovoltaica son unas de las opciones prometedoras para suplir una parte importante de la demanda energética global, colaborar con el paulatino reemplazo de los combustibles fósiles y generar una matriz energética sustentable y amigable con el medio ambiente [6, 7].

Hay varios factores que influyen para implementar tecnologías solares en una región, los cuales son: recurso solar, altitud, pendiente del terreno, distancia a las líneas de transmisión de electricidad, distancia de ciudades y carreteras, zonas protegidas y por último las condiciones socioeconómicas [8]. Es indispensable conocer la cantidad y calidad del recurso solar en el área de implementación para así evaluar su viabilidad técnica y financiera del proyecto [9]. Consecuentemente, es necesario tener una fuente de datos de radiación solar fiable en el Ecuador con el fin de sustentar consistentemente el desarrollo y aplicación de tecnologías de captación térmica y fotovoltaica en el país. En este trabajo se plantea un estudio para validar los datos satelitales de radiación solar del *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* de Estados Unidos utilizando mediciones terrestres en el Ecuador. Los datos satelitales se los puede obtener para el Ecuador por lo que de ser validados ayudarán a identificar las localidades con mayor potencial solar del país.

## **Pregunta de Investigación**

¿Es fiable utilizar los datos satelitales de irradiancia solar calculados por el *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) de los Estados Unidos en el Ecuador?

## **Objetivo general**

Validar los datos satelitales de radiación solar del NREL utilizando mediciones terrestres para el Ecuador.

## **Objetivos específicos**

- Recopilar datos históricos satelitales y terrestres de radiación solar de las estaciones meteorológicas pertenecientes a la “Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito”, el “INAMHI” e “INER”.
- Desarrollar una metodología de validación de datos de radiación solar satelitales utilizando mediciones terrestres mediante la aplicación de herramientas estadísticas.
- Comparar las mediciones terrestres y los datos satelitales de radiación solar de todas las estaciones disponibles en el Ecuador usando la metodología desarrollada.
- Determinar si el uso de los datos satelitales de radiación solar es fiable en las localidades de las estaciones meteorológicas de estudio.

## **Alcance**

El alcance de este proyecto es validar los datos satelitales de radiación solar del NREL utilizando mediciones terrestres para el Ecuador. La base del estudio fue el análisis estadístico de los datos de radiación en la estación de Belisario, ubicada en Quito. Se desarrolló una metodología para estudiar estadísticamente los datos de radiación solar terrestres y satelitales. Tras analizar las bondades de las herramientas utilizadas en la estación Belisario se planteó una metodología final, la cual se aplicó a un grupo de estaciones meteorológicas dispersamente distribuidas dentro del territorio ecuatoriano. Finalmente se analizó la fiabilidad de utilizar los datos de radiación solar estimados de NREL en cada estación meteorológica de estudio en el Ecuador.

# 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A continuación, se presenta una recopilación de información relacionada a la problemática. Se describe de manera general los conceptos básicos sobre radiación solar y los instrumentos que permiten cuantificarla. Además, se muestra un compendio de fuentes mundiales que aportan con datos de radiación solar para el Ecuador. El actual atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica emitido por *CONELEC* es descrito. Finalmente se discute el paquete computacional utilizado para validar los datos satelitales.

## Justificación

Debido a su ubicación geográfica, Ecuador cuenta con altos niveles de radiación solar [1]. A modo de ejemplo, en Quito se puede alcanzar una irradiación global horizontal alrededor de 2000 kWh/m<sup>2</sup> por año, lo cual es elevado en comparación a países como Alemania que llegan a valores alrededor de 1200 kWh/m<sup>2</sup> por año [2]. Ecuador al ubicarse en la línea ecuatorial posee algunas ventajas para el aprovechamiento de la energía solar, una de ellas es que la radiación solar recibida es relativamente constante durante todo el año al igual que el consumo energético doméstico promedio [3]. De manera contraria, en regiones de alta latitud la radiación solar varía conforme sus estaciones climáticas, imposibilitando que en épocas de baja radiación la demanda energética se satisfaga con energía solar [3, 4]. A pesar del potencial solar que posee Ecuador, la participación de esta energía en la matriz energética es mínima. Es así como en el sector eléctrico ecuatoriano la energía generada por tecnología solar cubrió el 0.14% de la demanda nacional en el año 2016 [5]. Una de las razones de esta falencia recae en la mínima cantidad de estudios para cuantificar el recurso solar en las localidades de Ecuador.

Una de las herramientas para cuantificar el recurso solar es el atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica, el cual fue publicado por *CONELEC* en el año 2008 [6]. Esta herramienta fue elaborada empleando los promedios mensuales y anuales de datos satelitales de irradiación solar diaria del *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) de Estados Unidos [6]. Estos datos fueron calculados con una resolución geográfica de 40 km por 40 km utilizando el modelo matemático *Climatological Solar Radiation Model* (CRS) [7]. Este modelo fue validado en algunas regiones de los Estados Unidos, mas no en el Ecuador [6]. Actualmente el NREL afinó sus modelos y obtiene datos de radiación solar cada media hora con una resolución espacial de 4 km por 4 km [8]. La nueva base de datos, al tener una resolución geográfica considerablemente mayor y un modelo matemático

mejorado, promete estimaciones de radiación solar más confiables. No obstante, el mapa solar de Ecuador aún no ha sido actualizado y validado por lo que sus datos podrían ser más fiables al utilizar la nueva base de datos del NREL.

En este trabajo se plantea un estudio para validar la nueva base de datos satelitales del NREL utilizando mediciones terrestres de radiación solar para el Ecuador. Finalmente, cabe señalar que los datos satelitales de radiación solar se pueden obtener para todo el Ecuador, por lo que de ser validados ayudarán a identificar las localidades con mayor potencial solar del país y darán un sustento consistente para el desarrollo y aplicación de tecnologías solares de captación térmica y fotovoltaica en el Ecuador.

### 1.1. Componentes medibles de irradiancia solar

La irradiancia proveniente del sol, al atravesar la atmósfera terrestre, es absorbida, transmitida o dispersada, como se indica en la figura 1.1. Este fenómeno genera tres componentes fundamentales de interés para el desarrollo de tecnologías solares, las cuales son: irradiancia directa, difusa y global. En el sistema internacional de medida se las mide en vatios por metro cuadrado [9], [10].

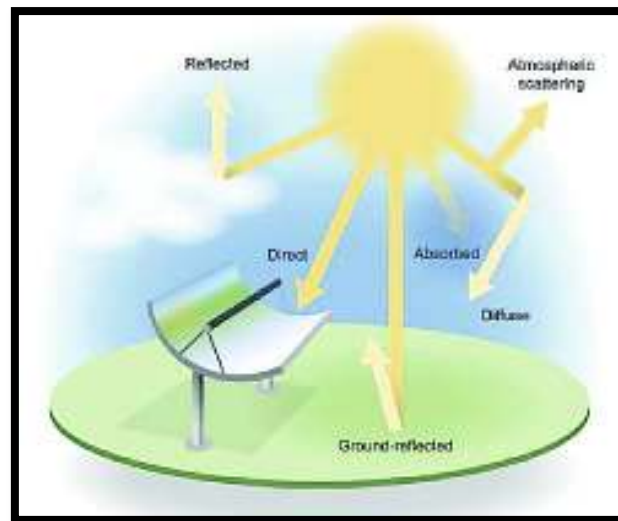


Figura 1. 1. Interacción de la irradiancia con la atmósfera terrestre.  
(Fuente: [8])

La irradiancia normal directa es la cantidad de energía solar instantánea recibida por unidad de área, en una superficie perpendicular a la dirección actual del Sol en el cielo, que no fue dispersada en la atmósfera terrestre [11,12]. Esta componente es de interés para tecnologías de concentración solar y generación fotovoltaica [9].

La irradiancia horizontal difusa es la cantidad de energía instantánea que fue dispersada por la atmósfera recibida por unidad de área, en una superficie horizontal [9,11,12]. Esta componente se refiere a la irradiancia producto de la dispersión de cierta cantidad de energía solar en la atmósfera terrestre que proviene de todas las direcciones del hemisferio [11]. La irradiancia horizontal global es la suma geométrica de la irradiancia normal directa y horizontal difusa, más el albedo, que es la irradiancia reflejada por el entorno propio del lugar [9].

## 1.2. Instrumentos de mediación de irradiancia solar

Para cuantificar las componentes medibles de irradiancia solar se utilizan los piranómetros y pirheliómetros. Los piranómetros son instrumentos de medición capaces de cuantificar tanto la radiación global como la difusa [13]. Un piranómetro consiste en un sensor plano con una vista hemisférica, como lo muestra la figura 1. 2. (a). Para que este aparato sea capaz de medir radiación difusa se debe instalar una banda de sombra con el fin de bloquear la radiación directa recibida [14].



(a)

(b)

Figura 1. 2. (a) Piranómetro SR11 (b) Pirheliómetro DR02.  
(Fuente: [15])

Los pirheliómetros son instrumentos de medición capaces de cuantificar la radiación directa normal. Tienen un campo de visión medio de 5 grados [13], como se muestra en la figura 1.2. (b). Necesariamente deben contar con un mecanismo de seguimiento solar ya que su campo de visión debe dirigirse directamente a la posición del sol, la cual varía con el tiempo [12, 14]. A más de los instrumentos de medición citados, las componentes de la irradiancia también se las puede evaluar mediante modelos matemáticos e interpolaciones [9, 10].



### 1.3. Bases de datos mundiales de radiación solar

La radiación solar puede ser evaluada mediante el uso de modelos matemáticos. Histórica y globalmente se han difundido las siguientes fuentes de datos de radiación solar:

Tabla 1. 1. Fuentes mundiales de datos de radiación solar.

<b>Nombre</b>	<b>Registro</b>	<b>Resolución temporal</b>	<b>Cobertura espacial</b>	<b>Resolución espacial</b>
<i>NASA Surface Meteorology and Solar Energy</i>	1983-2005	Promedio diario, mensual y anual	Global	1 grado
<i>Solar and Wind Energy Resource Assessment</i>	1998-2002	Promedio diario mensual y anual	Centro América, África, Sur y Este de Asia	10 km
<i>1991–2005 NSRDB</i>	1991-2004	Horario	Estados Unidos	Malla de 10 km por 10 km
<i>Management and Exploitation of Solar Resource Knowledge</i>	1991-2006	Horario	Europa, Oeste de Asia, África, Australia y Sudamérica	2.5 km
<i>Global solar atlas</i>	1999-2015	Promedio anual	Global	1 km
<i>1991–2009 NSRDB</i>	1991-2009	Horario	Estados Unidos	Malla de 10 km por 10 km
<i>1998–2015 NSRDB</i>	1998-2015	Cada 30 minutos	Entre las longitudes 25°W y 175°W, y entre las latitudes -20°S y 60°N	Malla de 4 km por 4 km

(Fuente: [9])

## 1.4. Datos satelitales de radiación solar para el Ecuador

Los datos satelitales que se encuentran disponibles para Ecuador son: *NASA Surface meteorology and solar energy*, *global solar atlas* y *1998-2015 NSRDB* del NREL. A continuación, se plantearán las ventajas y desventajas del uso de los datos de radiación solar de las fuentes anteriormente citadas.

### 1.4.1. NASA Surface Meteorological and Solar Energy (SSE)

SSE es un programa de la NASA destinado al estudio meteorológico, el cual ha tenido 6 lanzamientos con diferentes mejoras y cubre toda la superficie terrestre. La última versión de SSE tiene datos de irradiación solar entre julio de 1983 y junio del 2005. Permite descargar datos de irradiación diaria, promedios mensuales y anuales para cualquier región. Para estimar la irradiancia solar utiliza datos de los satélites *GEOS-4* y *GEWEX* con una resolución espacial de  $1^\circ$  por  $1^\circ$ , lo cual equivale a 111 km por 111 km [16].

En su base de datos contiene información referente a geometría solar, paneles solares inclinados, nubosidad diurna, promedios mensuales y anuales de radiación global, entre otros [17]. En la figura 1.3. se muestra una captura de pantalla de la página web de NASA *Surface Meteorological and Solar Energy*.

Figura 1. 3. NASA Surface meteorology and Solar Energy.  
(Fuente: [17])

Para localizar una zona geográfica es necesario ingresar la latitud y longitud de la zona. La principal desventaja de esta base de datos es su baja resolución espacial y temporal, por lo tanto, no se plantea usar esta fuente para el desarrollo del presente estudio.

### 1.4.2. Global solar atlas

Esta base de datos maneja datos de radiación solar obtenidos mediante imágenes satelitales. El *global solar atlas* cubre la superficie terrestre entre las latitudes 60°N y 45°S debido a que trabaja con satélites geoestacionarios ubicados en la línea Ecuatorial. Los datos tienen una resolución geográfica final cercana a 1 km por 1 km. Considera los datos de altura sobre el nivel del mar para evaluar la radiación solar; sin embargo, no toma en cuenta estructuras, edificaciones y vegetación. Para Ecuador, posee una base de datos horaria entre enero de 1999 y diciembre del 2015. Los datos y mapas contenidos son proporcionados por *Solargis*. La suscripción para descargar estos datos y mapas tienen un costo elevado [18].

El contenido sin costo alguno abarca estimaciones de producción de energía fotovoltaica (kWh/kWp por año o por día), irradiación horizontal global (kWh/m<sup>2</sup> por año o por día), irradiación normal directa (kWh/m<sup>2</sup> por año o por día), irradiación horizontal difusa (kWh/m<sup>2</sup> por año o por día), irradiación global inclinada (kWh/m<sup>2</sup> por año o por día), ángulo óptimo de inclinación (grados), temperatura (°C o °F) y elevación (m o ft) [18]. En la figura 1.4. se muestra una captura de pantalla de la página web de esta fuente.



Figura 1. 4. Global solar atlas.  
(Fuente: [18])

En su sitio web es posible encontrar fácilmente los datos de una localidad ya que cuenta con un mapa. Esta fuente de datos de irradiación solar es descartada para el estudio ya que es necesaria la disponibilidad de datos históricos con resolución horaria y el precio de suscripción lo impide.

### 1.4.3. National Renewable Energy Laboratory (NREL)

NREL cuenta con la base de datos *1998-2015 NSRDB (National Solar Radiation Database)*. Mediante el desarrollo del modelo *Physical Solar Model (PSM)*, NREL posee información correspondiente a radiación solar y meteorológica entre los años 1998 y 2015 manejando una resolución espacial correspondiente a una malla de 4 km por 4 km [9]. El área cubierta se encuentra entre las longitudes 25°W y 175°W, y entre las latitudes -20°S y 60°N, como lo muestra la figura 1.5. Estos datos son compatibles con los paquetes computacionales *SAM (System Advisor Model)*, *PVWatts* y *Solar Integration National Dataset Toolkit*, implementados de igual manera por el NREL para diferentes aplicaciones concernientes a energía solar [19].

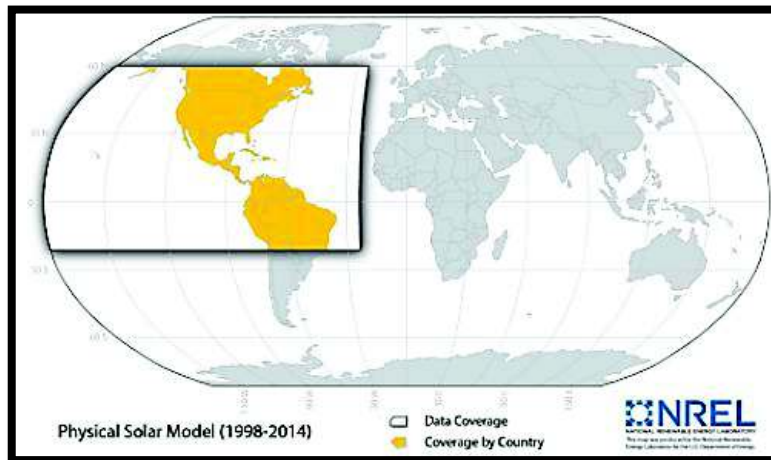


Figura 1. 5. Alcance geográfico de NREL-Physical Solar Model.  
(Fuente: [19])

Los datos de radiación solar de NREL ya han sido validados con mediciones terrestres en varias localidades de Estados Unidos [20–22]. Ecuador forma parte del alcance del NREL. Sin embargo, aún no se ha realizado un estudio para validar los datos de radiación solar de esta plataforma en Ecuador. Se utilizarán los datos de NREL para este estudio debido a la resolución geográfica y temporal que maneja, y a la facilidad de descargarlos gratuitamente.

## 1.5. Método de obtención de datos de NREL

El NREL toma las imágenes recopiladas por los satélites *GOES-EAST* y *GOES-WEST*. Los *GOES* son satélites geoestacionarios, por lo que orbitan con la misma velocidad angular que la Tierra; es decir, la posición relativa del satélite con respecto a la Tierra es fija en una zona geográfica determinada [23, 24]. Los satélites *GOES* se encuentran sobre la línea ecuatorial a  $75^{\circ}\text{W}$  y  $135^{\circ}\text{W}$ , correspondientemente como muestra la figura 1.6. Debido a la posición de los satélites, el alcance de los datos del NREL cubren el área entre las longitudes  $25^{\circ}\text{W}$  y  $175^{\circ}\text{W}$ , y entre las latitudes  $-20^{\circ}\text{S}$  y  $60^{\circ}\text{N}$  [24].

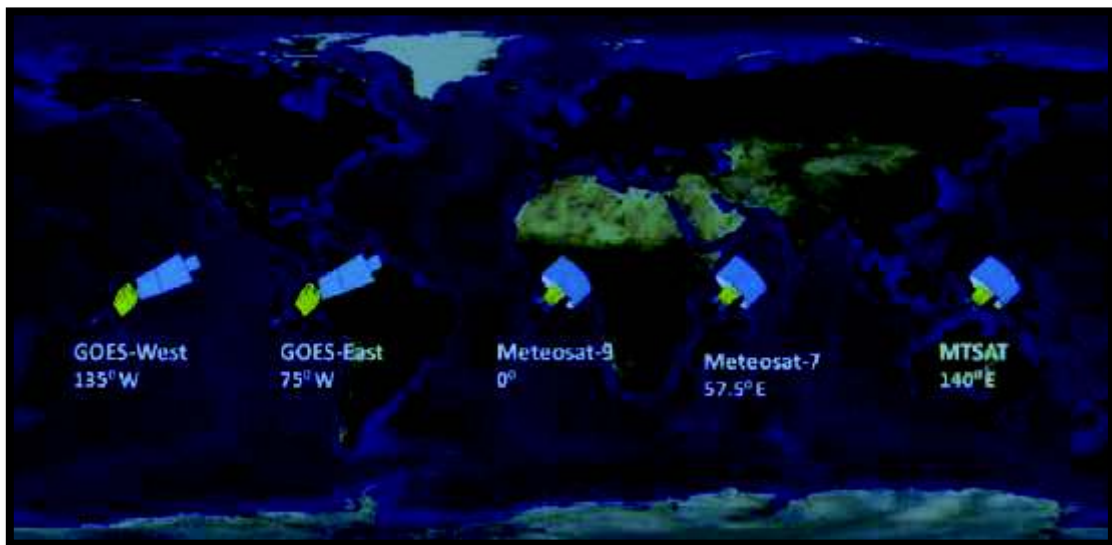


Figura 1. 6. Ubicación de los satélites geoestacionarios alrededor de la Tierra.  
(Fuente: [9])

Las imágenes satelitales son realizadas en 5 diferentes bandas de longitud de onda, las cuales son: banda visible ( $0.64\ \mu\text{m}$ ) con  $1\ \text{km}$  de resolución y bandas infrarrojas ( $3.9\ \mu\text{m}$ ,  $6.5\ \mu\text{m}$ ,  $0.7\ \mu\text{m}$  y  $12\ \mu\text{m}$ ) con  $4\ \text{km}$  de resolución [9]. A partir de las imágenes recopiladas y datos de otras fuentes, indicadas en la figura 1.7., NREL maneja el modelo *Physical Solar Model (PSM)* para el cálculo de la irradiancia [19, 24]. Este modelo fue desarrollado por *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, *University of Wisconsin*, y *NOAA*. El *PSM* toma datos de vapor de agua, perfiles de presión y temperatura de los datos de *MERRA*, el cual es un proyecto de la *NASA*. De igual manera utiliza los datos de albedo de nieve del *National Snow and Ice Data Center*, albedo de superficie, aerosoles y ozono de los satélites *MODIS*, *MISR* y *TOMS*, *OMI* [25].

Los datos son sometidos a los algoritmos *AVHRR Pathfinder Atmospheres-Extended (PATMO-x)* adaptados para los datos obtenidos de los *GOES* con el fin de encontrar las propiedades de nube [26, 27]. Según estos datos, el modelo se subdivide en escenarios con cielo nublado y cielo despejado. Para escenarios con cielo nublado, se calcula la irradiancia horizontal global teniendo como entrada las propiedades de nube, profundidad óptica de aerosol y vapor de agua precipitable mediante el modelo *FARMS*. Seguidamente el modelo *DISC* utiliza constantes empíricas para calcular la irradiancia normal directa a partir de la horizontal global. Para escenarios con cielo despejado, se obtienen la irradiancia horizontal global y la normal directa a partir del modelo *REST2* [25, 28].

Los datos meteorológicos asociados al *NSRDB* se derivan del conjunto de datos de la *NASA Modern Era-Retrospective Analysis (MERRA)*. *MERRA* tiene resolución temporal y espacial variable. Sin embargo, las variables utilizadas en el *NSRDB* son horarias con una resolución espacial de 40 km<sup>2</sup>, que luego se interpolan para que coincida con la cuadrícula de 4 km por 4 km y la resolución temporal de media hora [29].

A continuación, la figura 1.7. indica claramente el método seguido por NREL para estimar la irradiancia solar.

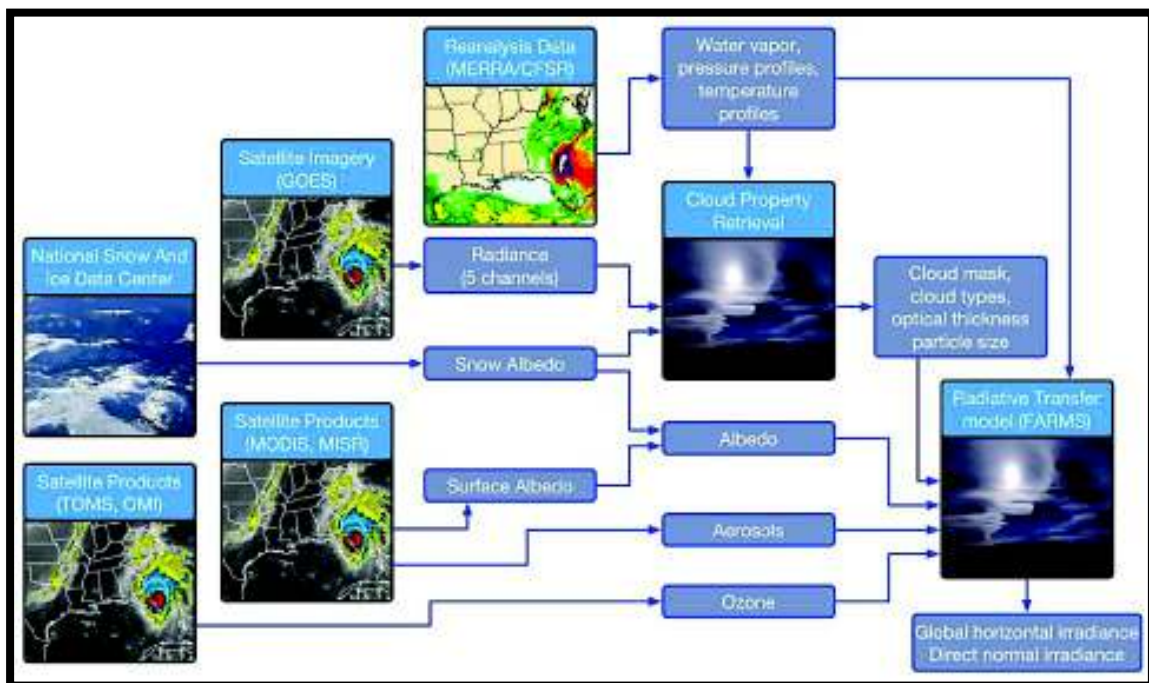


Figura 1. 7. PSM para estimar irradiancia solar.  
(Fuente: [25])

### 1.5.1. Validación de datos obtenidos por NREL

El NREL validó el modelo *Physical Solar Model* para el cálculo de irradiancia solar. Para verificar la certeza de los datos obtenidos, el NREL los comparó con mediciones terrestres en diferentes regiones de Estados Unidos. Las localidades para este estudio fueron:

- Bondville, Illinois
- Desert Rock, Nevada
- Table Mountain, Boulder, Colorado
- Fort Peck, Montana
- Goodwin Creek, Mississippi
- Penn, State Univ. Pennsylvania
- Sioux Falls, South Dakota
- NREL Solar Radiation Research Laboratory, Colorado
- Southern Great Plains, Atmospheric Radiation Measurements, Oklahoma

En este estudio se menciona la diferencia entre los datos obtenidos con cielo despejado y nublado. Los datos satelitales evaluados con cielo despejado son más cercanos a las mediciones terrestres y los evaluados con cielo nublado tienen una mayor brecha con las mediciones terrestres. Los errores de los datos tomados con el cielo nublado se los atribuye a un efecto de paralaje en el cual las nubes afectan el ángulo de vista del satélite generándose un desplazamiento de la zona medida [29]. Además, el estudio indica que la incertidumbre entre los datos terrestres y satelitales disminuye al agrupar los datos horaria, diaria, mensual y anualmente. Consecuentemente existe mayores errores al comparar los datos horariamente que al hacerlo anualmente [29].

Rush, J et al. en su publicación "Assessment of local solar resource measurement and predictions in South Louisiana" concluyó que los datos satelitales son comparables a las mediciones terrestres de irradiancia al agruparlos mensualmente. Sin embargo, la incertidumbre de la irradiación horaria y diaria estimada es grande [20].

## **1.6. Base de datos medidos de irradiación solar en Ecuador**

En el territorio ecuatoriano existen estaciones meteorológicas para la medición de recurso solar pertenecientes al INAMHI, la Secretaría de Ambiente del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito e INER.

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) cuenta con 519 estaciones meteorológicas repartidas en todo el territorio ecuatoriano. 36 estaciones de INAMHI son de interés para este estudio ya que poseen bases de datos históricos de mediciones de irradiancia horizontal global (GHI) [30]. El Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables cuenta con 27 estaciones solares, 17 de las cuales se encuentran en el canton Cuenca y 10 en la provincia de Chimborazo. Además, la Secretaría de Ambiente del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito posee 6 estaciones meteorológicas que miden GHI.

En los últimos años se han implementado varias estaciones meteorológicas ya que estudios realizados por instituciones gubernamentales plantean que la energía solar en Ecuador puede ser altamente aprovechada [31]. Además, el cambio de matriz energética que plantea el plan nacional para el buen vivir señala que Ecuador impulsa los proyectos con energías renovables, entre las cuales se encuentra la energía solar [32]. Para el desarrollo de proyectos con tecnologías solares es esencial conocer en el lugar más óptimo para su instalación mediante bases de datos de irradiación o mapas solares.



## 1.7. Atlas solar del Ecuador

En el año 2008, el Consejo Nacional de Electricidad (*CONELEC*) realizó un atlas solar del Ecuador, el cual es mostrado en la figura 1.8. [33]. Esta herramienta fue elaborada empleando los promedios mensuales y anuales de datos satelitales de irradiación solar diaria del NREL. Estos datos fueron calculados con una resolución geográfica de 40 km por 40 km utilizando el modelo matemático *Climatological Solar Radiation Model (CRS)* [34]. Este modelo fue verificado con mediciones terrestres de algunas estaciones meteorológicas en los Estados Unidos. Consecuentemente, estos datos aún no han sido validados para el Ecuador.

Debido al tamaño de celda usado, el *CONELEC* para desarrollar el atlas solar del Ecuador se basó en un proceso de interpolación. La base de datos de NREL en el año 2008 generaba 472 puntos sobre el territorio ecuatoriano en celdas de 40km por 40km. Gracias a procesos de interpolación, *CONELEC* logró obtener celdas de 1km [33].

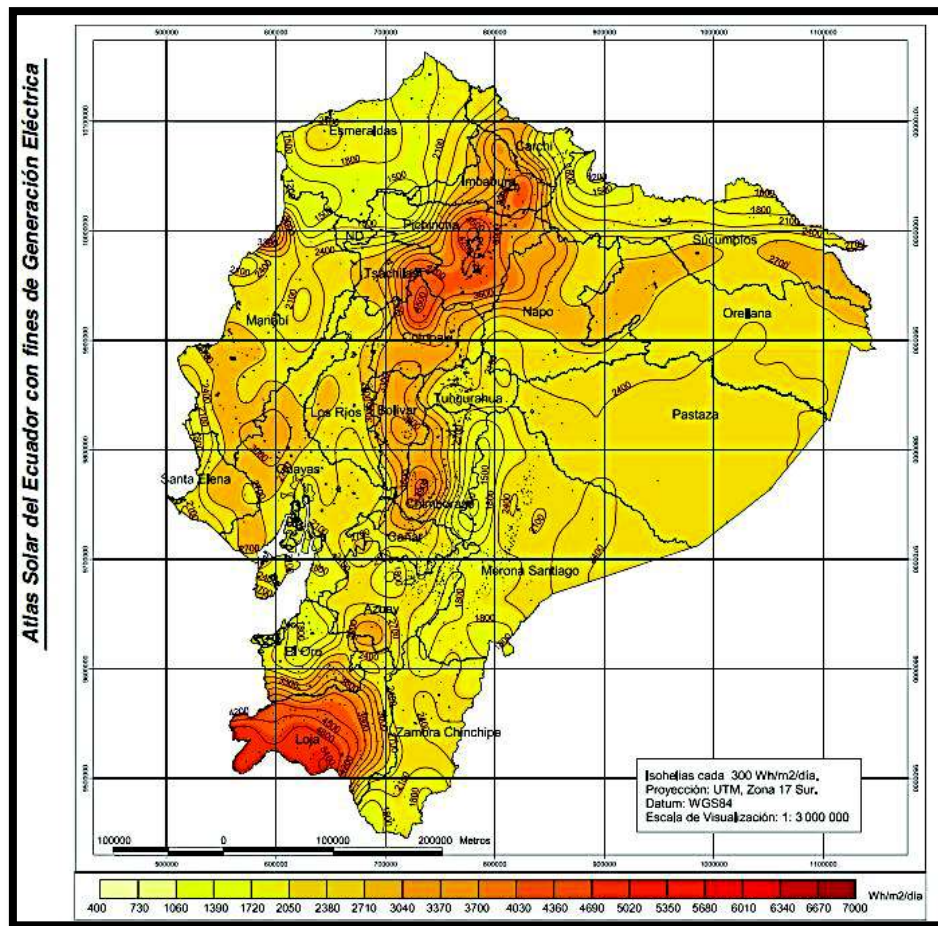


Figura 1. 8. Atlas Solar del Ecuador desarrollado por *CONELEC*.  
(Fuente: [33])

En este estudio la base actualizada de datos históricos satelitales del NREL (1998-2014 NSRDB) será considerada debido a que maneja una resolución geográfica de 4km por 4km, posee datos históricos evaluados cada 30 minutos y ya ha sido verificada para otras localidades internacionales.

## 1.8. Paquete computacional para realizar un estudio estadístico comparativo

Existen varios paquetes computacionales útiles en el campo estadístico, entre los cuales se encuentran: Microsoft Excel, Matlab, y R-project [35]. A continuación, se presenta una tabla en la que constan las principales características de varios paquetes computacionales:

Tabla 1. 2. Principales características de softwares para estadística.

Software	Tipo de licencia / Accesibilidad	Ventajas / Limitaciones
<i>Microsoft Excel</i>	Comercial/ no descargable vía internet	Estadística descriptiva e inferencial básica fácil de manejar. Incluye análisis de correlaciones y regresiones lineales. Contiene F-test para dos varianzas.
		No cuenta con métodos estadísticos multivariados. Representaciones gráficas de baja calidad.
<i>MatLab</i>	Comercial/ no descargable vía internet	Se puede implementar un gran número de pruebas uni y multivariante. Se puede implementar algoritmos para mejorar el análisis. La ayuda del software es muy útil y presenta ejemplos ilustrativos. Las características pueden ser mejoradas con toolboxes. Gráficos de alta calidad.
		Requiere conocimientos intermedios de programación.
<i>R-Projetc</i>	Libre/ descargable vía internet	Incorpora todas las pruebas, modelos y análisis estadísticos estándar. Las capacidades gráficas superan a los demás paquetes estadísticos. Las características se pueden mejorar con paquetes adicionales.
		Requiere conocimientos intermedios de programación.

(Fuente: [35])

Para este estudio se seleccionó el software Matlab debido a sus prestaciones y facilidades para programar. Cabe señalar que la Escuela Politécnica Nacional cuenta con la licencia de instalación de este programa. Además, este paquete computacional es muy utilizado durante la carrera de Ingeniería Mecánica en la Escuela Politécnica Nacional por lo que resulta una excelente oportunidad para aplicar lo aprendido y ganar mejores habilidades en su uso. En el Anexo 1 se compararon las prestaciones de los paquetes computacionales Matlab, Python y R studio para el cálculo de los indicadores estadísticos de comparación citados en el siguiente capítulo, en el que se detalla la metodología a seguir en este estudio, utilizando los datos de radiación solar global horizontal de la estación meteorológica de Belisario. De acuerdo al Anexo 1, el paquete computacional Matlab tiene aceptables prestaciones para el cálculo de indicadores estadísticos de comparación.

Para el desarrollo de este proyecto es necesario tener acceso a mediciones terrestres y datos satelitales de radiación solar. Los datos terrestres fueron proporcionados por la “Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito”, el “INAMHI” e “INER” y los satelitales fueron descargados del NREL. Los datos fueron sometidos a un proceso de filtrado y mediante herramientas de estadística descriptiva programadas en Matlab se analizarán tendencias en ellos. Varios autores plantean en sus publicaciones el uso de indicadores estadísticos de dispersión y de similitud de distribución para la comparación analítica de datos de radiación solar [9, 20, 29, 36–40]. Los indicadores estadísticos comúnmente utilizados son: raíz del error cuadrático medio (RMSE), error bias medio (MBE), error medio absoluto (MAE), coeficiente de determinación (R squared) y prueba Kolmogorov-Smirnov (K-S test). En el siguiente capítulo se plantea a detalle la metodología a seguir.

## **2. METODOLOGÍA**

A continuación se detalla la metodología seguida para realizar este estudio. La primera etapa de la metodología es seleccionar las estaciones meteorológicas cuyos datos formarán parte del estudio. Seguidamente la metodología se subdivide en dos fases. La primera etapa se enfoca al estudio estadístico descriptivo, comparativo y predictivo completo de los datos de irradiancia medida y estimada de la estación meteorológica Belisario, ubicada en la ciudad de Quito en el sector de Iñaquito. La siguiente fase se encauza al estudio estadístico comparativo condensado de los datos de irradiancia terrestres y satelitales, aplicado en el resto de las estaciones meteorológicas de estudio.

### **2.1. Estaciones meteorológicas seleccionadas**

Se seleccionaron las estaciones meteorológicas, manejadas por La Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, el INAMHI e INER, que miden radiación solar para formar parte de este estudio. La base de datos de NREL es conocida como NSRDB y cuenta con datos históricos de radiación solar entre 1998 y 2015, por lo que las mediciones históricas terrestres también se deben encontrar en el mismo intervalo de tiempo. Las estaciones meteorológicas de estudio se encuentran dispersas en todo el territorio ecuatoriano, como se muestra en las figuras 2.1.-2.3. En el Anexo 2 se detalla la localización geográfica, altura sobre el nivel del mar, años de datos recopilados, y marca y modelo del sensor de medición de las estaciones meteorológicas mostradas en las figuras 2.1.-2.3.

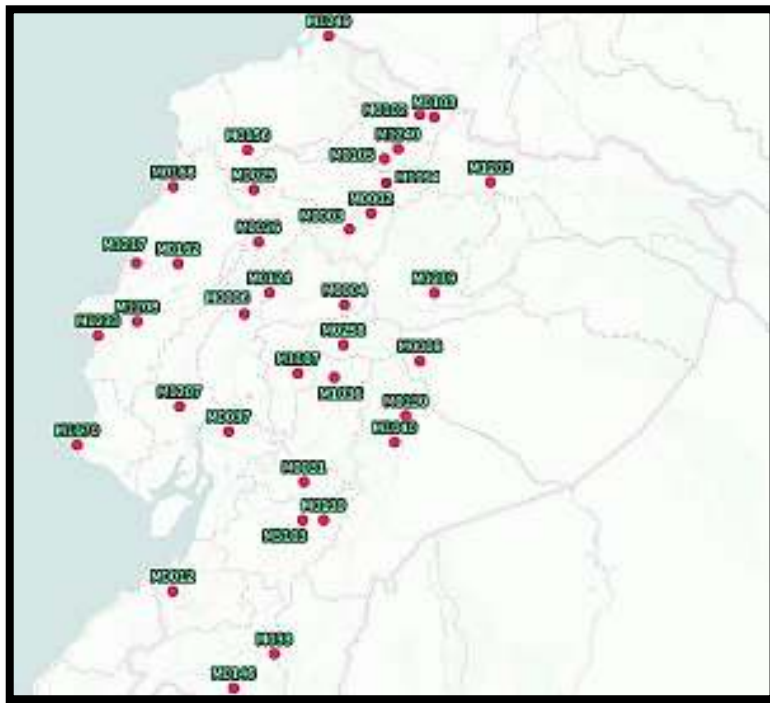
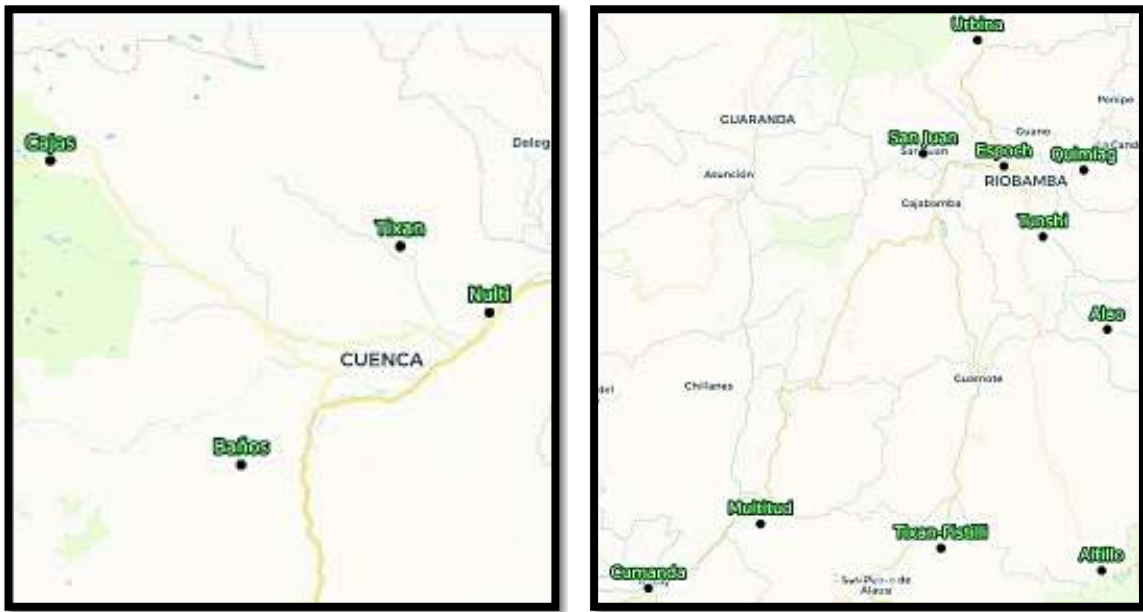


Figura 2. 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas de INAMHI en el Ecuador.  
(Fuente: Propia)



Figura 2. 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas de la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito.  
(Fuente: Propia)



(a)

(b)

Figura 2. 3. Ubicación de las estaciones meteorológicas de INER en (a) el cantón Cuenca, y (b) la provincia de Chimborazo.

(Fuente: Propia)

Se seleccionaron 6 estaciones meteorológicas de la Secretaría de Ambiente del municipio de Quito, 14 del INER y 35 del INAMHI. Las estaciones meteorológicas operadas por la Secretaría de Ambiente cubren la ciudad de Quito por completo dando un gran respaldo de datos en esta localidad. Las estaciones manejadas por INAMHI se encuentran distribuidas por todo el Ecuador presentando alta concentración de estaciones en la región sierra norte y baja concentración en la zona sur y la región oriental. Por otro lado, las estaciones de INER cubren la provincia de Chimborazo y el cantón de Cuenca en la provincia de Azuay. Consecuentemente, las estaciones meteorológicas operadas por las tres instituciones cubren todo el territorio nacional con mayor población ayudando a que este estudio arroje un completo análisis en las diferentes regiones del Ecuador.

Resulta imperante verificar que las mediciones de radiación solar en cada estación meteorológica sean de la mejor calidad. Consecuentemente se recopiló información del mantenimiento y calibración de los instrumentos de medición utilizados en cada una de las estaciones meteorológica de estudio. En las estaciones seleccionadas pertenecientes a la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, se realiza el mantenimiento de los piranómetros una vez al mes, el cual consiste en limpiar el domo de cuarzo de los sensores. La calibración de los piranómetros se realiza una vez al año con un patrón meteorológico viajero de marca *Kipp & Zonen* y modelo CMP3. Los datos de irradiancia solar son tomados cada 5 segundos y son guardados en una memoria temporal que se

libera cada minuto y el promedio de irradiancia de este período de tiempo es almacenado en una memoria permanente. Por su parte, en las estaciones seleccionadas operadas por el INAMHI, *se realiza el* mantenimiento de estos equipos dos veces al año, lo cual incluye la limpieza del domo del piranómetro. La calibración se la realiza dos veces al año con un sensor patrón primario de marca *Kipp & Zonen* y modelo CMP22; además, poseen dos patrones secundarios de marca *Kipp & Zonen* y modelos CMP11 y CMP6. La toma de datos de irradiancia solar se la realiza una vez por minuto como lo especifica la Organización Mundial de Meteorología [41]. En las estaciones pertenecientes al INER, la Escuela Politécnica del Chimborazo y la Universidad Politécnica Salesiana son las instituciones encargadas de realizar el mantenimiento y calibración de los instrumentos.

En el Anexo 2 se puede encontrar la marca y modelo de los piranómetros de cada estación meteorológica incluida en este estudio y los años de datos recopilados. En la tabla 2.1. se citan las características de los instrumentos utilizados en las estaciones meteorológicas de las instituciones citadas.

Tabla 2. 1. Detalle de los instrumentos de medición de radiación solar instalados en las estaciones de estudio.

<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Características principales</b>
<i>Kipp &amp; Zonen</i>	CM3	Este equipo es un piranómetro de origen holandés de segunda clase, el cual posee un campo de visión de 180°.
<i>Huksefulx</i>	SR11	Este piranómetro es de primera clase según los criterios ISO. El campo de visión de este equipo es de 180°.
<i>Kipp &amp; Zonen</i>	CMP6	Este sensor es un piranómetro de primera clase según los criterios ISO. Los elementos que sensan la radiación solar son recubiertos con un compuesto de carbono inorgánico lo cual le da estabilidad. Este piranómetro consta con un par de domos de cristal de 2 mm de espesor. Su campo visual es de 180°.

(Fuente: [41–43])

Los piranómetros instalados son de segunda y primera clase. Los equipos con mayor antigüedad son los pertenecientes a la Secretaría de Ambiente, sin embargo, siguen protocolos estrictos de calibración y mantenimiento, por lo que sus mediciones de radiación solar son confiables para realizar este estudio. Los equipos de las estaciones meteorológicas operadas por el INAMHI e INER fueron adquiridos e instalados entre los años 2013 y 2014 por lo que los registros de mediciones son aceptables en los años 2014 y 2015.

## **2.2. Metodología aplicada a la estación meteorológica Belisario**

La estación meteorológica de Belisario se encuentra en la ciudad de Quito en el sector de Iñaquito y pertenece a la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito. El estudio estadístico de los datos de irradiancia solar de esta estación consta de varias etapas, las cuales se detallan a continuación.

### **2.2.1. Obtención de datos de irradiancia solar**

Para este proyecto es necesario tener acceso a datos de irradiancia satelital y terrestre de la zona específica de estudio, en este caso de la localidad en la que se ubica la estación de Belisario. Es preferible que los datos de irradiancia correspondan a un largo período de tiempo de recopilación de datos.

Los datos satelitales de irradiancia solar son proporcionados por la página web de NREL (*NSRDB- National Solar Radiation Database*). En el Anexo 3 se detalla el camino para descargarlos. Los archivos descargados se encuentran en formato .csv, los cuales pueden ser fácilmente leídos por el paquete computacional Matlab.

Las mediciones de irradiancia solar terrestres serán proporcionadas por los organismos ecuatorianos que manejan las estaciones meteoerológicas, los cuales son: INAMHI, INER y Secretaría de Ambiente del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. Los datos se encuentran en archivos Excel con formato .xlsm., los cuales pueden ser decodificados por Matlab.

### **2.2.2. Organización de datos de irradiancia solar**

Es primordial determinar el intervalo de tiempo en el cual coexisten los datos satelitales y terrestres de irradiancia para la localidad de estudio ya que el objetivo general del estudio es compararlos estadísticamente. Los archivos con los datos de irradiación de coexistencia son importados a MatLab para ser organizados.



Debido a que los datos satelitales fueron tomados cada 30 minutos, se plantea el siguiente procedimiento para transformarlos a irradiación horaria:

- Tomar los datos de irradiación satelital a la hora deseada ( $h_i$ ) y los 2 datos que lo rodean ( $h_{i-1}$ ,  $h_{i+1}$ ). Por ejemplo, para calcular la irradiación horaria satelital a las 9:00 es necesario contar con los datos de irradiancia satelital correspondientes a las 8:30, 9:00 y 9:30.
- Se calculará el promedio de irradiancia en esa hora mediante la siguiente fórmula:

$$\bar{h}_i = \frac{\frac{h_{i-1} + h_i}{2} + \frac{h_i + h_{i+1}}{2}}{2} \quad (2.1.)$$

- Finalmente al multiplicar el resultado por el intervalo de tiempo en el cual aplica esa irradiancia (1 hora), se obtendrá la irradiación horaria específica para esa hora ( $W.h/m^2$ ). Como los datos de irradiancia in-situ son horarios, basta con multiplicarlos por 1 hora para obtener la irradiación horaria.

### **2.2.2.1. Optimización de datos de irradiación solar**

Es fundamental el proceso de optimización que se debe seguir para ayudar a identificar y corregir ciertas falencias en los datos de irradiancia solar. Es necesario tener un vector de tiempo asociado a los datos. Debido a que los datos satelitales de irradiancia de NREL constan de un vector de tiempo continuo y correctamente organizado, se lo tomará como base para la organización. No se tomarán en cuenta para el estudio los datos que cumplan con las siguientes premisas:

- Datos de irradiancia satelital que no tengan su correspondiente medición terrestre en la misma ubicación geográfica y temporal no serán considerados, y viceversa.
- Los datos nocturnos no forman parte del estudio. Los datos estimados y medidos de irradiancia menores a un límite de irradiancia aceptable serán eliminados. Este límite será determinado a partir del análisis de un histograma que reúne los datos de irradiancia medida nocturna (entre las 19 y 5 horas). Se plantea un límite de irradiancia aceptable debido a la posible presencia de irradiancia parásita nocturna que afecta los datos medidos.

### **2.2.2.2. Agregación general de datos de irradiación solar**

Los datos de irradiación solar se organizarán de diferente manera para lograr analizarlos y compararlos estadísticamente. A. Habte et al.[29], J. Raush et al.[20] y R. Djebbar et al.[40] plantean en sus publicaciones asociar los datos de irradiación solar horaria, diaria y mensualmente.

Tras los procesos de organización y optimización planteados para datos de irradiancia solar se obtiene como producto la irradiación solar horaria. Al sumar la irradiación solar horaria de cada día se consigue la irradiación solar diaria. Finalmente al sumar la irradiación solar diaria de cada mes se consigue la irradiación solar mensual. La cantidad de datos de irradiación solar horaria es mayor a la diaria, y esta es mayor a la mensual.

Cada una de las agregaciones generales debe estar correlacionada con un vector de tiempo. El vector de tiempo relacionado a la irradiación solar horaria debe constar del año, mes, día y hora. El vector de tiempo relacionado a la irradiación solar diaria debe constar del año, mes y día. Por último el vector de tiempo relacionado a la irradiación solar mensual debe constar del año y mes.

### **2.2.2.3. Diversas desagregaciones y agregaciones de datos de irradiación solar**

Para estudiar los datos de irradiación profundamente es necesario suborganizarlos de varias maneras, desagregándolos y agregándolos. A continuación se plantea varias maneras de organizarlos con el fin de encontrar tendencias en los datos:

- Datos de irradiación horaria para cada hora: Mostrarán la tendencia que siguen los datos de irradiación horaria diferenciando la hora en la cual fue tomada.
- Datos de irradiación horaria para cada hora de cada mes: Identificarán las tendencias que siguen los datos de irradiación horaria diferenciando entre los doce meses del año y la hora en la cual fueron tomados.
- Datos de irradiación horaria para cada mes: Revelarán las tendencias que siguen los datos de irradiación horaria diferenciando entre los doce meses del año. Este conjunto de datos ayudará a categorizar los meses del año según la irradiancia incidente.

- Datos de irradiación horaria para cada año: Exhibirán las tendencias que siguen los datos de irradiación horaria diferenciando entre los años que fueron tomados. Este conjunto de datos ayudará a categorizar los años de medición según la irradiancia incidente.

Mediante el comando `find` de Matlab es factible filtrar los datos de irradiancia solar por horas, días, meses y años utilizando como base el vector de tiempo asociado a los datos. A más de las desagregaciones y agregaciones anteriormente planteadas, se formula una hipótesis de nubosidad que se detalla en la siguiente subsección.

### **Hipótesis de nubosidad**

Se plantea para este estudio una hipótesis de nubosidad (HN) debido a que los datos satelitales manejan diferentes métodos de cálculo en escenarios con cielo despejado y cielo nublado [25, 28, 29]. Para categorizar los datos se utilizará un factor de nubosidad, el cual será un indicador de existencia de nubosidad. Se manejará un factor de nubosidad  $fn_{0\_25}$  entre el 100% y el 75% del valor satelital máximo de radiación solar global horizontal para cada hora del día, lo cual indica que la medición fue tomada con cielo despejado,  $fn_{25\_75}$  entre el 75% y el 25% para indicar que la medición fue tomada con cielo semi nublado y el resto como mediciones en cielo nublado,  $fn_{75\_100}$ . Estos umbrales fueron escogidos de forma aleatoria, sin embargo, los resultados se ajustaron bien a los modelos usados por el NREL.

Estos datos serán igualmente organizados para cada hora del día con el fin de identificar tendencias diferenciando el factor de nubosidad estimado y la hora de medición de los datos. Esta hipótesis estudiará la fiabilidad del uso de datos de irradiación solar satelitales dependiendo del método (cielo despejado o nublado) con el que fueron calculados.

### 2.2.3. Estadística descriptiva de los datos de irradiación solar

La estadística descriptiva de los datos de irradiación solar permitirá conocer el comportamiento ligado a las definiciones físicas que los rigen. En este estudio se utilizarán varias herramientas descriptivas aplicadas a las diferentes maneras de organizar los datos anteriormente planteados. A continuación se detalla las herramientas descriptivas a utilizarse y el objetivo de aplicarlas, así:

- Series de tiempo: Son gráficas que relaciona los datos satelitales y terrestres horarios de irradiación solar con el tiempo. Estas gráficas ayudarán a identificar agrupaciones de datos y encontrar tendencias en los mismos.
- Histogramas: Este tipo de gráfico estadístico representa la frecuencia con la que cierto valor de irradiación tiene lugar. Se lo aplicará a las mediciones terrestres nocturnas de irradiación solar con el fin de determinar el límite inferior de irradiación aceptable, el cual es necesario para el proceso de optimización de datos como ya se explicó anteriormente. Además, será aplicado a desagregaciones horarias para identificar la posible existencia de poblaciones dentro del conjunto de datos. Para simplificar el análisis es recomendable el menor número de poblaciones dentro del set de datos.
- Ajuste de función de densidad: Permite acoplar una función de densidad teórica al histograma de las poblaciones bien definidas dentro del set de datos de irradiación solar. Si estas poblaciones se encuentran bien definidas mediante la función de densidad acoplada, los datos de irradiación solar podrían ser reemplazados con la expresión matemática resultante para simplificar el procesamiento de datos.
- Diagramas caja-bigote: Es una gráfica estadística que condensa un histograma. En este estudio se los utilizará para comparar la irradiación horaria entre las horas del día, los meses de medición, los meses del año y los años de medición. La línea horizontal ubicada en el centro de la caja representa la mediana, los límites de la caja indican el primer y tercer cuartil, los bigotes (las líneas punteadas) representan los valores extremos con un nivel de significancia del 5% y los puntos marcados con asteriscos son los valores atípicos del conjunto de datos de irradiación.

- Probabilidad empírica (función de supervivencia y probabilidad acumulada): Indica cuan probable un valor de irradiación del conjunto de datos estimados o medidos puede presentarse dentro del set de datos. A manera de ejemplo, si la probabilidad empírica para 650 Wh/m<sup>2</sup> de irradiación medida es de 30%, entonces existe una probabilidad del 30% de encontrar valores mayores o iguales a 650 Wh/m<sup>2</sup> en el conjunto de datos de irradiación horaria medida.
- Probabilidad teórica (función de supervivencia y probabilidad acumulada): De igual modo, esta herramienta indica la probabilidad con la que un valor de irradiación se presente a partir de la expresión matemática hallada en el ajuste de función de densidad.
- Gráfico Q-Q (Q-Q plot): Muestra la relación entre la probabilidad empírica y teórica aplicada a un conjunto de datos de irradiación permitiendo concluir si la curva teórica es capaz de sustituir los datos empíricos, o no.

Para los ajustes de curva y líneas de tendencia se utilizará el Método de Montecarlo para conocer la variabilidad de los parámetros de las curvas. Este método se encuentra dentro de las funciones de Matlab para hallar tendencias.

#### **2.2.4. Estadística comparativa de los datos de irradiación solar**

La comparación entre los datos de irradiación solar satelitales y terrestres se la realizará gráfica y analíticamente. A continuación se presenta las herramientas estadísticas que se utilizarán en cada una de estas etapas.

##### **2.2.4.1. Estadística comparativa gráfica de los datos de irradiación solar**

La estadística comparativa gráfica utilizará varias herramientas que harán visible la relación entre los datos satelitales y terrestres de irradiación solar. Se aplicarán las siguientes herramientas estadísticas:

- Histogramas: En una misma figura se graficarán los conjuntos de datos satelitales y terrestres de irradiancia que se analizarán. Para la finalidad de este estudio, se espera que las gráficas con datos satelitales y terrestres sean semejantes.

- Función de supervivencia: En esta gráfica se presenta la probabilidad de supervivencia de datos satelitales y terrestres de irradiación solar. Para un valor fijo de irradiación, la probabilidad estimada y medida deben ser semejantes.
- Gráficos intercuartiles (Q1-Q2-Q3): Estos gráficos contienen información mensual de irradiación horaria medida y estimada en una línea de tiempo. En cada mes de cada set de datos se indica su mediana, primer y tercer intercuartil.

### 2.2.4.2. Indicadores estadísticos de comparación para datos de irradiación solar

Varios autores plantean en sus publicaciones el uso de indicadores estadísticos de dispersión y similitud de distribución para la comparación analítica de datos de radiación solar [9, 20, 29, 36–40]. Los indicadores estadísticos comúnmente utilizados son: raíz del error cuadrático medio (RMSE), error bias medio (MBE), error medio absoluto (MAE), coeficiente de determinación (R squared) y prueba Kolmogorov-Smirnov (K-S test).

#### RMSE (root mean squared error)

El error medio cuadrático es un indicador estadístico de dispersión, el cual manifiesta el error global entre dos sets de datos. En el caso de este estudio, se lo aplicará a los datos satelitales y terrestres de irradiación solar. Si los datos satelitales de irradiación son semejantes a los terrestres, entonces el indicador RMSE debe ser bajo. El RMSE se puede expresar con porcentaje o unidades, sin embargo, Gueymard [38] manifiesta que al ser expresado en porcentaje genera menos problemas de interpretación. Generalmente RMSE es aceptable en el rango de 0% a 30% [45], mientras RMSE se acerca más a cero, indica que el modelo matemático se ajusta mejor a la realidad. A continuación se muestran las fórmulas para calcularlo:

$$RMSE \left( \frac{W}{m^2} \right) = \sqrt{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{sat,i} - x_{ins,i})^2 \right)} \quad (2.2.)$$

$$RMSE(\%) = \sqrt{\frac{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{sat,i} - x_{ins,i})^2 \right)}{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ins,i}^2 \right)}} * 100 \quad (2.3.)$$

Donde:

$n$ : número de datos

$x_{sat}$ : irradiación satelital

$x_{ins}$ : irradiación terrestre

### MAE (mean absolute error)

El error medio absoluto es igualmente un indicador estadístico de dispersión, el cual manifiesta el error absoluto entre dos sets de datos. Al MAE se lo expresa con unidades y porcentajes. La diferencia entre el RMSE y el MAE radica en la sensibilidad que tienen para errores grandes. Es decir, el RMSE al elevar al cuadrado los errores y después promediarlos, da mayor peso a grandes errores que el MAE. Al igual que en el estadístico RMSE, el MAE debe acercarse a cero para afirmar que el el modelo matemático se ajusta a la realidad. A continuación se muestra las fórmulas para calcular el MAE [38]:

$$MAE \left( \frac{W}{m^2} \right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{sat,i} - x_{ins,i}| \quad (2.4.)$$

$$MAE (\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{sat,i} - x_{ins,i}}{x_{ins,i}} \right| * 100 \quad (2.5.)$$

Donde:

$n$ : número de datos

$x_{sat}$ : irradiación satelital

$x_{ins}$ : irradiación terrestre

### MBE (mean bias error)

El error bias medio es un indicador estadístico de dispersión, el cual muestra si existe sobreestimación o subestimación entre los datos satelitales y las mediciones terrestres. Al MBE se lo expresa con unidades y porcentajes. A continuación se muestran las fórmulas para calcularlos [38]:

$$MBE \left( \frac{W}{m^2} \right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{sat,i} - x_{ins,i}) \quad (2.6.)$$

$$MBE (\%) = \frac{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{sat,i} - x_{ins,i}) \right)}{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ins,i} \right)} * 100 \quad (2.7.)$$

Donde:

$n$ : número de datos

$x_{sat}$ : irradiación satelital

$x_{ins}$ : irradiación terrestre

Este indicador utiliza los signos resultantes de la resta entre valores satelitales y terrestres por lo que se podrían eliminar valores positivos y negativos al realizar la sumatoria. Sin embargo, es muy versátil para conocer si en general el modelo de cálculo de datos satelitales sobreestima o subestima a los datos terrestres de radiación solar global horizontal. Analizando las fórmulas que lo rigen, si el resultado de calcular el MBE es positivo, entonces los valores satelitales sobreestiman al fenómeno y de ser negativo lo subestiman.

## R- cuadrado

El coeficiente de determinación es un parámetro estadístico utilizado para encontrar la relación entre los datos reales y los estimados. R cuadrado puede tomar valores entre 0 y 1. Al tomar el valor de 1, indica que existe relación lineal entre los datos satelitales y terrestres de irradiación solar. Para afirmar que dos sets de datos se relacionan, el coeficiente de determinación debe superar el 0,7 [45]. Seguidamente se presenta la ecuación para calcularlo a partir del coeficiente de Pearson [46]:

$$R^2 = \left[ \frac{n(\sum_{i=1}^n x_{sat,i} * x_{ins,i}) - (\sum_{i=1}^n x_{sat,i}) * (\sum_{i=1}^n x_{ins,i})}{\sqrt{(n * \sum_{i=1}^n x_{sat,i}^2 - (\sum_{i=1}^n x_{sat,i})^2) * (n * \sum_{i=1}^n x_{ins,i}^2 - (\sum_{i=1}^n x_{ins,i})^2)}} \right]^2 \quad (2.8.)$$

Donde:

$n$ : número de datos

$x_{sat}$ : irradiación satelital

$x_{ins}$ : irradiación terrestre

## Kolmogorov-Smirnov test

El K-S test, Kolmogorov-Smirnov test, es una prueba no paramétrica que aplicada a dos conjuntos de datos, indica si los sets de datos provienen de una misma distribución o no. El K-S test utiliza las funciones de distribución acumulada (CDFs) de estos conjuntos de datos independientes, lo cual es una ventaja ya que se trata de un método no paramétrico y es aplicable para toda clase de CDFs [38]. Seguidamente, mediante un intervalo de confianza 5%-95%, una hipótesis nula es probada. El test es positivo para resultados del K-S test mayores a 0,05, lo cual implica que los dos conjuntos de datos se encuentran relacionados [20].



Gueymard señala que el K-S test es un indicador de similitud de distribución validado para comprobar el desempeño de los modelos de radiación solar [38]. Esta prueba fue realizada por Raush et al. [20] con el fin de comparar datos satelitales de radiación solar con mediciones in-situ, por lo que este método ya ha sido validado para su uso con datos de irradiación solar. Raush et al. [20] plantean que los resultados del K-S test deben ser mayores a 0.05 para asumir que la hipótesis nula es verdadera y se considere que los dos conjuntos de datos provienen de la misma distribución.

Consecuentemente, para el fin de esta investigación es deseable que los indicadores estadísticos MAE, RMSE sean bajos,  $R^2$  sea alto y la prueba K-S sea positiva para demostrar que el modelo satelital de obtención de irradiancia solar se ajusta correctamente a la realidad. A continuación, en la tabla 2.2. se resumen los valores límites que pueden tener los indicadores estadísticos para validar dos conjuntos de datos.

Tabla 2. 2. Resumen de los valores aceptables de los indicadores estadísticos.

<b>Indicador estadístico</b>	<b>Rango</b>	<b>Valor mínimo aceptable</b>	<b>Valor máximo aceptable</b>
MAE	0% - 100%	0%	30%
RMSE	0% - 100%	0%	30%
R cuadrado	0 – 1	0,7	1
K-S test	0 – 1	0,05	1

(Fuente: [20, 44])

### 2.2.5. Estadística predictiva

En una figura se graficará la probabilidad de supervivencia de los datos medidos de irradiación mensual de la estación meteorológica con el fin de determinar la probabilidad con la que se dan los valores de irradiación mensualmente. La finalidad del desarrollo de la estadística predictiva en la localidad es comparar el potencial solar que tiene con respecto a otras zonas reconocidas a nivel mundial por su alto potencial solar como el desierto de Atacama en Chile.

A continuación, en la figura 2.4. se muestra un resumen de la metodología que se seguirá para la estación meteorológica Belisario.

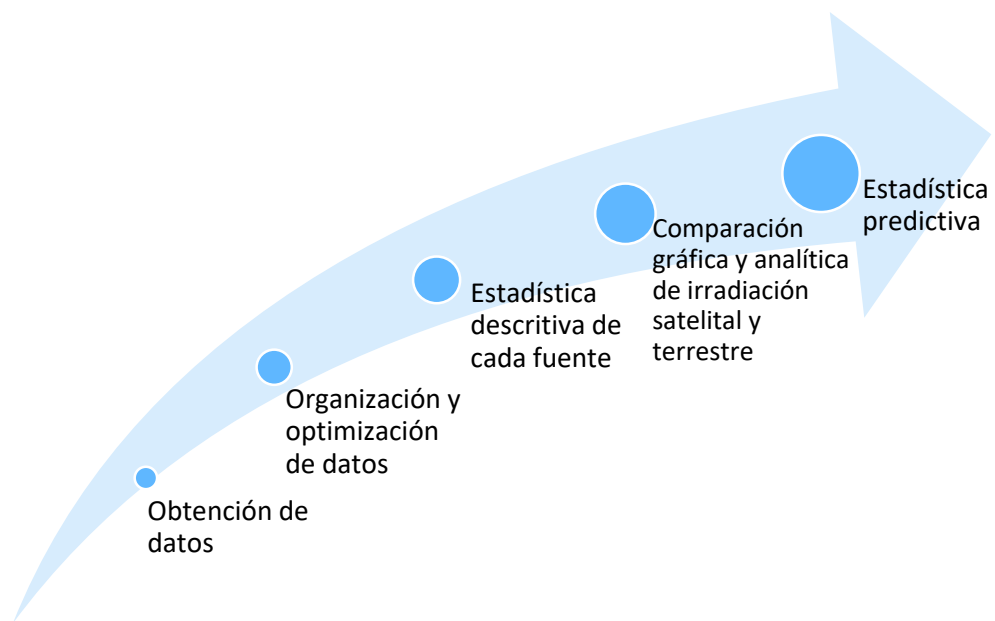


Figura 2. 4. Resumen de la metodología seguida en la estación meteorológica de Belisario.  
(Fuente: Propia)

## 2.3. Metodología condensada aplicada al resto de estaciones meteorológicas consideradas en el estudio

Después de aplicar la metodología propuesta para la estación meteorológica de Belisario, se categorizaron las mejores herramientas y procedimientos utilizados para ser aplicados al resto de estaciones meteorológicas. La metodología propuesta para el análisis de los datos de irradiancia solar del resto de estaciones meteorológicas incluidas en el estudio se muestra en la figura 2.5.

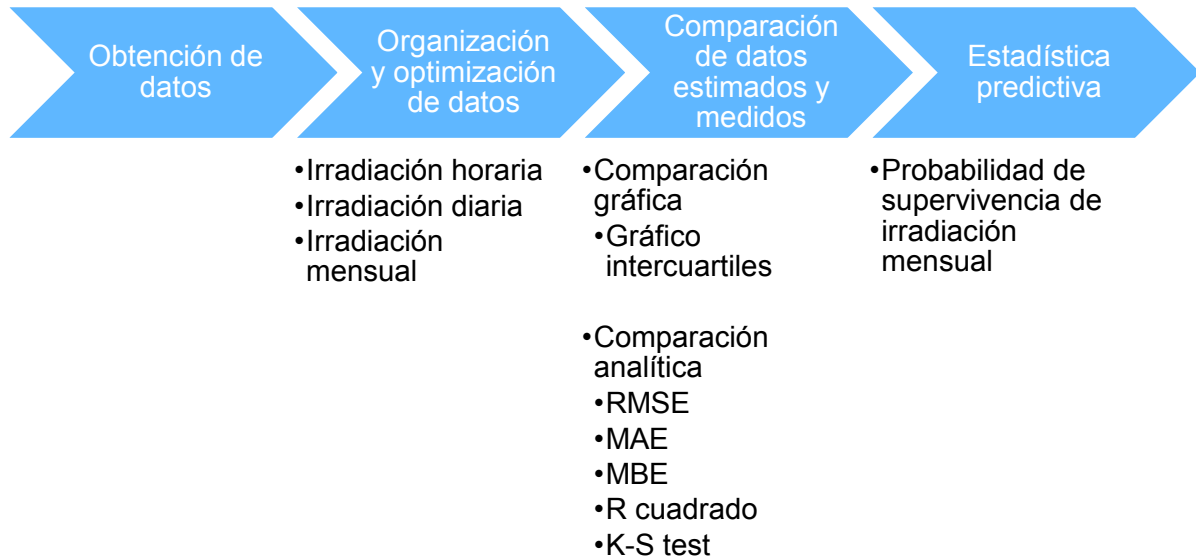


Figura 2. 5. Metodología aplicada a las estaciones meteorológicas en esta investigación.  
(Fuente: Propia)

En el siguiente capítulo se exponen los resultados obtenidos.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se detallan los resultados obtenidos tras aplicar la metodología planteada. Los resultados obtenidos para la estación meteorológica de Belisario se discuten en la primera sección. En las siguientes partes del capítulo se muestran los resultados obtenidos en el resto de las estaciones meteorológicas estudiadas clasificándolas según la institución que las maneja.

#### 3.1. Estación meteorológica Belisario

##### Descripción general de la estación

- Ubicación: Quito, en la terraza del Edificio Administrativo del Colegio San Gabriel localizado en la avenida América 3541.
- Fechas de mediciones: desde enero 1 del 2004 hasta diciembre 31 del 2015
- Datos iniciales satelitales: 105192 datos horarios
- Datos iniciales in-situ: 103895 datos horarios
- Variable física de interés: Irradiancia solar global horizontal

##### Información del equipo de medición

- Marca: KIPP & ZONEN
- Modelo: CM3
- Fecha de adquisición: 2003
- Fechas de mantenimiento: Limpieza del domo de cuarzo del piranómetro una vez al mes y calibración anual con un patrón meteorológico viajero de marca KIPP & ZONEN modelo CMP3.



Figura 3. 1. Infraestructura externa de la estación meteorológica de Belisario.  
(Fuente: Propia)



Figura 3. 2. Placa del piranómetro instalado en la estación meteorológica de Belisario.  
(Fuente: Propia)

La estación meteorológica está instalada en la terraza del edificio administrativo del colegio San Gabriel, como se muestra en la figura 3.1., la cual registra mediciones de temperatura ambiente, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, irradiación global horizontal, humedad relativa y precipitación. En su interior se encuentran los equipos de decodificación (data logger) y transmisión de datos, así como un medidor de presión atmosférica y un equipo analizador de partículas y gases en el aire, junto con un equipo de aire acondicionado para mantener la temperatura de operación de los equipos. El piranómetro está instalado en la parte más elevada de la estación con la finalidad de que el domo del piranómetro no se encuentre influenciado por las sombras de la geografía del lugar.



(a)

(b)

Figura 3. 3. Geografía en la localidad de la estación meteorológica de Belisario. (a) Vista hacia el este, y (b) hacia el oeste.

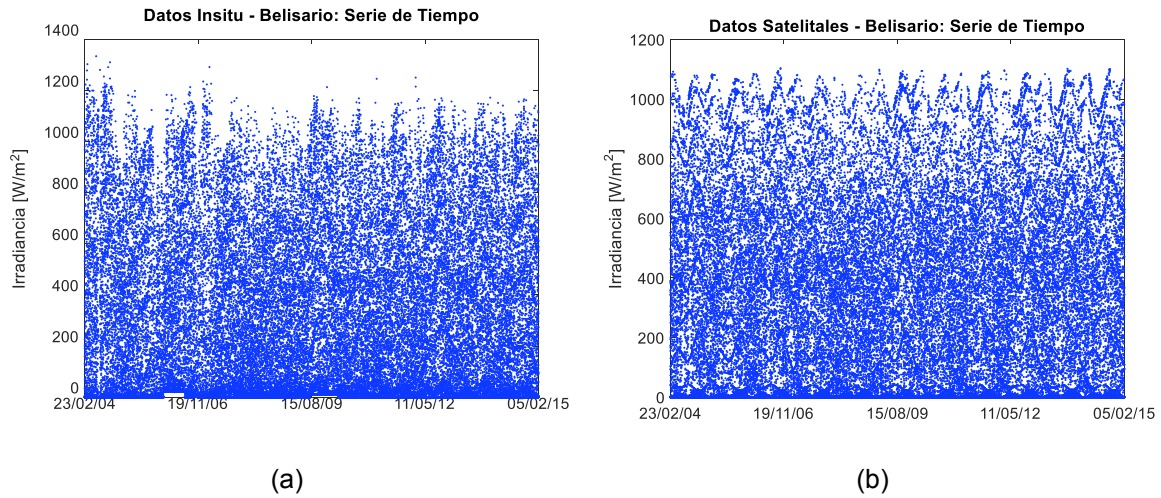
(Fuente: Propia)

La figura 3.3. (a) muestra la no existencia de sombras que interfieran en las mediciones del piranómetro en horas de la mañana en la estación. Por otro lado, la figura 3.3. (b) indica que las sombras de las elevaciones Guagua Pichincha y Rucu Pichincha influyen en las mediciones en horas de la tarde.

### 3.1.1. Estadística descriptiva

#### 3.1.1.1. Series de tiempo

Las series de tiempo, en la figura 3.4., indican ciertas agregaciones de los datos de irradiancia solar global horizontal, por lo que es necesario desagregar y agregar los datos de diferentes maneras para obtener mayor información de ellos.



(a) (b)  
Figura 3. 4. Series de tiempo para los datos terrestres (a), y satelitales (b) de la estación meteorológica de Belisario de todos los años recopilados.  
(Fuente: Propia)

Se puede observar que los datos se agregan siguiendo aproximadamente funciones sinusoidales. En la figura 3.5., se presenta la serie de tiempo para un año de ejemplo, en este caso el año 2004.

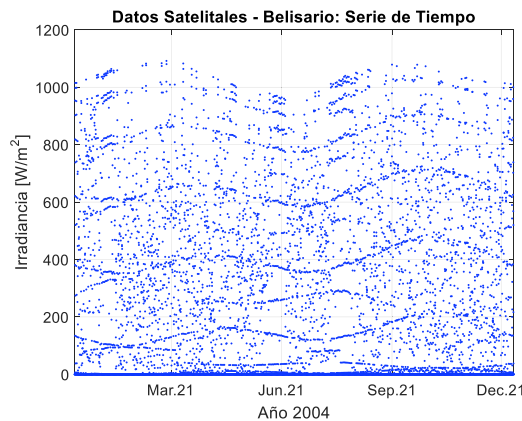


Figura 3. 5. Serie de tiempo para datos satelitales de la estación meteorológica de Belisario año 2004.  
(Fuente: Propia)

Las crestas y los valles de las agrupaciones de datos, mostrados en la figura 3.5., corresponden a las equinoccios y solsticios en el año. Las crestas concuerdan con los equinoccios, y los valles con los solsticios. De hecho, en fechas cercanas a los equinoccios se espera mayor radiación solar ya que la declinación solar al aproximarse a cero, la trayectoria solar se acerca más al cenit solar y sucede de manera contraria en fechas cercanas a los solsticios [12, 45].

### 3.1.1.2. Desagregación horaria

En la figura 3.6. se muestra que entre las 19 y las 5 horas existen valores de irradiancia menores a  $25 \text{ W/m}^2$ , sin embargo, a estas horas se esperarían valores de  $0 \text{ W/m}^2$  debido a que son horas nocturnas. Estos valores nocturnos de irradiancia se los atribuye a la presencia de luz artificial en las cercanías de la estación meteorológica y a la luz proveniente de la luna. Consecuentemente, se eliminarán del estudio los datos terrestres y satelitales de irradiación solar menores a  $50 \text{ W/m}^2$ .

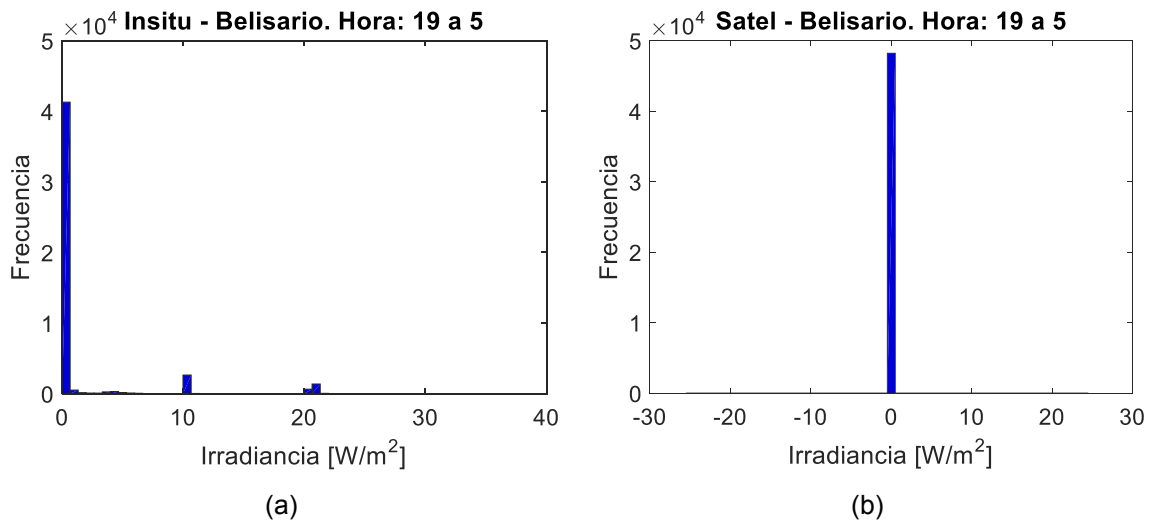


Figura 3. 6. Agregación nocturna para los datos terrestres (a) y satelitales (b) de la estación meteorológica de Belisario de todos los años recopilados.  
(Fuente: Propia)

Después de optimizar los datos se obtuvo la figura 3.7. que resume la desagregación horaria.

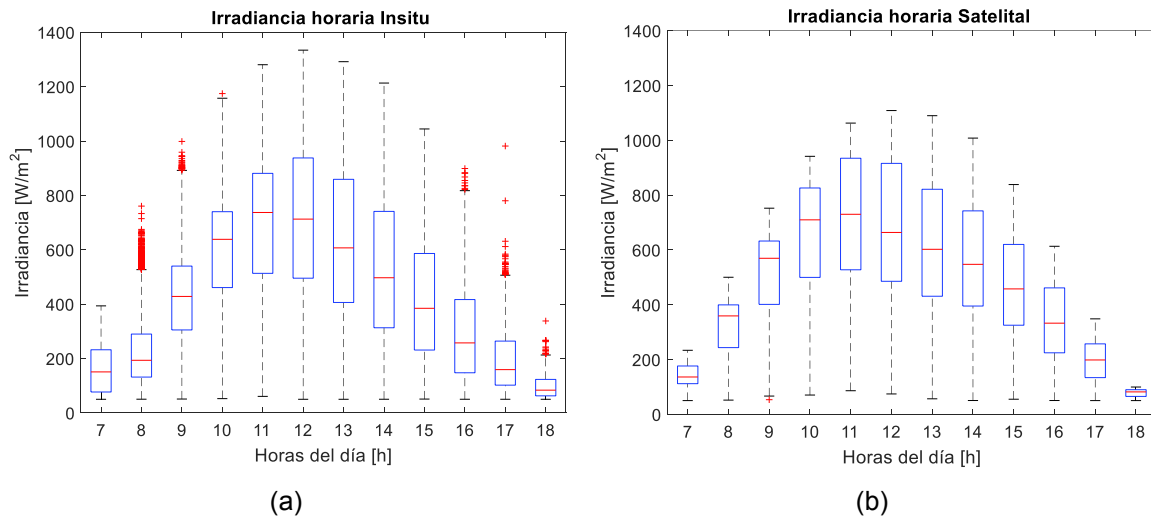


Figura 3. 7. Desagregación horaria para los datos terrestres (a) y satelitales (b) de la estación meteorológica de Belisario de todos los años recopilados.  
(Fuente: Propia)

La figura 3.7. indica la existencia de diferentes poblaciones en los datos, las cuales corresponden a cada hora diurna. Una de las variables que influyen en la posición solar es la hora del día [11, 12]. Además, se puede observar que, tanto en las mediciones terrestres como en las satelitales, las medianas son mayores a  $600\text{W/m}^2$  entre las 10 y 13 horas. La radiación solar es ampliamente influenciada por el factor de masa de aire por lo que la radiación solar es más alta cuando la masa de aire por la que debe pasar es menor [48]. Además, es evidente que la irradiancia medida forma distribuciones estadísticas con mayor dispersión de datos que la irradiancia estimada ya que los bigotes de los diagramas poseen mayor longitud. A las 12 horas, las mediciones terrestres varían de  $50\text{W/m}^2$  a  $1334\text{W/m}^2$ , en contraste con los datos satelitales que a esa hora varían de  $50\text{W/m}^2$  a  $1108\text{W/m}^2$ . En la gráfica de irradiancia horaria terrestre, los signos de adición rojos de los diagramas caja-bigote indican la cola de la distribución en cada hora, es decir son valores atípicos [49]. Al tener una proporción de valores atípicos de 338:41042, equivalente al 0,82%, estos valores no serán retirados ya que no influyen en el estudio estadístico.

Seguidamente se agregará los datos con la finalidad de encontrar el menor número de poblaciones que contienen. Se plantea el estudio de las agregaciones mañana y tarde en el conjunto de datos satelitales y terrestres.



### 3.1.1.3. Agregación de datos de la mañana y tarde

#### Agregación mañana

Después del proceso de optimización de datos, se agrupó los datos de irradiancia solar entre las 6 am y 12 am para formar la agregación mañana. La figura 3.8. indica los histogramas de densidad de las agregaciones mañana terrestres y satelitales. Además, se muestra la curva de ajuste más aproximada según una distribución normal.

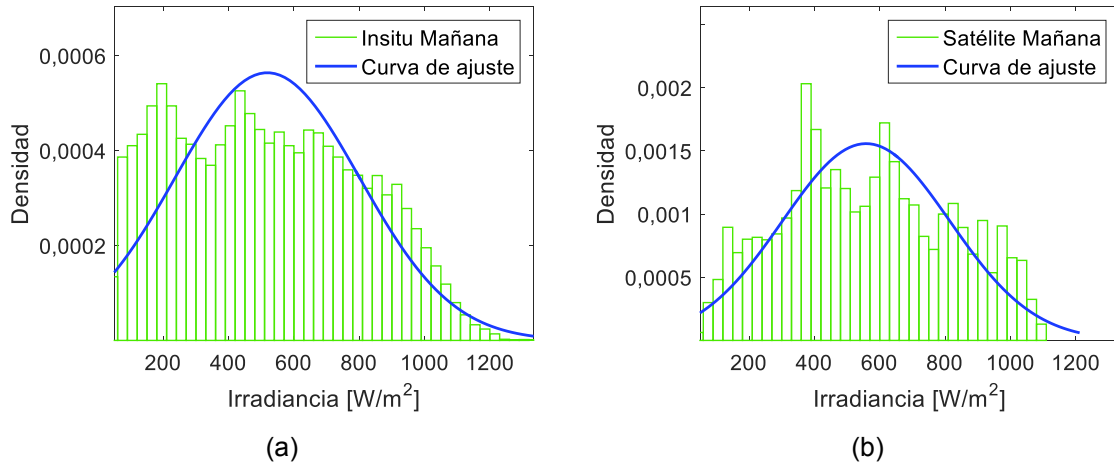


Figura 3. 8. Histograma de las agregaciones de la mañana de datos terrestres (a) y satelitales (b) de la estación meteorológica de Belisario de todos los años recopilados.  
(Fuente: Propia)

Los parámetros de ajuste de la curva normal se muestran en la tabla 3.1. Al ajustarse a una curva normal, los parámetros de ajuste son la media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ) relacionada al conjunto de datos.

Tabla 3. 1. Parámetros de las curvas de ajuste de las agregaciones de la mañana de los datos terrestres y satelitales de la estación meteorológica de Belisario.

<i>Mañana</i>	<b>Datos terrestres</b>			<b>Datos satelitales</b>			
	<i>Parámetro</i>	<i>Medio</i>	<i>Confianza</i>		<i>Medio</i>	<i>Confianza</i>	
			<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>		<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
$\mu$ ( $W/m^2$ )	518,480	514,762	522,198	558,413	555,048	561,778	
$\sigma$ ( $W/m^2$ )	283,061	280,457	285,714	256,203	253,846	258,605	

(Fuente: Propia)

La tabla 3.1. indica que la media de las curvas de ajuste de los datos terrestres y satelitales difiere en  $40\text{W/m}^2$ . Los datos satelitales al ser mayores que los terrestres dan una muestra de que el modelo de cálculo utilizado (*PSM*) sobreestima en  $40\text{W/m}^2$  a las mediciones terrestres. La desviación estándar de los datos terrestres es mayor que la de los satelitales, por lo que, las mediciones terrestres tienen una mayor dispersión.

En la figura 3.9. se muestra la probabilidad de supervivencia empírica y teórica de los datos terrestres y satelitales.

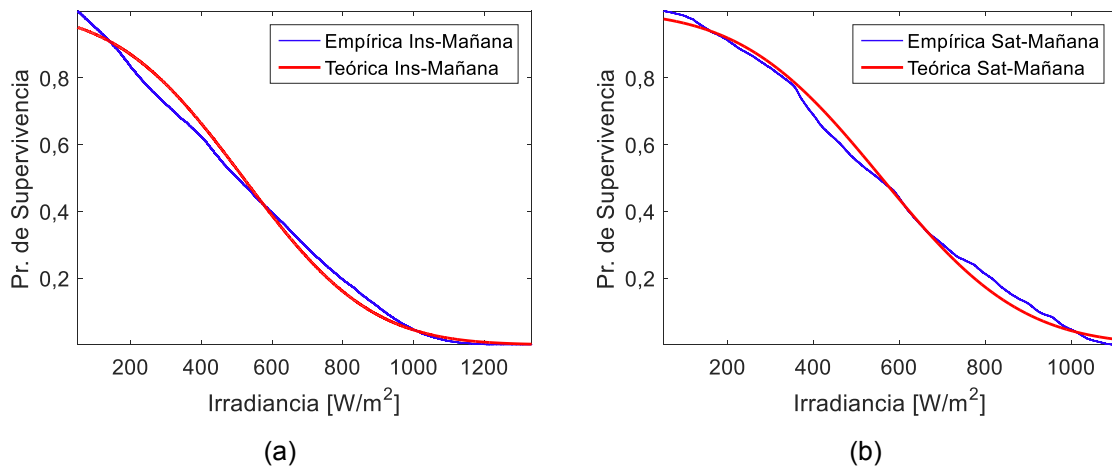


Figura 3. 9. Probabilidad de supervivencia empírica y teórica de las agregaciones de la mañana de los datos terrestres (a) y satelitales (b) de la estación meteorológica de Belisario. (Fuente: Propia)

Las gráficas de probabilidad empírica y teórica deben asemejarse para que el modelo de ajuste normal aplicado a las agregaciones de los datos terrestres y satelitales de la mañana sea correcto. Las probabilidades empíricas y teóricas difieren en máximo 0,04 por lo que son funciones semejantes.

Tabla 3. 2. Probabilidad empírica y teórica de supervivencia de las agregaciones de la mañana de los datos terrestres y satelitales de la estación meteorológica de Belisario.

<i>Mañana</i>	<b>Datos terrestres</b>		<b>Datos Satelitales</b>	
<b>Irradiancia</b> <i>(W/m<sup>2</sup>)</i>	<b>Pr. Empírica</b>	<b>Pr. Teórica</b>	<b>Pr. Empírica</b>	<b>Pr. Teórica</b>
500	0,50	0,52	0,55	0,59
600	0,40	0,39	0,44	0,43
700	0,29	0,26	0,30	0,29
800	0,20	0,16	0,21	0,17
900	0,11	0,09	0,12	0,09

(Fuente: Propia)

Las probabilidades de supervivencia empíricas y teóricas del conjunto de datos satelitales son mayores a las relacionadas a los datos terrestres, dando otro indicio de que el modelo *Physical Solar Model (PSM)* sobreestima a las mediciones terrestres. Seguidamente en la figura 3.10. se indica la relación existente entre la probabilidad de supervivencia empírica y teórica para los datos terrestres y satelitales.

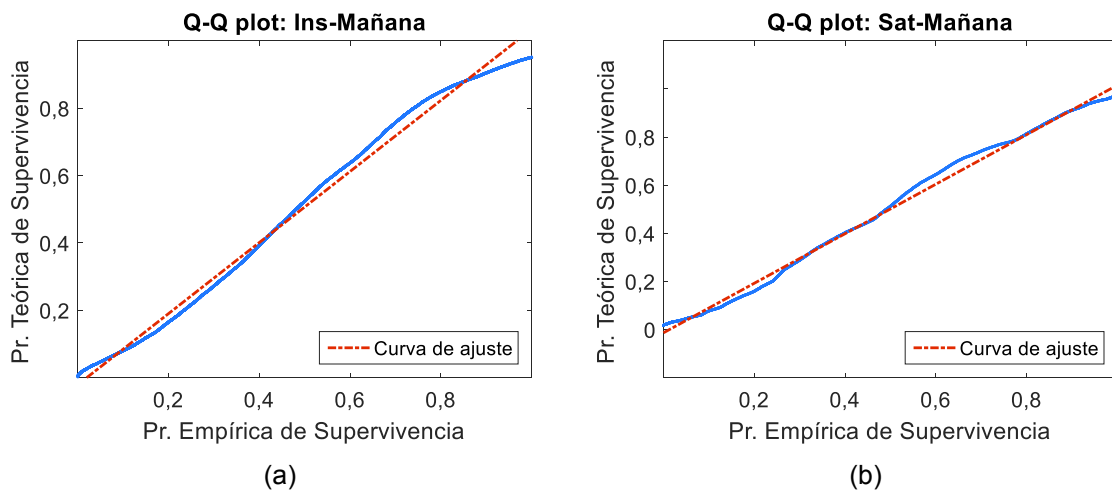


Figura 3. 10. Comparación de la probabilidad empírica y teórica de supervivencia de las agregaciones de la mañana de los datos terrestres (a) y satelitales (b) para la estación meteorológica de Belisario.

(Fuente: Propia)

La figura 3.10. debe asemejarse a la función  $y=x$  ya que la probabilidad de supervivencia empírica debe ser igual a la teórica tanto para datos satelitales como para mediciones terrestres. Los parámetros de las curvas de ajuste de la figura 3.10. se resumen en la tabla 3.3.

Tabla 3. 3. Parámetros de las curvas de ajuste de la figura 3.10.

<i>Mañana</i>	<b>Curva de ajuste</b>						<b>Coefficiente de correlación</b>	<b>Error medio cuadrático</b>	
<b>In-situ</b>	y	=	1,055	*	x	+	-0,0208	0,992	0,0283
<b>Satelital</b>	y	=	1,029	*	x	+	-0,0137	0,995	0,0232

(Fuente: Propia)

Los parámetros indican que las curvas de ajuste en los diagramas Q-Q se relacionan satisfactoriamente con los puntos graficados ya que el primer parámetro es cercano a uno y el segundo a cero para el conjunto de datos terrestres y satelitales. Consecuentemente se observa que el modelo teórico, función normal, se ajusta correctamente a las funciones de densidad experimental terrestre y satelital mostradas anteriormente en los histogramas, en la figura 3.8.

### Agregación tarde:

La agregación tarde reúne los datos de irradiancia solar entre las 13 pm y 18. La figura 3.11. indica los histogramas de densidad de las agregaciones de la tarde terrestres y satelitales, además, se muestra la curva de ajuste más aproximada según una distribución log-normal.

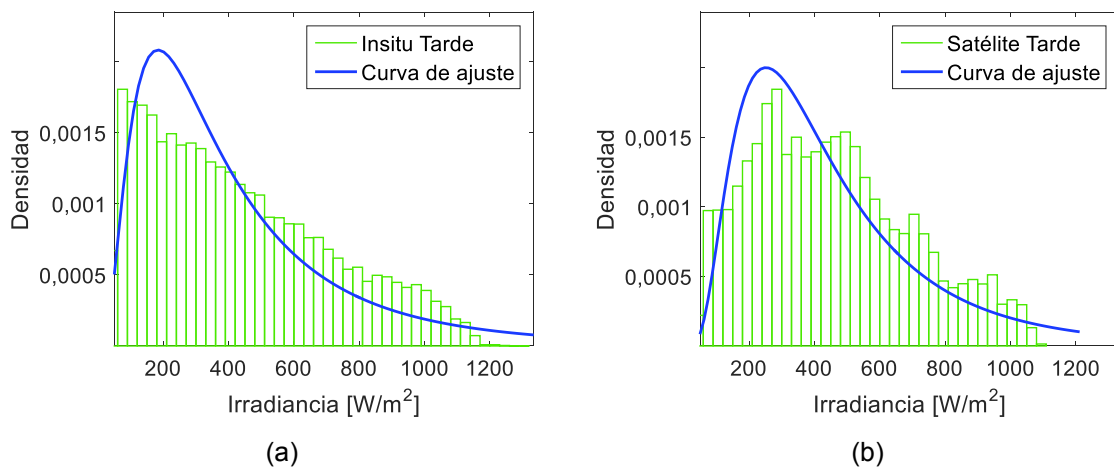


Figura 3. 11. Histograma de las agregaciones de la tarde de los datos terrestres (a) y satelitales (b) de la estación meteorológica de Belisario.

(Fuente: Propia)

Los parámetros de la curva de ajuste se muestran en la tabla 3.4. Al ajustarse a una curva log-normal, los parámetros de ajuste son la media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ) relacionados al logaritmo del conjunto de datos.

Tabla 3. 4. Parámetros de las curvas de ajuste de las agregaciones de la tarde de los datos terrestres y satelitales de la estación meteorológica de Belisario.

<i>Tarde</i>	<b>Datos terrestres</b>			<b>Datos satelitales</b>		
<i>Parámetro</i>	<i>Medio</i>	<i>Confianza</i>		<i>Medio</i>	<i>Confianza</i>	
		<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>		<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
$\mu$ ( $\ln(W/m^2)$ )	5,811	5,800	5,823	5,983	5,934	5,952
$\sigma$ $\ln((W/m^2))$	0,773	0,765	0,780	0,644	0,637	0,650

(Fuente: Propia)

La tabla 3.4. indica que la media de las curvas de ajuste del logaritmo de los datos terrestres y satelitales difiere en  $0,172 \ln(W/m^2)$ . De igual manera, el método de cálculo de los datos satelitales sobreestima a los terrestres. La desviación estándar de los datos terrestres es mayor que la de los satelitales, dando otro indicio de que las mediciones terrestres tienen una mayor dispersión. La curva de ajuste en la agregación mañana es normal y en la tarde es una log-normal ya que comúnmente en la ciudad de Quito, en la mañana hay menos frecuencia de fenómenos de nubosidad que en la tarde. En la tarde la nubosidad reduce significativamente la cantidad de irradiancia que llega a la superficie haciendo que la media de la función se desplace hacia la izquierda.

En la figura 3.12. se muestra la probabilidad de supervivencia empírica y teórica de los datos terrestres y satelitales.

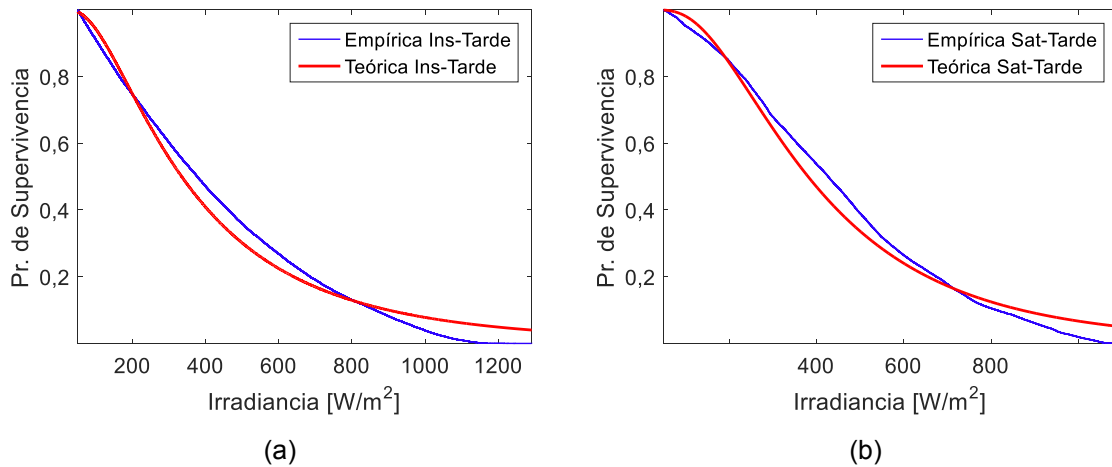


Figura 3. 12. Probabilidad de supervivencia empírica y teórica de las agregaciones de la tarde de los datos terrestres y satelitales de la estación meteorológica de Belisario.  
(Fuente: Propia)

Las gráficas de probabilidad empírica y teórica deben asemejarse para que el modelo de ajuste log-normal aplicado a las agregaciones de los datos terrestres y satelitales de la tarde sea correcto.

Tabla 3. 5. Probabilidad empírica y teórica de supervivencia de las agregaciones de la tarde de los datos terrestres y satelitales de la estación meteorológica de Belisario.

<i>Tarde</i>	<b>Datos terrestres</b>		<b>Datos satelitales</b>	
<b>Irradiancia (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Pr. Empírica</b>	<b>Pr. Teórica</b>	<b>Pr. Empírica</b>	<b>Pr. Teórica</b>
500	0,36	0,30	0,39	0,34
600	0,27	0,22	0,26	0,24
700	0,19	0,17	0,18	0,17
800	0,13	0,13	0,10	0,12
900	0,08	0,09	0,06	0,09

(Fuente: Propia)

Las probabilidades empíricas y teóricas difieren en máximo 0,06 por lo que son funciones semejantes. Seguidamente en la figura 3.13. se indica la relación existente entre la probabilidad de supervivencia empírica y teórica para los datos terrestres y satelitales.

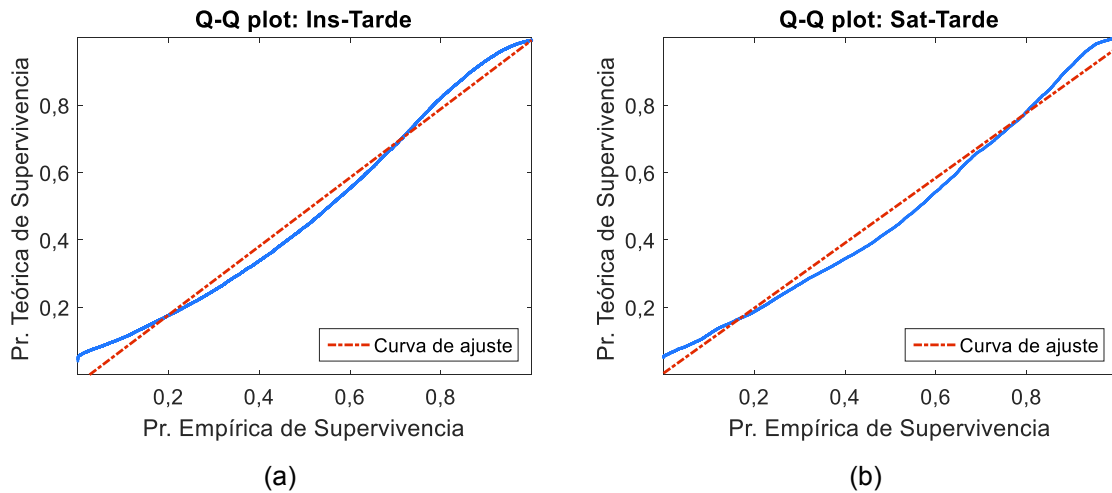


Figura 3. 13. Comparación de la probabilidad empírica y teórica de supervivencia de las agregaciones de la tarde de los datos terrestres y satelitales para la estación meteorológica de Belisario.  
(Fuente: Propia)

La figura 3.13. debe asemejarse a la función  $y=x$  ya que la probabilidad de supervivencia empírica debe ser igual a la teórica tanto para datos satelitales como para mediciones terrestres. Los parámetros de las curvas de ajuste de la figura 3.13. se resumen en la tabla 3.6.

Tabla 3. 6. Parámetros de las curvas de ajuste de la figura 3.13.

<i>Tarde</i>	<b>Curva de ajuste</b>						<b>Coefficiente de correlación</b>	<b>Error medio cuadrático</b>
<b>In-situ</b>	y	=	1,019	*	x	+ -0,0264	0,986	0,0356
<b>Satelital</b>	y	=	0,967	*	x	+ 0,004	0,987	0,0348

(Fuente: Propia)

De igual manera que en la agregación mañana, los parámetros indican que las curvas de ajuste en los diagramas Q-Q plot se relacionan satisfactoriamente con los puntos graficados, ya que el primer parámetro es cercano a uno y el segundo a cero para el conjunto de datos terrestres y satelitales. Consecuentemente, el conjunto de datos en la mañana tiende a formar una función de densidad normal y en la tarde tienden a formar una función de densidad log-normal. Como ya se explicó anteriormente, en la tarde la nubosidad característica en de Quito, reduce significativamente la cantidad de irradiancia que llega a la superficie haciendo que la media de la función se desplace hacia la izquierda.

### 3.1.1.4. Agregación mensual

La figura 3.14. indica la agregación mensual de los datos de irradiación solar en la estación meteorológica de Belisario.

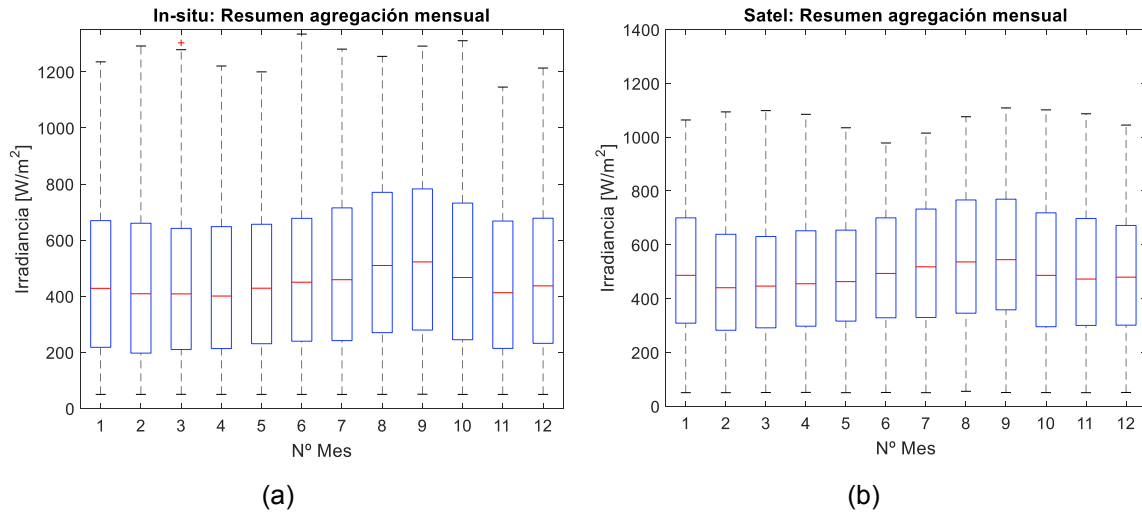


Figura 3. 14. Resumen mensual de los datos terrestres (a) y satelitales (b) de irradiación solar de todos los años recopilados.  
(Fuente: Propia)

Al agregar la irradiación mensualmente, como se muestra en la figura 3.14., se percibe que en la zona geográfica en la que se encuentra la estación meteorológica de Belisario los meses con las mayores medianas de irradiación son agosto y septiembre, cuyos valores sobrepasan los 500 W/m<sup>2</sup>.



### 3.1.1.5. Agregación anual

La figura 3.15. indica la agregación mensual de los datos de irradiación solar en la estación meteorológica de Belisario.

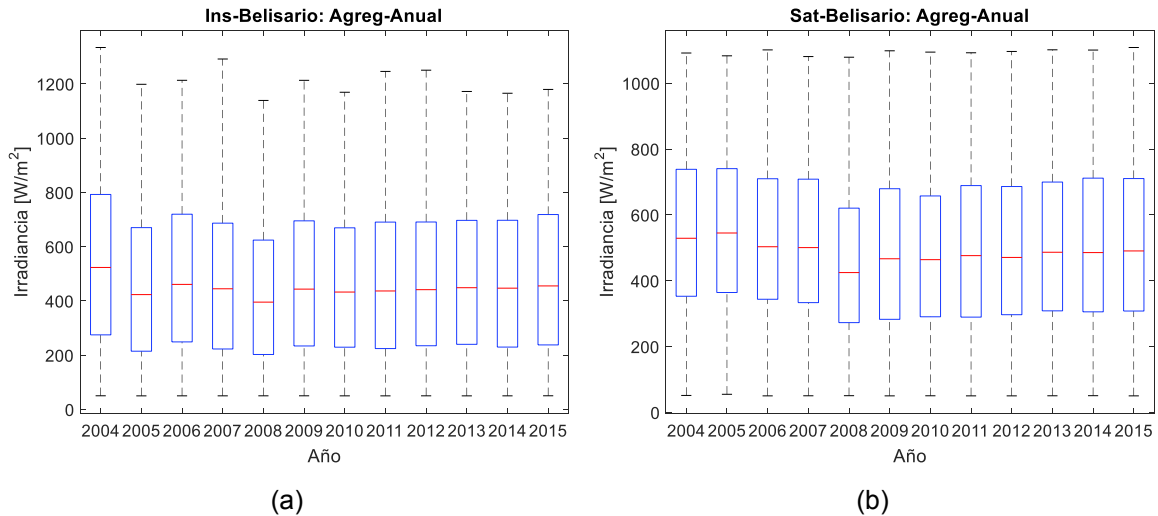


Figura 3. 15. Resumen anual de los datos terrestres y satelitales de irradiación solar.  
(Fuente: Propia)

La agregación anual indica que en año 2008 se tuvo la menor mediana de irradiación. INAMHI en su boletín meteorológico mensual correspondiente al mes de mayo del 2008 indica que en general se registraron precipitaciones mayores a sus promedios mensuales en la región interandina. En el sector de Ñaquito, el cual se localiza muy cerca a la estación meteorológica Belisario, se registró un aumento en las precipitaciones de 68% [50], afectando a la irradiación recibida. Por otro lado, se advierte en las gráficas que a partir del año 2009 la mediana de irradiación tiende a acercarse a valores de 475 W/m<sup>2</sup>, manteniéndose relativamente constante hasta el año 2015.

### 3.1.2. Comparación de los datos terrestres y satelitales de irradiación solar

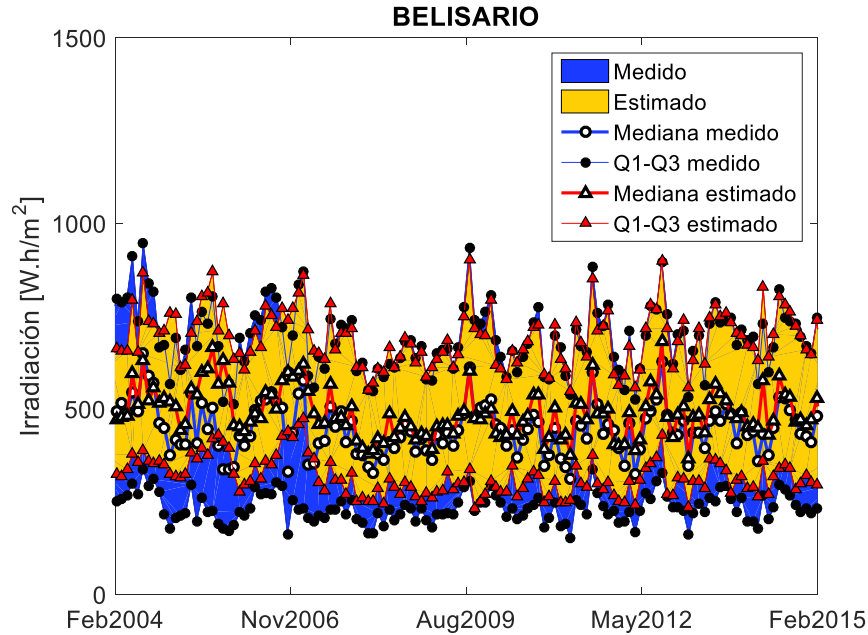


Figura 3. 16. Comparación del rango intercuartil de los datos terrestres y satelitales de irradiación solar de la estación meteorológica de Belisario.

(Fuente: Propia)

La figura 3.16. muestra claramente que los datos satelitales se encuentran menos dispersos que los terrestres ya que la región amarilla (datos satelitales) se encuentra comprendida dentro de la región azul (datos terrestres). Las regiones amarillas y azules coinciden más en el tercer cuartil que en el primero, lo cual muestra que los datos satelitales tienden a sobreestimar a las mediciones terrestres.

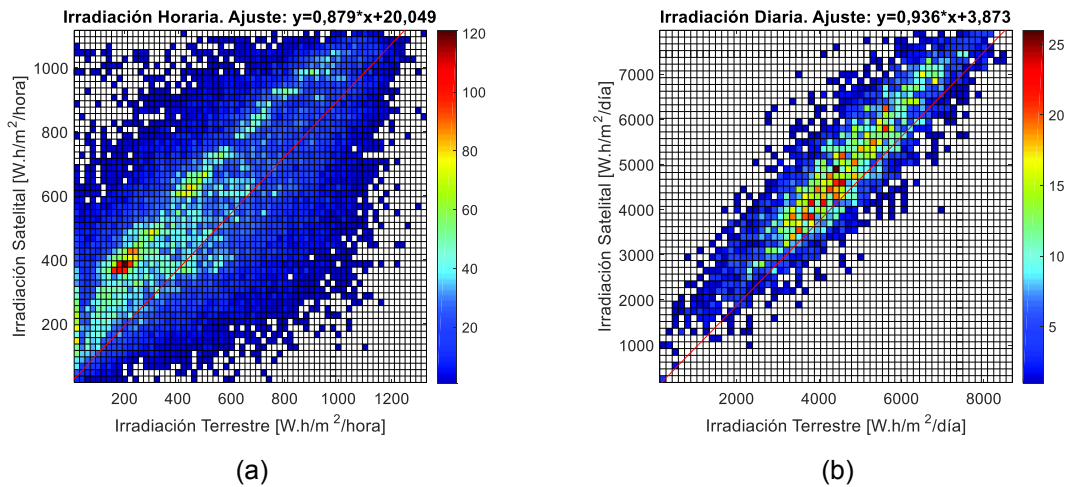


Figura 3. 17. Comparación de los datos terrestres y satelitales de irradiación solar horaria y diariamente todos los años recopilados.

(Fuente: Propia)

La figura 3.17. muestra la relación entre los datos terrestres y satelitales tanto horarios como diarios. Se esperaría un ajuste de curva lineal de pendiente 1 e intersección 0 que siga la función  $x=y$ . La curva de ajuste diaria es más cercana que la horaria a la función esperada,  $x=y$ . Se puede notar que la irradiación horaria se encuentra mucho más dispersa que la diaria. Además, la irradiación horaria al tener varias agregaciones de datos advierte la existencia de varias poblaciones, las cuales corresponden a la hora en la que fueron tomadas las mediciones.

### 3.1.2.1. Parámetros estadísticos de comparación aplicados a cada hora del día

Se aplicaron los indicadores estadísticos MAE, MBE y RMSE a los datos de irradiación horaria de la estación meteorológica de Belisario. La figura 3.18. resume los resultados encontrados.

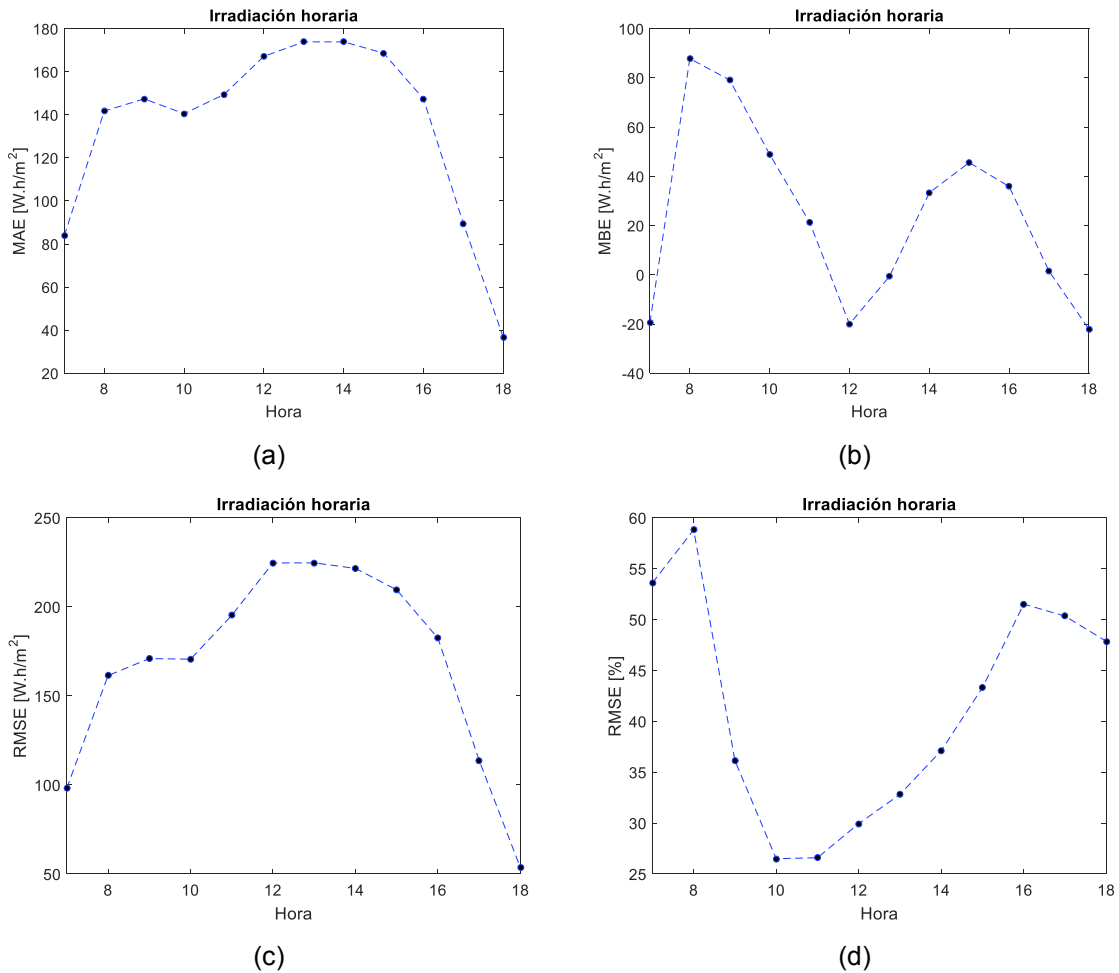


Figura 3. 18. Parámetros estadísticos aplicados a irradiación horaria de la estación meteorológica de Belisario todos los datos recopilados. (a) MAE [W.h/m<sup>2</sup>], (b) MBE [W.h/m<sup>2</sup>], (c) RMSE [W.h/m<sup>2</sup>] y (d) RMSE [%].  
(Fuente: Propia)

Los resultados de error son más visibles al ser expresados en porcentajes. Los indicadores estadísticos aplicados varían dependiendo de la hora en la que fueron tomados los datos, según la figura 3.18. Los puntos máximos de MAE y RMSE se encuentran entre las 12 y 14 horas debido a que la irradiación es mayor que en el resto del día. A una misma hora, el RMSE es mayor que el MAE ya que por definición la fórmula para calcular el RMSE es la misma de la del MAE aumentado un exponencial cuadrático que incrementa su valor. El RMSE porcentual tiene su mínimo entre las 10 y 13 horas, por lo que son más fiables los valores satelitales a esas horas, lo cual se atribuye al menor factor de masa de aire existente en esas horas. Entre las 10 y 13 horas, el factor de masa de aire es menor que a otras horas, por lo que la cantidad de partículas de ozono, oxígeno, vapor de agua y dióxido de carbono influye de menor manera al calcular la radiación mediante el modelo *PSM*. Además, entre esas horas en la ciudad de Quito generalmente el cielo se encuentra despejado, haciendo que las estimaciones se hagan mayormente con el modelo de cielo despejado de NREL. Según la validación del modelo de estimación de NREL [29] el modelo de cielo despejado es más preciso que el de cielo nublado, lo cual se comprobará al aplicar la hipótesis de nubosidad a los datos de la estación de Belisario. Según el estadístico MBE, los valores satelitales sobreestiman entre las 8 y 11 horas, subestiman entre las 12 y 13 horas, y sobrestiman entre las 14 y 16 horas. La variación del MBE se lo atribuye al factor de masa de aire, disminuye el MBE al presentarse un menor factor de masa de aire. Los resultados a las 7, 17 y 18 horas no se encuentran dentro del análisis ya que la mayoría de sus datos son menores a  $50 \text{ W/m}^2$  y la cantidad remanente de ellos no es suficiente para tener una buena confiabilidad de los parámetros estadísticos.

### 3.1.2.2. Hipótesis de nubosidad

Después de agregar los datos según la hipótesis de nubosidad planteada, se aplicaron los indicadores estadísticos MAE, MBE y RMSE a los datos de irradiación solar de la estación meteorológica de Belisario. La figura 3.19. resume los resultados encontrados.

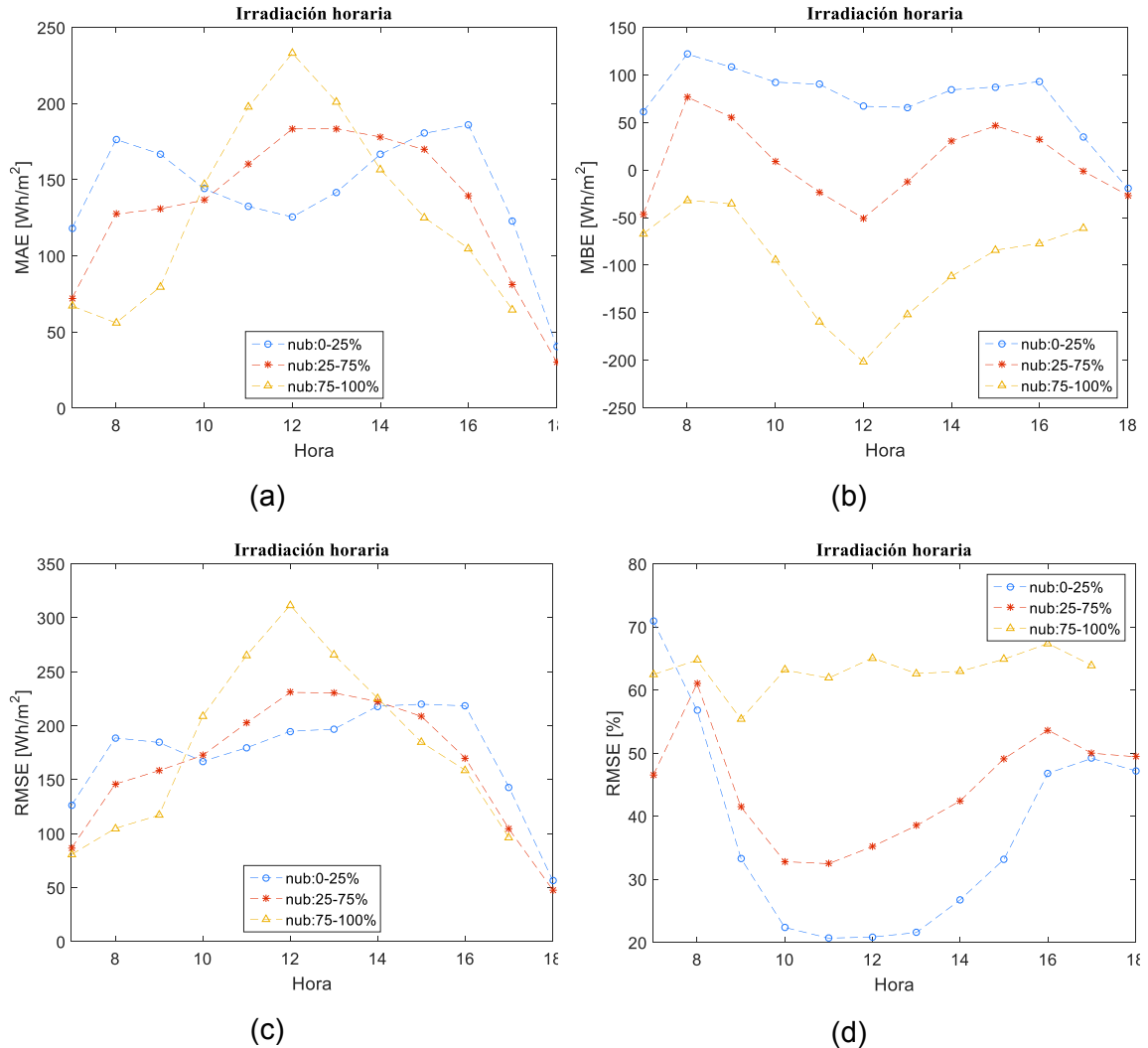


Figura 3. 19. Parámetros estadísticos aplicados a irradiación horaria de la estación meteorológica de Belisario diferenciando el factor de nubosidad. (a) MAE [W.h/m<sup>2</sup>], (b) MBE [W.h/m<sup>2</sup>], (c) RMSE [W.h/m<sup>2</sup>] y (d) RMSE [%].

(Fuente: Propia)

Se aprecia en figura 3.19. que los mejores resultados de los indicadores estadísticos se dan cuando el factor de nubosidad indica escenarios con cielo despejado entre las 10 y 13 horas. Consecuentemente, el modelo matemático implementado por el NREL obtiene mejores datos de radiación solar global horizontal en escenarios con cielo despejado y cuando el factor de masa de aire es mínimo. Además, cuando el factor de nubosidad indica escenarios con cielo despejado, el indicador estadístico MBE al ser positivo manifiesta que

el modelo matemático del NREL sobreestima la radiación global horizontal terrestre de la localidad, y en escenarios con cielo nublado la subestima. El análisis de la hipótesis de nubosidad demuestra la división del modelo matemático del NREL en escenarios con cielo nublado y cielo despejado. Como se discutió en el primer capítulo, el NREL utiliza el modelo REST2 en escenarios con cielo despejado y el modelo FARMS en escenarios con cielo nublado para el cálculo de la irradiancia solar global horizontal.

### 3.1.2.3. Indicadores estadísticos de comparación:

El resultado del K-S test puede ser cero o uno. Un resultado de cero indica que las estimaciones y mediciones son comparables, y un resultado de uno lo contrario. Los indicadores estadísticos de comparación han sido aplicados a los datos satelitales y terrestres de irradiación horaria (H), diaria (D) y mensual (M), como se muestra en la tabla 3.7.

Tabla 3. 7. Resumen de resultados horarios (H), diarios (D) y mensuales (M) de comparación de la estación meteorológica de Belisario para cada año de medición. El color verde indica que la prueba K-S fue positiva y el rojo que fue negativa.

<b>Comparación de la irradiación terrestre y satelital en la estación Belisario</b>							
<b>Año</b>	<b>H/D/M</b>	<b>RMSE</b>	<b>MBE</b>	<b>MAE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>K-S test</b>	<b>K-S test indicador</b>
	Horario Diario Mensual	[%]	[%]	[%]	[-]	1 Negativo 0 Positivo	[-]
2004	H	32,45	-0,32	54,42	0,5763	1	< 0,0001
	D	14,14	-0,32	14,05	0,7877	0	0,6761
	M	7,24	-0,32	6,49	0,7762	0	0,9913
2005	H	39,52	20,61	72,91	0,5606	1	< 0,0001
	D	26,94	20,61	33,99	0,753	1	< 0,0001
	M	23,25	20,61	24,26	0,7136	0	0,1862
2006	H	32,63	6,73	59,93	0,6100	1	< 0,0001
	D	16,5	6,73	22,46	0,8303	1	0,0024
	M	11,91	6,73	11,77	0,9202	0	0,7864
2007	H	31,07	10,67	53,43	0,6734	1	< 0,0001
	D	17,75	10,67	19,47	0,8097	1	0,0089
	M	11,83	10,67	12,06	0,9304	0	0,1862
2008	H	38,26	6,67	52,88	0,5062	1	< 0,0001
	D	15,61	6,67	15,23	0,7900	0	0,066
	M	7,24	6,67	6,74	0,8211	0	0,1862
2009	H	34,29	3,63	48,21	0,5767	1	< 0,0001
	D	12,81	3,63	12,04	0,839	0	0,1909

	M	5,49	3,63	5,21	0,9467	0	0,7864
2010	H	34,2	4,72	48,13	0,5777	1	< 0,0001
	D	12,58	4,72	12,5	0,8471	0	0,1367
	M	6,62	4,72	6,58	0,8881	0	0,7864
2011	H	33,67	6,42	49,22	0,5993	1	< 0,0001
	D	12,86	6,42	12,89	0,8511	1	0,0145
	M	7,17	6,42	6,78	0,9448	0	0,1862
2012	H	33,61	5,10	49,21	0,5895	1	< 0,0001
	D	11,92	5,10	11,21	0,8539	1	0,0442
	M	5,6	5,10	5,37	0,9768	0	0,4333
2013	H	33,67	6,70	47,84	0,5835	1	< 0,0001
	D	12,71	6,70	12,38	0,8389	1	0,0406
	M	7,17	6,70	6,85	0,9646	0	0,4333
2014	H	34,27	7,55	49,81	0,5843	1	< 0,0001
	D	15,74	7,55	14,28	0,7937	1	0,009
	M	8,96	7,55	7,89	0,8255	0	0,1862
2015	H	33,34	5,63	48,95	0,5971	1	< 0,0001
	D	11,09	5,63	10,93	0,8758	0	0,1146
	M	6,4	5,63	5,82	0,9275	0	0,1862

(Fuente: Propia)

Según la tabla 3.7., los datos de irradiación solar satelital y terrestre son comparables cuando el resultado del K-S test sea cero, el cual se da cuando el indicador del test es mayor a 0,05. Además, el RMSE, MBE, MAE deben ser bajos y el  $R^2$  debe acercarse a uno. En cada año el RMSE horario es mayor que el diario, y este es mayor que el mensual. Analizando el MBE, en el año 2004 los datos satelitales subestiman a los datos medidos y el resto de años los sobreestiman, existiendo una tendencia a sobreestimar por parte del modelo matemático. Horariamente los datos de irradiación satelital no pueden reemplazar a los medidos. Diariamente en los años 2004, 2008, 2009, 2010 y 2015 los datos satelitales podrían reemplazar a los medidos; sin embargo, no son muy confiables ya que los indicadores del K-S test son tan solo un poco mayor a 0,05. Mensualmente los datos de irradiación satelital son indiscutiblemente comparables con los datos medidos en todos los años. Consecuentemente la irradiancia mensual satelital puede reemplazar a la irradiancia mensual medida en la estación meteorológica de Belisario.

### 3.1.3. Estadística predictiva mensual

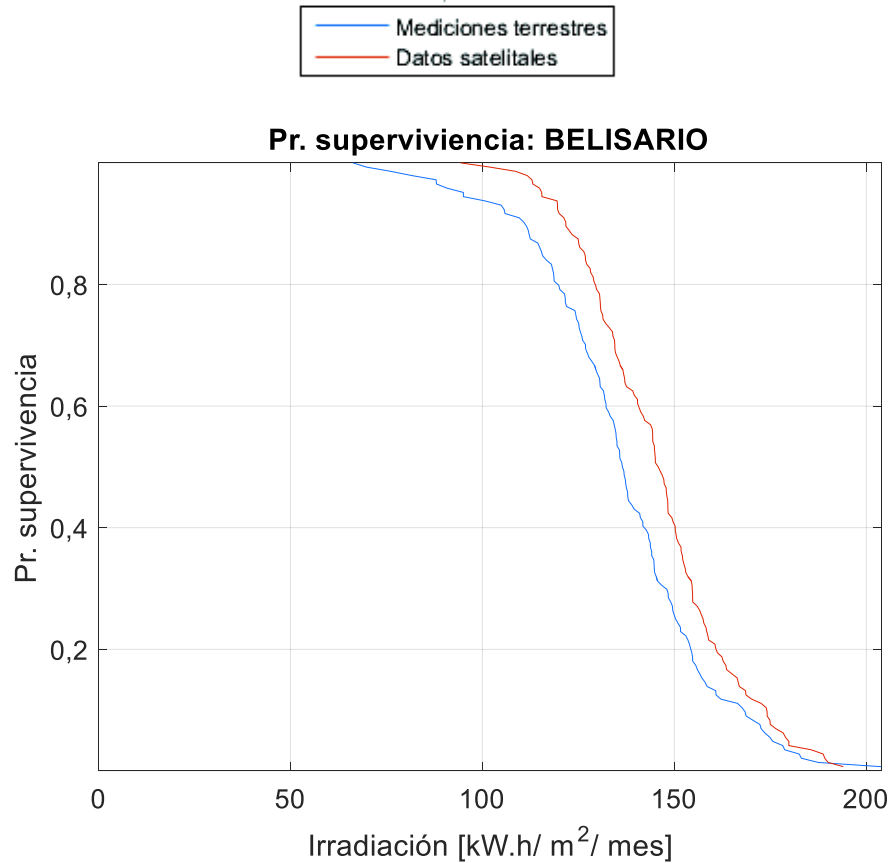


Figura 3. 20. Probabilidad de supervivencia de los datos mensuales de irradiación solar de la estación meteorológica de Belisario. (Fuente: Propia)

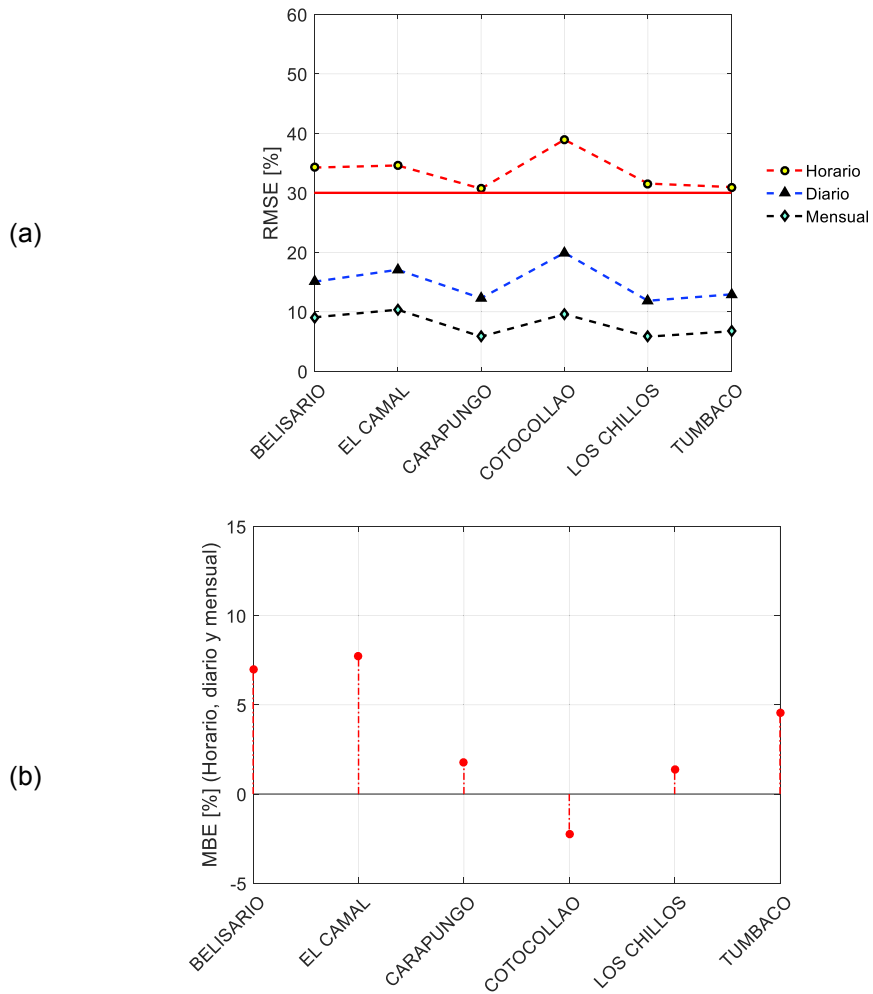
Se pueden presentar valores mayores o iguales a 120 kWh/m<sup>2</sup>/mes con una probabilidad de 80%, y mayores o iguales a 150 kWh/m<sup>2</sup>/mes el 25%. El máximo valor mensual medido en la estación meteorológica fue de 200 kWh/m<sup>2</sup>/mes, equivalente a 2400 kWh/m<sup>2</sup>/año. Este último valor es mayor a la irradiación anual en Alemania que llega a valores alrededor de 1200 kWh/m<sup>2</sup>/año, sin embargo es menor a la irradiación anual en el desierto de Atacama en Chile que llega a valores de alrededor de 2600 kWh/m<sup>2</sup>/año [51].

En la siguiente sección se discuten los resultados obtenidos mediante la metodología simplificada aplicada al resto de estaciones meteorológicas del Ecuador. Se han dividido las estaciones meteorológicas por las instituciones que las operan.



### 3.2. Estaciones meteorológicas operadas por la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito

Los resultados horarios, diarios y mensuales obtenidos anualmente se encuentran detallados en las tablas del Anexo 4. En la figura 3.21. se muestra el promedio de los estadísticos comparativos de dispersión y similitud de distribución aplicados a los datos de radiación solar de las estaciones meteorológicas operadas por la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito.



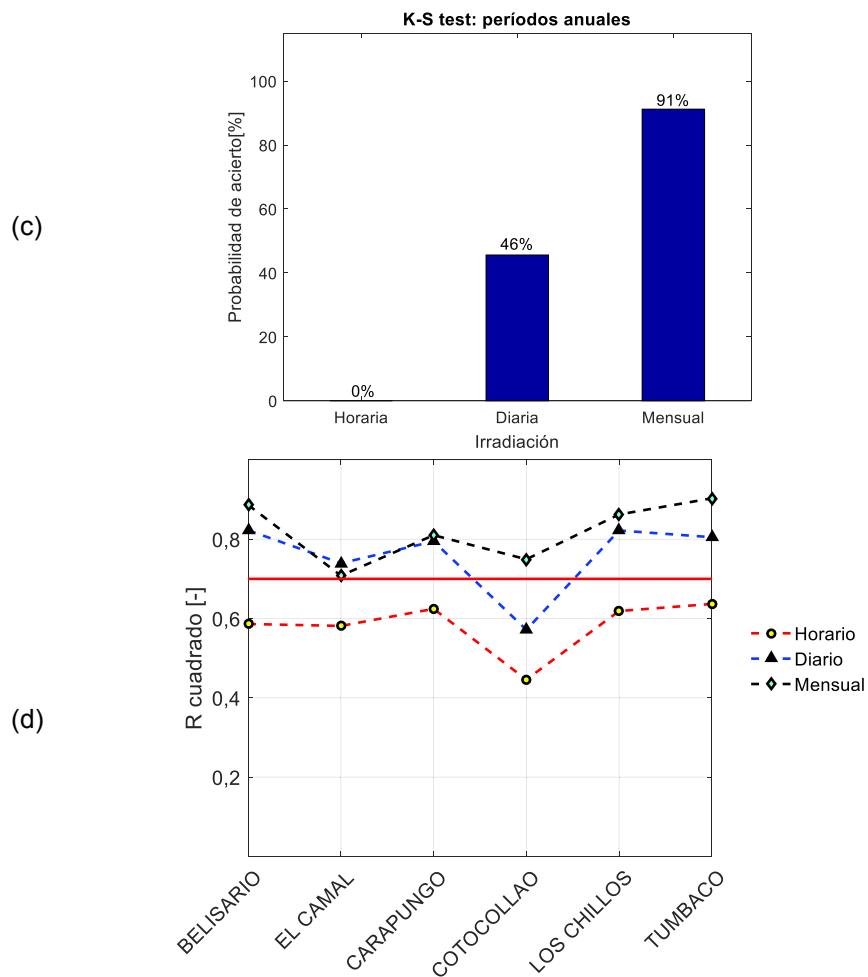
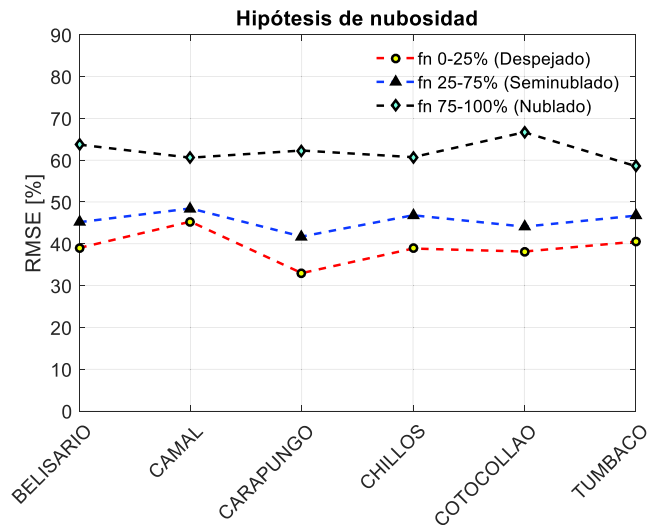


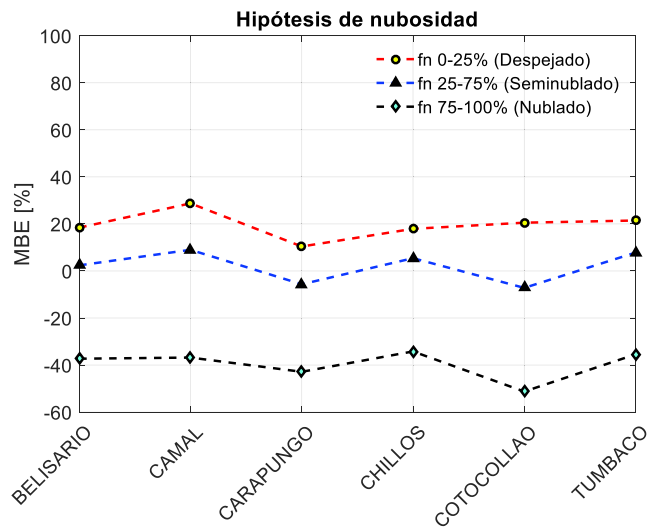
Figura 3. 21. Resumen de resultados de las estaciones meteorológicas operadas por la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito en todos los años recopilados. (a) RMSE [%], (b) MBE [%], (c) Probabilidad de acierto según el K-S test y (d) r cuadrado. (Fuente: Propia)

La figura 3.21. resume los resultados estadísticos de comparación de los datos satelitales y mediciones terrestres en las estaciones meteorológicas operadas por la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito. El parámetro RMSE varía dependiendo si la agrupación de datos de irradiación es horaria, diaria o mensual. Mensualmente el RMSE varía entre 3% y 10%, diariamente entre 9% y 19%, y horariamente entre 30% y 40%. Analizando el parámetro MBE, el cual varía entre -8,4% y 5,3%, se muestra que en las estaciones de Belisario, Camal, Carapungo, Chillos y Tumbaco existe sobreestimación del modelo matemático para obtener los datos satelitales de radiación solar sobre la irradiación terrestre medida, y en la estación de Cotocollao existe subestimación. La probabilidad de aprobar el K-S test es 91% con los datos mensuales, 46% con los datos diarios y 0% con los datos horarios. El coeficiente de determinación varía mensualmente entre 0,7 y 0,9, diariamente entre 0,57 y 0,82, y horariamente entre 0,42 y 0,64. Consecuentemente, en las

estaciones meteorológicas de la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito se obtuvieron excelentes resultados mensuales, buenos resultados diarios y resultados horarios poco significativos. A continuación, en la figura 3.22. se muestra el comportamiento de los parámetros estadísticos RMSE y MBE aplicando la hipótesis de nubosidad.



(a)



(b)

Figura 3. 22. Resumen de resultados según la hipótesis de nubosidad planteada de las estaciones meteorológicas operadas por la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito con datos horarios. (a) RMSE [%]. (b) MBE [%].

(Fuente: Propia)

La figura 3.22. indica los parámetros estadísticos aplicados a las agrupaciones horarias de datos correspondientes a la hipótesis de nubosidad planteada. El parámetro RMSE muestra que generalmente es menor cuando el factor de nubosidad indica cielo despejado

y es mayor cuando indica cielo nublado, lo cual revela que el modelo matemático satelital es más fiable cuando el cielo se encuentra despejado. El MBE manifiesta que existe sobreestimación cuando el factor de nubosidad indica cielo despejado y subestimación cuando indica cielo nublado. La sobreestimación en cielo despejado tiene una media de aproximadamente 20%, mientras que la subestimación en cielo despejado tiene una media cercana a -40%. Consecuentemente el modelo matemático satelital arroja mejores resultados cuando el factor de nubosidad indica cielo despejado.

### 3.3. Estaciones meteorológicas operadas por INAMHI

Los piranómetros de la mayoría de las estaciones meteorológicas operadas por INAMHI, estaciones automáticas y semiautomáticas, fueron instalados entre los años 2013 y 2014, por lo que el año 2015 fue el primer año con registro de mediciones. En las figuras 3.20., 3.21., 3.22., y 3.23. se muestra un resumen de los indicadores estadísticos de dispersión y similitud de distribución aplicados.

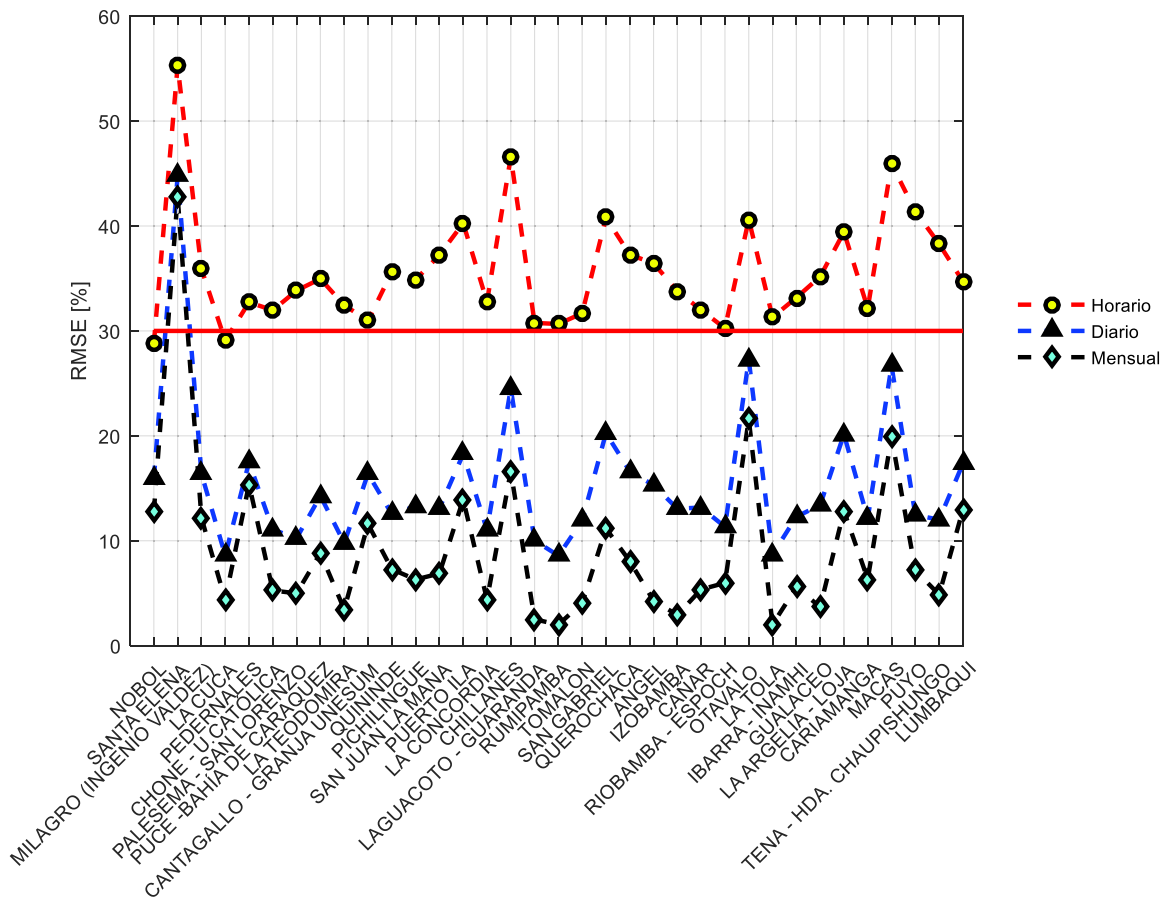


Figura 3. 23. RMSE [%] de las estaciones meteorológicas operadas por el INAMHI. (Fuente: Propia)

La figura 3.23. muestra el comportamiento del parámetro estadístico RMSE en las estaciones operadas por INAMHI. Los valores de RMSE más bajos son de las agrupaciones mensuales, seguidos por las agrupaciones diarias y horarias respectivamente. Mensualmente el parámetro RMSE varía entre 2% y 22%, sin tomar en cuenta la estación Santa Elena la cual presenta errores elevados. Diariamente RMSE varía entre 8,5% y 27,26%, y horariamente entre 28,8% y 46,57%. El estadístico RMSE evaluado en los datos horarios, diarios y mensuales de la estación meteorológica de Santa Elena es mayor a 30%, indicando un mal resultado. Este estudio sugiere que las mediciones terrestres no son correctas ya que es la única estación en la que se da este comportamiento. Sin tomar en cuenta la estación de Santa Elena, el RMSE evaluado es menor al 30% para datos diarios y mensuales de radiación solar, además, al evaluarlo para los datos horarios, RMSE tienden a acercarse al límite de aceptación del indicador. Consecuentemente el indicador estadístico RMSE afirma que diaria y mensualmente se pueden utilizar los datos calculados por el modelo matemático *Physical Solar Model* en las localidades de las estaciones analizadas.

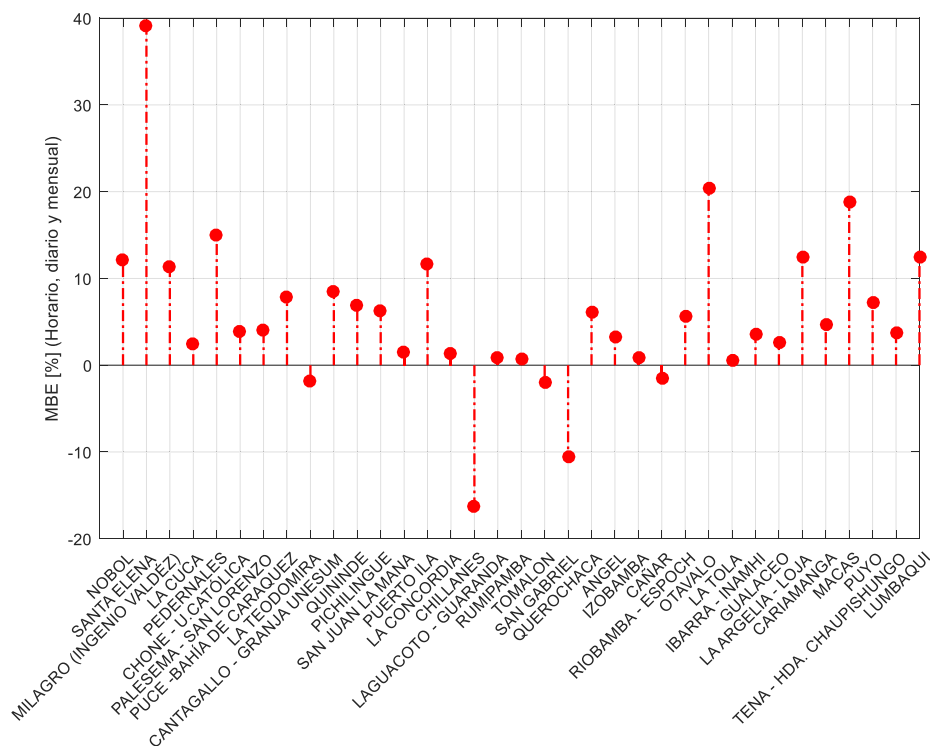


Figura 3. 24. MBE [%] de las estaciones meteorológicas operadas por el INAMHI. (Fuente: Propia)

El estadístico MBE es mostrado en la figura 3.24. El 85,71% de las estaciones mostradas indican la existencia de sobreestimación por parte del modelo matemático utilizado para el cálculo de los datos satelitales de radiación solar y el 14,29% indican subestimación. En la localidad en donde se encuentra la estación de Santa Elena existe el mayor MBE, el cual es de 39,09%. Sin considerar la estación anteriormente mencionada, el MBE varía entre -16,33% y 20,4%. El estadístico MBE del 68,57% de las estaciones meteorológicas operadas por INAMHI se encuentra entre -10% y 10% indicando un buen desempeño del modelo matemático utilizado para el cálculo datos de radiación solar por NREL.

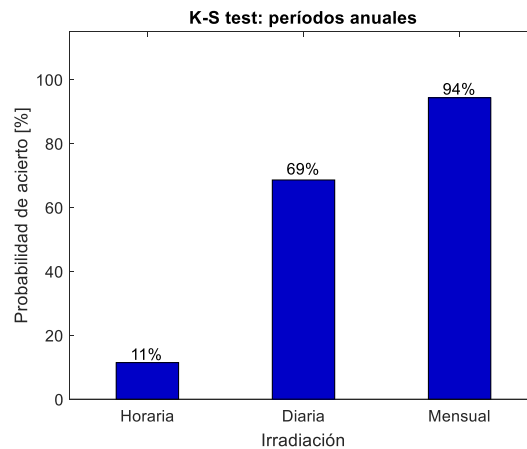


Figura 3. 25. Probabilidad de aprobación del K-S test de las estaciones meteorológicas operadas por el INAMHI.  
(Fuente: Propia)

La prueba K-S test resultó positiva el 94% de veces aplicada a agrupaciones mensuales, el 69% a agrupaciones diarias y el 11% a agrupaciones horarias. Tan solo 3 estaciones meteorológicas operadas por INAMHI, las cuales son Nobol, Otavalo y Pedernales, no aprobaron el K-S test aplicado a agrupaciones mensuales. Se puede notar en el Anexo 4 que la estación de Pedernales difiere en 0,0032 con el límite de confianza para pasar el K-S test (0,05), por lo que estos resultados no se encuentran muy separados al encontrado en el resto de estaciones. Las estaciones de Nobol y Otavalo son casos aislados por lo que se considera que posiblemente existe algún problema con las estaciones meteorológicas.

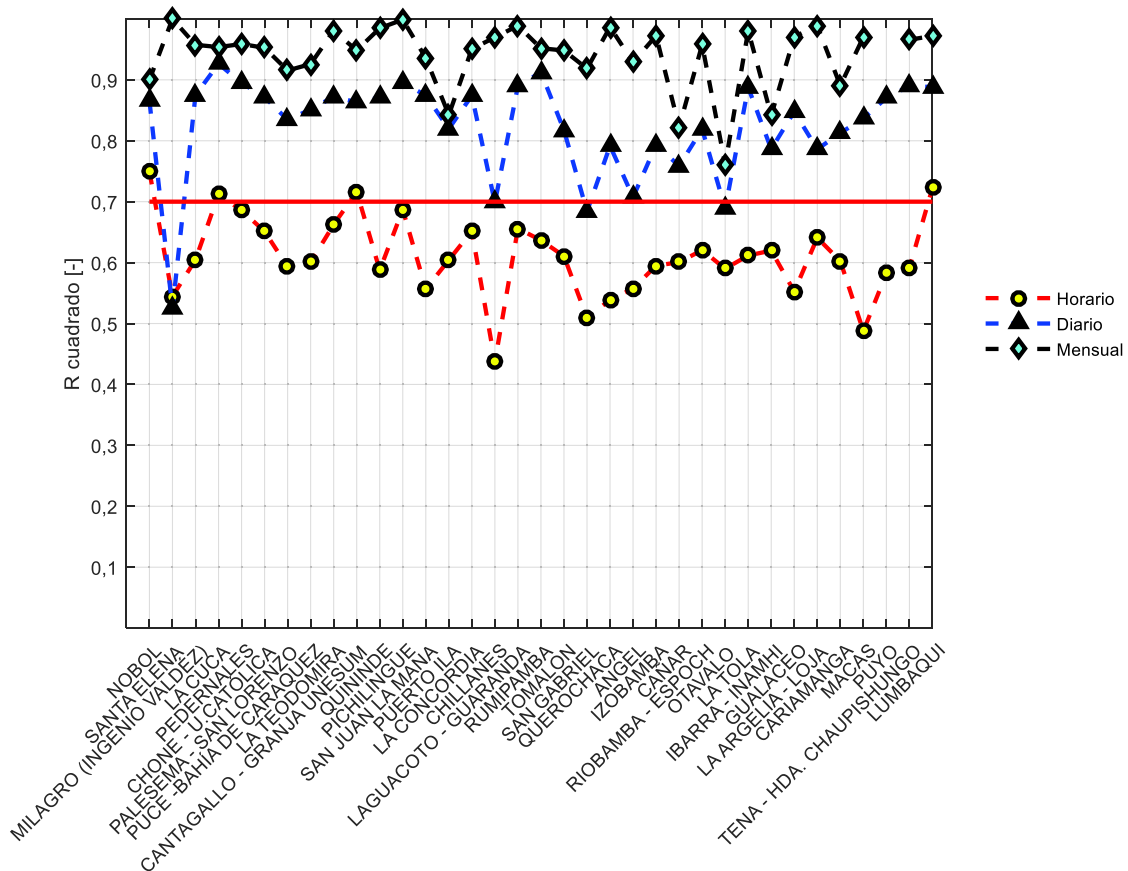


Figura 3. 26. R cuadrado de las estaciones meteorológicas operadas por el INAMHI. (Fuente: Propia)

En la figura 3.26. se muestra que el coeficiente de determinación aplicado a agrupaciones horarias varía entre 0,44 y 0,75, diarias entre 0,68 y 0,93, y mensuales entre 0,76 y 1. Consecuentemente los datos satelitales de radiación solar poseen una mayor fiabilidad al ser agrupados mensualmente, seguidos por las agrupaciones diarias y horarias, respectivamente.

Se obtuvieron los peores resultados en la localidad de la estación meteorológica de Santa Elena ya que su RMSE mensual es de 42,8% y MBE es de 39.09%, a pesar de que el estadístico R cuadrado sea 1 y que K-S test mensual sea positivo ya que los datos históricos de esta estación al ser de apenas un mes, los resultados que arrojan no son fiables. A continuación, se presenta el análisis de la hipótesis de nubosidad en las estaciones meteorológicas operadas por INAMHI.

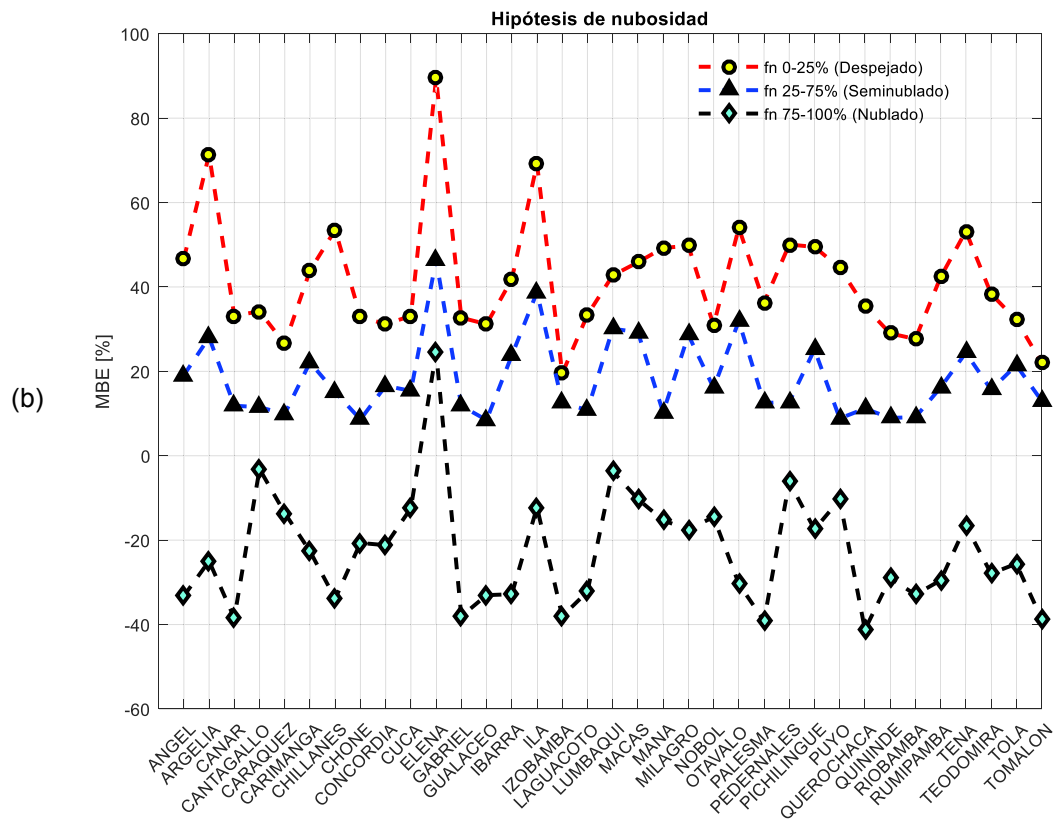
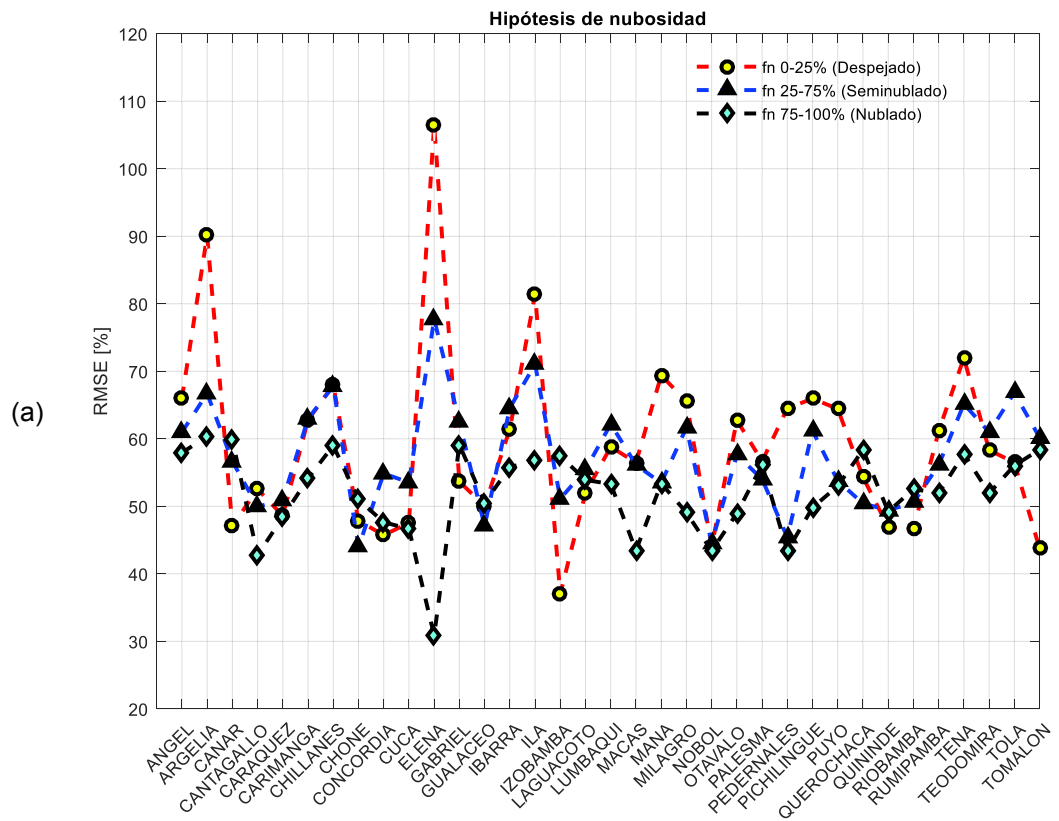


Figura 3. 27. Resumen de resultados según la hipótesis de nubosidad planteada para irradiación horaria de las estaciones meteorológicas operadas por el INAMHI. (a) RMSE [%]. (b) MBE [%]. (Fuente: Propia)



Cuando el factor de nubosidad indica que las mediciones se realizaron con cielo despejado, el 34,29% de las estaciones meteorológicas de INAMHI presentan menores RMSE que cuando el factor de nubosidad indica cielo nublado. El MBE manifiesta que existe sobreestimación cuando el factor de nubosidad indica cielo despejado y subestimación cuando indica cielo nublado. La sobreestimación en cielo despejado tiene una media de aproximadamente 38%, mientras que la subestimación en cielo despejado tiene una media cercana a -25%. Los resultados no son muy marcados como los obtenidos en las estaciones meteorológicas operadas por la Secretaría de Ambiente.

### 3.4. Estaciones meteorológicas operadas por INER

Las estaciones meteorológicas operadas por INER constan de equipos de medición de irradiancia horizontal global e irradiancia horizontal difusa. A partir de la irradiancia GHI y DHI es factible calcular la irradiancia normal directa DNI, aplicando la ecuación 3.1 [34, 50].

$$GHI = DNI * \cos(sza) + DHI \quad (3.1.)$$

Donde:

*GHI: Irradiancia horizontal global*

*DNI: Irradiancia normal directa*

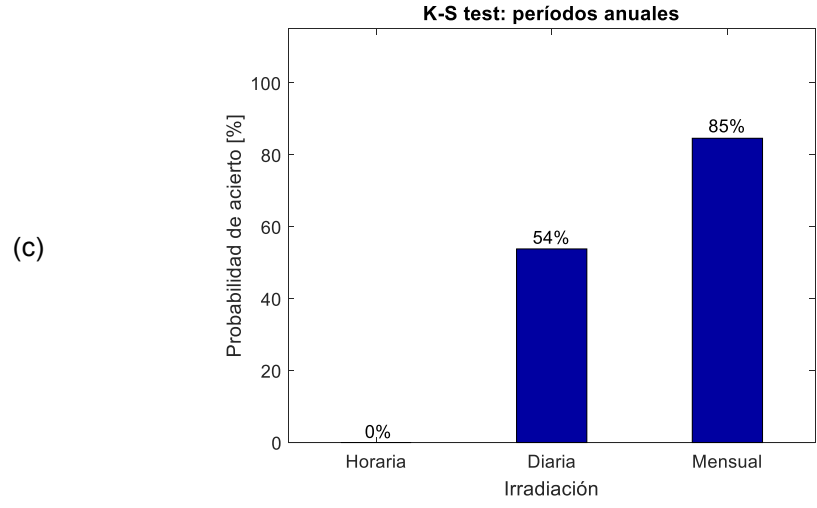
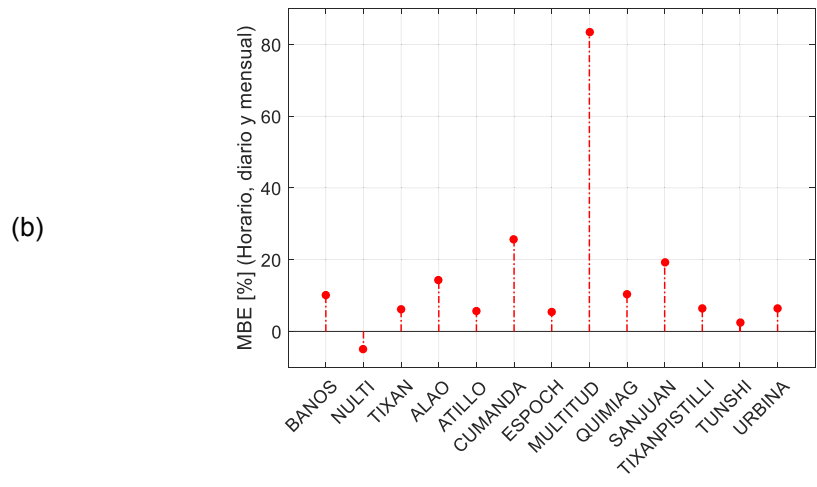
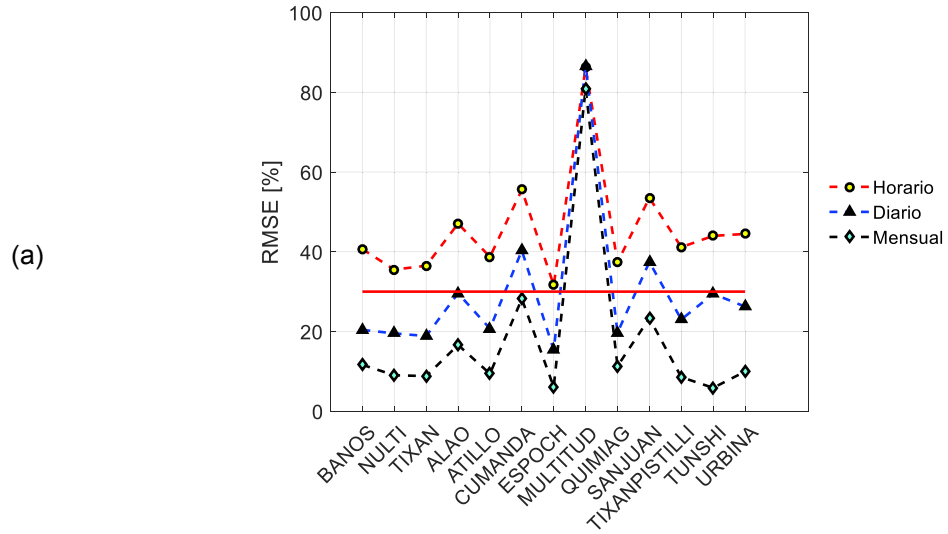
*DHI: Irradiancia horizontal difusa*

*sza: Ángulo cenital (ángulo entre el sol y el cenit solar), varía en el día*

Al utilizar la ecuación 3.1 para calcular la DNI no se está considerando el albedo del lugar. A continuación, se analizan los resultados obtenidos con los datos de irradiación horizontal global de las estaciones meteorológicas manejadas por INER.

### 3.4.1. Irradiación horizontal global (GHI)

Tras comparar los datos de irradiación horizontal global en las estaciones meteorológicas operadas por INER se obtuvieron los siguientes resultados:



(d)

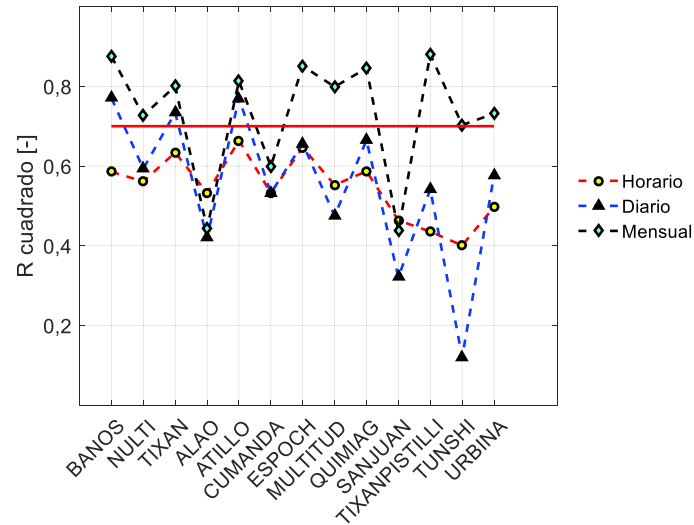
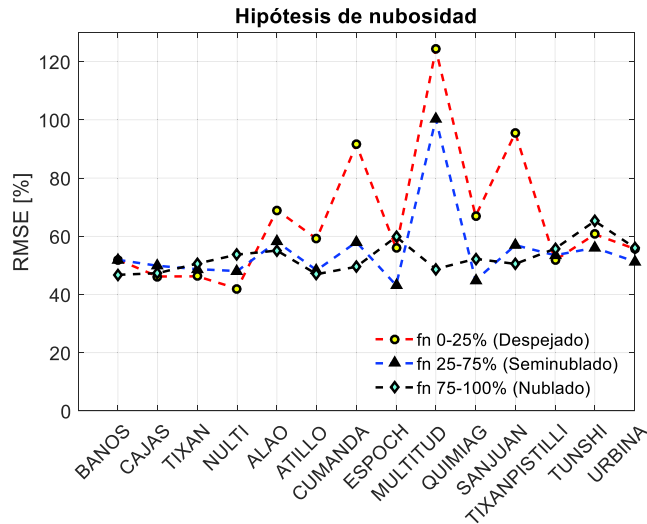
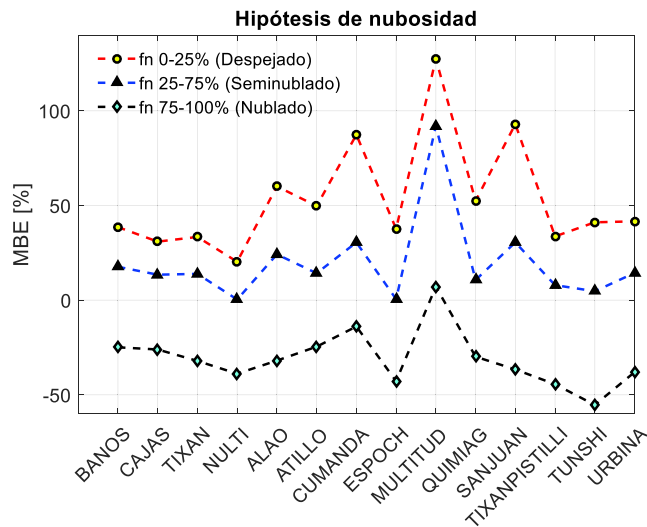


Figura 3. 28. Resumen de resultados de las estaciones meteorológicas operadas por el INER para irradiación horizontal global (GHI). (a) RMSE [%], (b) MBE [%], (c) Probabilidad de acierto según el K-S test y (d) r cuadrado. (Fuente: Propia)

La figura 3.28. resume los resultados estadísticos de comparación de los datos satelitales y mediciones terrestres de irradiación horizontal global en las estaciones meteorológicas operadas por INER. La estación meteorológica Multitud presenta los peores resultados del conjunto de estaciones analizadas en esta subsección ya que posee un RMSE mensual de 81%, MBE de 83,5%, coeficiente de determinación mensual de 0,7987 y resultado negativo de la prueba K-S. Los indicadores estadísticos aplicados en los datos de la estación meteorológica de Multitud difieren por completo con el resto de las estaciones operadas por el INER, sugiriendo que las mediciones en esta estación no son fiables para este estudio. Sin considerar la estación anteriormente citada, horariamente el RMSE varía entre 31,6% y 55,6%, diariamente entre 15,4% y 40,3%, y mensualmente entre 5,9% y 28,2%. Analizando el parámetro MBE, el cual, sin considerar la estación Multitud, varía entre -4,9% y 25,6%, se muestra que en la estación de Nulti existe subestimación del modelo matemático para obtener los datos satelitales de radiación solar, y en el resto de estaciones existe sobreestimación. La probabilidad de aprobar el K-S test es 85% con los datos mensuales, 54% con los datos diarios y 0% con los datos horarios. El coeficiente de determinación varía mensualmente entre 0,44 y 0,88, diariamente entre 0,12 y 0,77, y horariamente entre 0,40 y 0,66. Consecuentemente, en las estaciones meteorológicas manejadas por INER se obtuvieron muy buenos resultados mensuales, buenos resultados diarios y resultados horarios de poca fiabilidad. A continuación, en la figura 3.29. se muestra el comportamiento de los parámetros estadísticos RMSE y MBE aplicando la hipótesis de nubosidad.



(a)



(b)

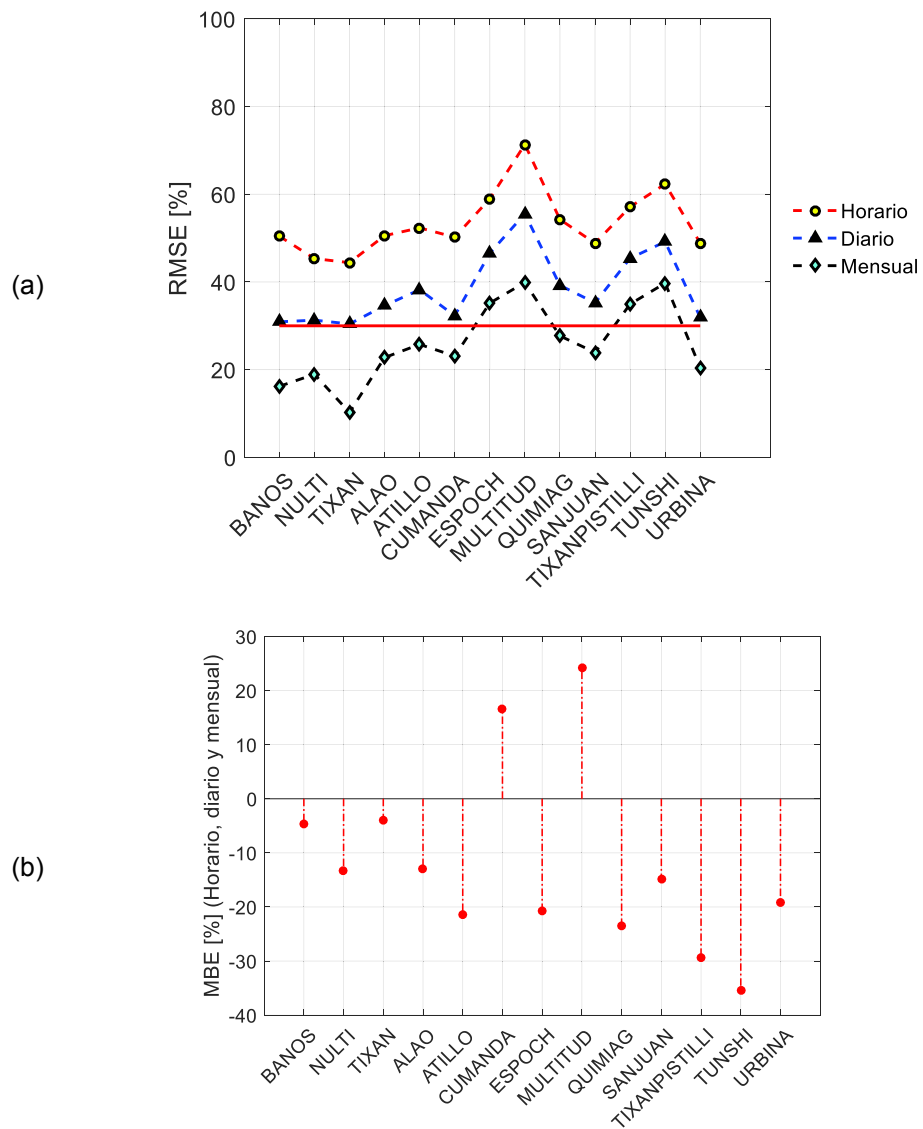
Figura 3. 29. Resumen de resultados según la hipótesis de nubosidad planteada de las estaciones meteorológicas operadas el INER para irradiación horizontal global (GHI) horaria. (a) RMSE [%]. (b) MBE [%].  
(Fuente: Propia)

Cuando el factor de nubosidad indica que las mediciones se realizaron con cielo despejado, el 50% de las estaciones meteorológicas de INER al medir GHI presentan menores RMSE que cuando el factor de nubosidad indica cielo nublado, sin embargo, la tendencia no es suficientemente marcada. El MBE manifiesta que existe sobreestimación cuando el factor de nubosidad indica cielo despejado y subestimación cuando indica cielo nublado. La sobreestimación en cielo despejado tiene una media de aproximadamente 41%, mientras que la subestimación en cielo despejado tiene una media cercana a -32%. De igual manera que lo discutido en las estaciones meteorológicas manejadas por INAMHI, estos resultados no son muy marcados como los obtenidos en las estaciones meteorológicas operadas por

la Secretaría de Ambiente. Seguidamente se analizan los resultados obtenidos con los datos de irradiación horizontal difusa de las estaciones meteorológicas manejadas por INER.

### 3.4.2. Irradiación difusa horizontal (DHI)

Tras comparar los datos de irradiación horizontal difusa en las estaciones meteorológicas operadas por INER se obtuvieron los resultados expuestos en la figura 3.30.



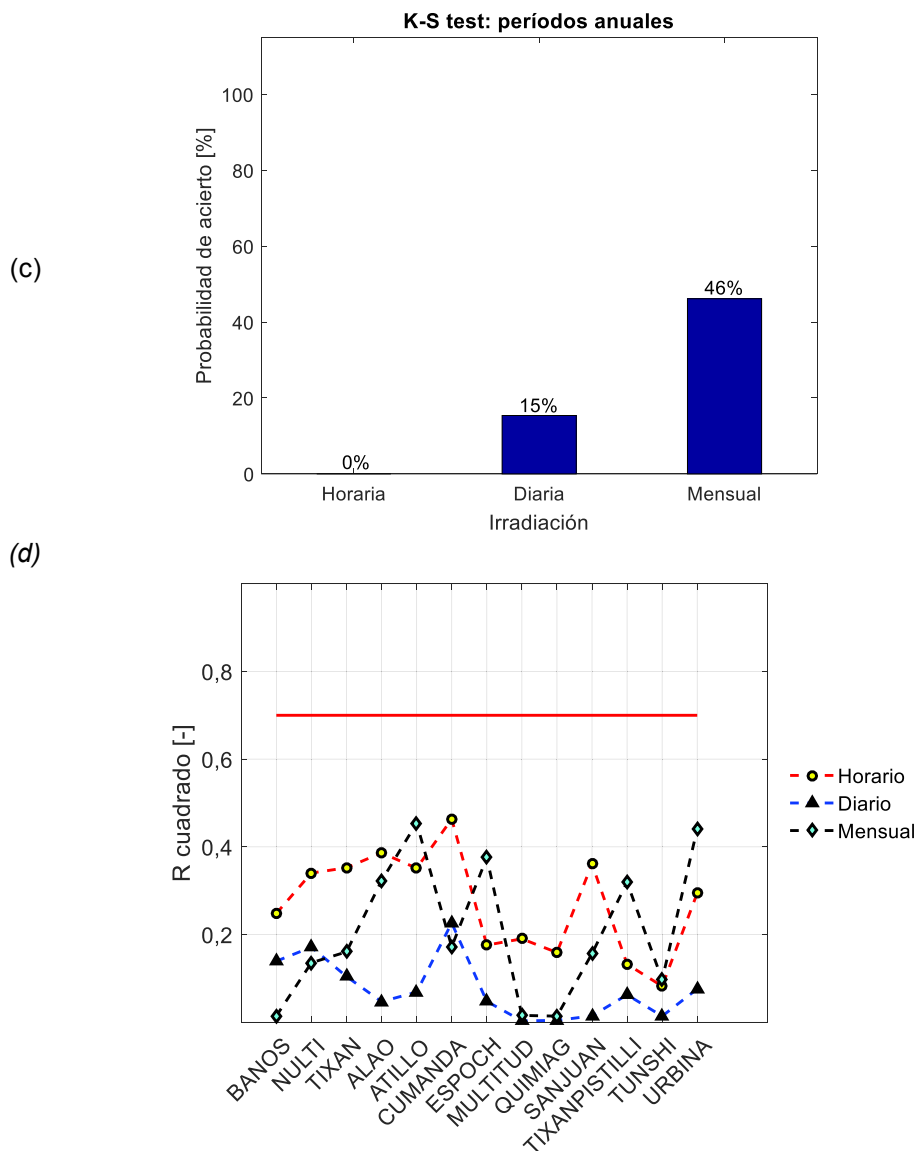
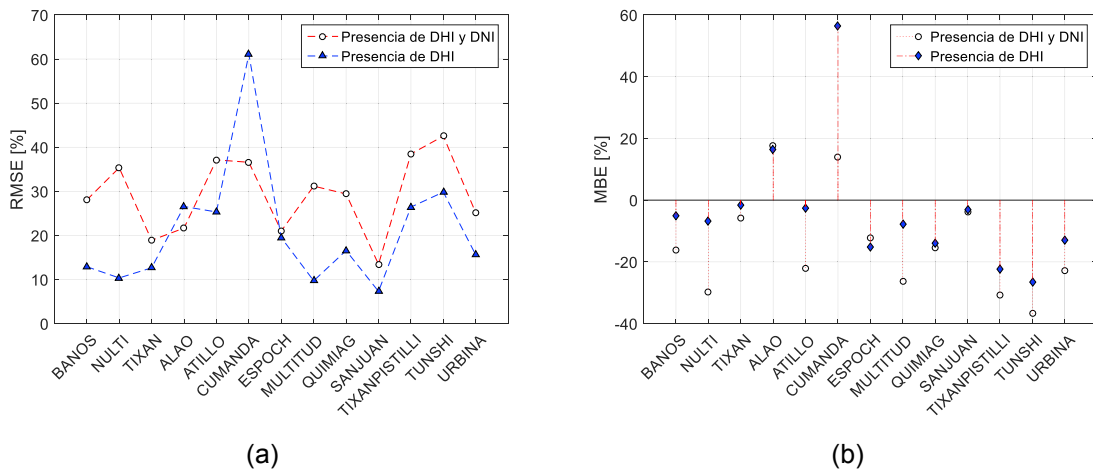


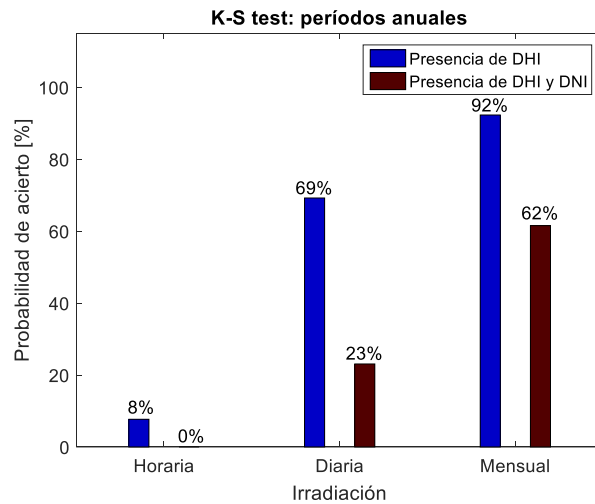
Figura 3. 30. Resumen de resultados de las estaciones meteorológicas operadas por el INER para irradiación horizontal difusa (DHI). (a) RMSE [%], (b) MBE [%], (c) Probabilidad de acierto según el K-S test y (d) r cuadrado.  
(Fuente: Propia)

El estadístico RMSE varía horariamente entre 44,4% y 71,4%, diariamente entre 30,4% y 55,6%, y mensualmente entre 10,2% y 39,9%. RMSE indica que mensualmente el 71,5% de las estaciones meteorológicas operadas por INER se encuentran dentro del intervalo de aceptabilidad, el cual comprende valores menores a 30%. El indicador MBE oscila entre -35,4% y 24,3%. Según MBE existe sobreestimación en el 14,29% de las estaciones analizadas y en el resto se da subestimación del modelo matemático, por lo que hay tendencia a la subestimación. La probabilidad de aprobar el K-S test es 46% con los datos mensuales, 15% con los datos diarios y 0% con los datos horarios. El coeficiente de determinación calculado con las agregaciones mensuales, diarias y horarias es menor a

0,7 sugiriendo que no existe una buena correlación entre los datos satelitales y las mediciones terrestres de irradiación horizontal difusa. La figura 3.30. indica que se tienen peores resultados al utilizar los datos de irradiación horizontal difusa que al emplear la horizontal global.

Estos resultados se atribuyen a un mal trabajo de seguimiento del equipo de medición de irradiancia horizontal difusa. El equipo consta de un piranómetro que posee una banda de sombra la cual debe obstruir la irradiancia solar directa permitiendo que el piranómetro registre solo la componente horizontal difusa de la irradiancia [14]. La banda de sombra debe seguir la trayectoria solar diaria, la cual es diferente en distintas épocas del año debido a la declinación solar producto del movimiento de la Tierra alrededor del sol, por lo que se debe cambiar su posición de forma manual constantemente [53]. Para comprobar lo señalado se propuso analizar escenarios de medición de irradiación solar horizontal difusa con el cielo despejado, presencia de DHI y DNI, y cielo completamente nublado, solo presencia de DHI. Para categorizarlos se tomó como base los datos satelitales de irradiación normal directa. Al localizar una DNI menor a  $50 \text{ W h/m}^2$ , la medición de DHI evaluada en el mismo espacio temporal se la categoriza como tomada en un escenario con cielo completamente nublado y viceversa. En la figura 3.31. se indican los resultados obtenidos.





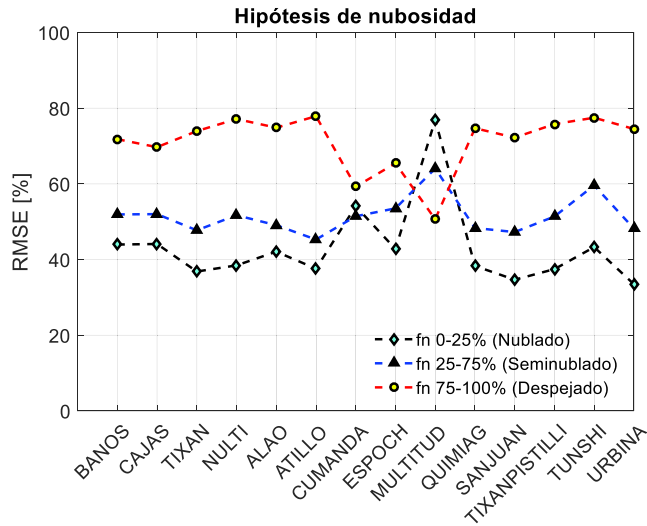
(c)

Figura 3. 31. Comprobación de la mala ubicación del anillo de sombra de los piranómetros instalados en las estaciones meteorológicas manejadas por INER para la medición de irradiación horizontal difusa horaria. (a) RMSE mensual [%], (b) MBE [%] y (c) K-S test.

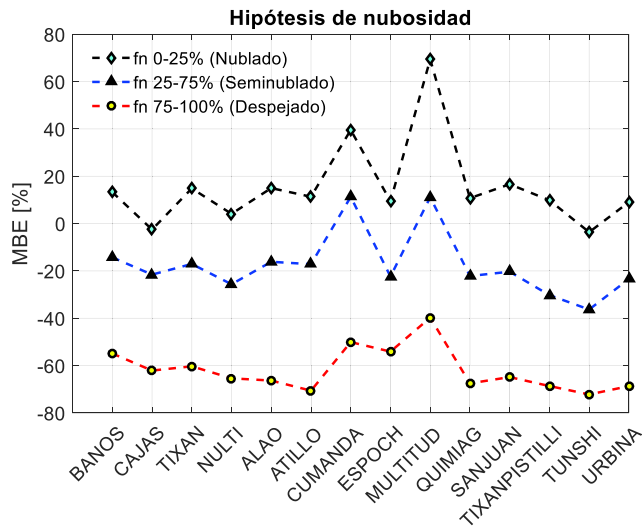
(Fuente: Propia)

Los indicadores estadísticos RMSE, MBE y K-S test indican claramente el contraste de los escenarios nublados, solo presencia de DHI, y escenario despejado, presencia de DHI y DNI. El estadístico RMSE en escenarios nublados es menor que en escenarios despejados en el 84,6% de las estaciones meteorológicas analizadas. Además, el RMSE en escenarios nublados es menor a 30%, en el 92,3% de las estaciones operadas por el INER. El indicador estadístico MBE de igual manera tuvo mejores resultados en escenarios nublados que en despejados. Finalmente, tras aplicar el K-S test se obtuvo que mensualmente el 92% de las estaciones meteorológicas operadas por el INER pasan la prueba con el escenario nublado y el 62% con escenario despejado. Consecuentemente se lograron mejores resultados con el cielo nublado, en donde el anillo de sombra no juega un rol muy importante. Consecuentemente, la razón fundamental por la cual los datos satelitales y mediciones terrestres de irradiación horizontal difusa no se ajustan satisfactoriamente, es el mal posicionamiento del anillo de sombra de los equipos de medición de irradiación horizontal difusa instalados en las estaciones meteorológicas manejadas por el INER. Se recomienda tener en consideración este estudio por parte del INER para tomar las medidas correctoras oportunas y planificar de mejor manera el posicionamiento del anillo de sombra de sus equipos. A continuación, se presenta la hipótesis de nubosidad aplicada a los datos de irradiación horizontal difusa.





(a)



(b)

Figura 3. 32. Resumen de resultados según la hipótesis de nubosidad planteada de las estaciones meteorológicas operadas por el INER para irradiación horizontal difusa (DHI). (a) RMSE [%]. (b) MBE [%].

(Fuente: Propia)

Al presentarse cielo nublado, el 85,7% de las estaciones meteorológicas de INER al medir DHI presentan menores RMSE que cuando el factor de nubosidad indica cielo despejado. El MBE manifiesta que existe sobreestimación cuando el factor de nubosidad indica cielo nublado y subestimación cuando indica cielo despejado. La sobreestimación en cielo nublado tiene una media de aproximadamente 15%, mientras que la subestimación en cielo despejado tiene una media cercana a -62%. Esta hipótesis de nubosidad muestra de igual manera la presencia de defectos en las mediciones por el mal posicionamiento del anillo de sombra de los equipos de medición. Debido a que las mediciones terrestres de irradiación solar horizontal difusa no son fiables, no se presenta el análisis con la irradiación directa normal calculada a partir de la ecuación 3.1.

### 3.5. Resumen de resultados

Debido a los problemas encontrados con las mediciones terrestres de irradiancia horizontal difusa e irradiación normal directa calculada en las estaciones meteorológicas del INER no se considerarán en el siguiente análisis. Tras analizar el indicador estadístico MBE se observa que el 77% de las estaciones meteorológicas indican sobreestimación del modelo matemático y el 23% indican subestimación, como lo indica la figura 3.35. La prueba K-S test indica que solo el 2% de las estaciones meteorológicas presentan coincidencia horaria entre los datos satelitales y terrestres de irradiación solar, el 46% de las estaciones meteorológicas presentan coincidencia diaria, y el 88% de las estaciones meteorológicas presentan coincidencia mensual. Existe mejor relación entre los datos mensuales satelitales y terrestres que al agregarlos diaria y horariamente debido a las razones que se exponen a continuación:

- Las mediciones satelitales se realizan cada media hora por lo que no tiene en cuenta los fenómenos que se pudieron dar entre cada medición. Horariamente se consideran 3 mediciones en cada hora, diariamente existen 72 mediciones en cada día, incluyendo las horas nocturnas, y mensualmente hay aproximadamente 2160 mediciones en cada mes. Mientras mayor sea la cantidad de datos tomados, las mediciones son de mayor calidad [41].
- Al agregar los datos diaria y mensualmente, la cantidad de datos disponibles disminuyen. Es decir, horariamente existen 8760 datos, diariamente 365 datos y mensualmente 12 datos en un año. Al disminuir la cantidad de datos la correlación entre dos conjuntos de datos se da más fácilmente, sin embargo, se pierde su confiabilidad [54].

La hipótesis de nubosidad indica que generalmente hay un mejor comportamiento del modelo satelital de obtención de datos de radiación solar global horizontal en escenarios con el cielo despejado, en el cual se emplea el modelo matemático REST2, que en escenarios con el cielo nublado, en el cual se utiliza en modelo FARMS. El modelo matemático PSM utilizado por el NREL sobreestima la radiación solar global horizontal terrestre al evaluarla satelitalmente en condiciones de cielo despejado y se subestima en condiciones de cielo nublado.

Las figuras 3.33., y 3.34. muestran que no existe una relación directa entre la altura sobre el nivel del mar a la que se encuentran las localidades de las estaciones meteorológicas y los indicadores estadísticos MBE y RMSE. Sin embargo, hay una relación entre la nubosidad de la zona y la irradiación solar. Las figuras indican que en la zona de transición entre las regiones costa y sierra, en la cual la presencia de nubosidad es frecuente como en San Juan de la Mana en la provincia de Cotopaxi, la irradiación solar diaria media es baja en comparación a otras zonas en la costa y sierra ecuatoriana, como por ejemplo las ciudades de Guayaquil y Pedernales en la costa, y en la sierra las ciudades de Quito y Loja. En la estación meteorológica de San Juan de la Mana la irradiación media diaria es de 3349 Wh/m<sup>2</sup>/día, mientras que en la estación Belisario de la ciudad de Quito es de 4693 Wh/m<sup>2</sup>/día y en la estación Pedernales es de 4223 Wh/m<sup>2</sup>/día.

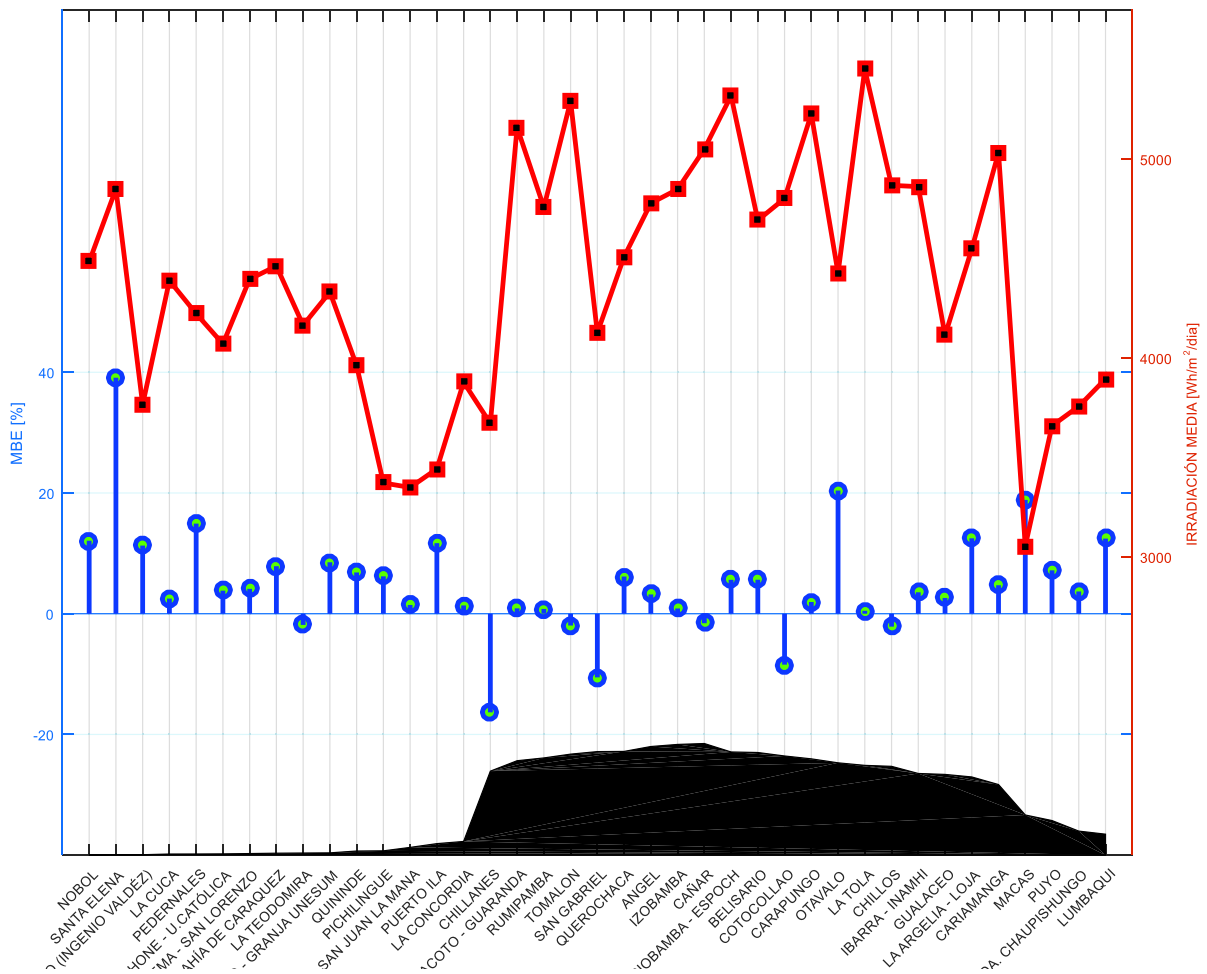


Figura 3. 33. Comportamiento del indicador estadístico MBE [%] e irradiación media diaria conforme varía la altura sobre el nivel del mar de la localidad de la estación meteorológica. La izquierda de la figura pertenece a la región costa, pasando a la región sierra y finalmente la región amazónica.

(Fuente: Propia)

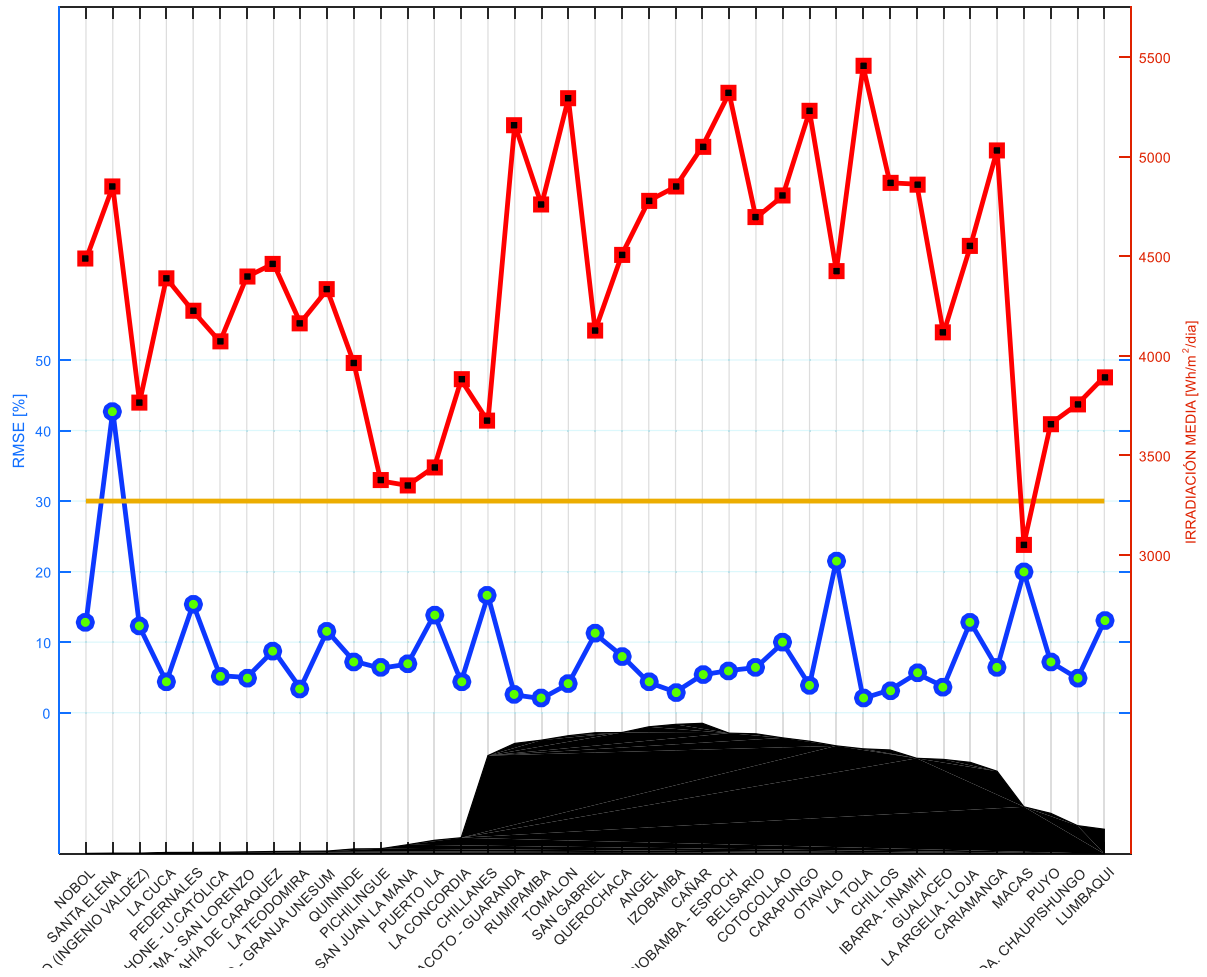


Figura 3. 34. Comportamiento del indicador estadístico RMSE mensual [%] e irradiación media diaria conforme varía la altura sobre el nivel del mar de la localidad de la estación meteorológica. La izquierda de la figura pertenece a la región costa, pasando a la región sierra y finalmente la región amazónica.  
(Fuente: Propia)

## 4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 4.1. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló una metodología para validar los datos satelitales de radiación solar del *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) utilizando mediciones terrestres para el Ecuador. Dentro de la metodología mencionada se describieron y compararon estadísticamente los datos satelitales y terrestres de radiación solar mediante el uso de series de tiempo, histogramas, diagramas caja-bigote, indicadores estadísticos de dispersión y de similitud de distribución de las estaciones meteorológicas seleccionadas dentro de este estudio.

Se recopilaron datos de irradiación solar global horizontal de las estaciones meteorológicas manejadas por la Secretaría de Ambiente del Municipio de Quito y el INAMHI, y de las operadas por INER se obtuvieron datos de irradiación solar global horizontal e irradiación solar horizontal difusa. Se encontraron problemas con las mediciones terrestres de irradiación horizontal difusa de las estaciones meteorológicas del INER debido al mal posicionamiento del anillo de sombra del equipo. Consecuentemente, se consideraron datos terrestres de irradiación solar aceptables para esta investigación a la componente global horizontal medida en todas las estaciones meteorológicas de estudio.

En este trabajo se demostró que el modelo matemático *Physical Solar Model (PSM)*, utilizado para evaluar la radiación solar por NREL, a menudo sobreestima los valores de irradiación solar global horizontal terrestre en las localidades de las estaciones meteorológicas de estudio. El indicador estadístico MBE (error bias medio) aplicado muestra que el 77% de las estaciones meteorológicas indican sobreestimación del modelo matemático y el 23% indican subestimación. En las estaciones donde se indica sobreestimación, en promedio el MBE es de 8,96% y se encuentran en un rango de 0,48% y 45,98%. En las estaciones donde se indica subestimación, en promedio el MBE es de -5,64% y se encuentran en un rango de -16,33% y -1,57%.

También se determinó que existe una mejor relación entre los datos mensuales satelitales y terrestres de irradiación global horizontal que entre los datos diarios y horarios. La prueba K-S test indica que solo el 2% de las estaciones meteorológicas presentan coincidencia horaria entre los datos satelitales y terrestres de irradiación solar global horizontal, el 46%

de las estaciones meteorológicas presentan coincidencia diaria, y el 88% de las estaciones meteorológicas presentan coincidencia mensual. Este comportamiento fundamentalmente se basa en la cantidad de mediciones involucradas en cada agregación de datos. Horariamente se consideran 3 mediciones en cada hora, diariamente existen 72 mediciones en cada día, incluyendo las horas nocturnas, y mensualmente hay aproximadamente 2160 mediciones en cada mes. Mientras mayor sea la cantidad de datos tomados, las mediciones son de mayor calidad. Sin embargo, hay que tener en consideración que estadísticamente, al agregar los datos diaria y mensualmente, la cantidad de datos disponibles disminuyen ayudando a que la correlación entre dos conjuntos de datos se da más fácilmente perdiendo su confiabilidad.

La hipótesis de nubosidad indica que en el 50% de las estaciones meteorológicas analizadas se da un mejor comportamiento del modelo satelital de obtención de datos de irradiación solar global horizontal en escenarios con cielo despejado que en escenarios con cielo nublado. Además, esta hipótesis muestra la existencia de sobreestimación del modelo matemático PSM sobre las mediciones terrestres, en promedio del 40,07%, al evaluar satelitalmente esta componente de irradiación en escenarios de cielo despejado y se da subestimación, en promedio del -25,63%, en escenarios de cielo nublado en todas las estaciones de estudio. Finalmente, se determinó que no existe una relación entre la altura sobre el nivel del mar a la que se encuentran las localidades de las estaciones meteorológicas y los indicadores estadísticos MBE (error bias medio) o RMSE (error medio cuadrático).

Se validaron estadísticamente los datos satelitales mensuales de irradiación solar horizontal global, por lo que el uso de los mismos es confiable para cualquier tipo de estudio en las localidades de las estaciones meteorológicas. Además, este estudio sugiere que los datos satelitales mensuales de irradiación solar global horizontal se los puede utilizar no solo en las localidades de las estaciones meteorológicas, sino también en el resto del territorio ecuatoriano con alto grado de fiabilidad. Los resultados obtenidos otorgan una gran base de datos de irradiación global horizontal del NREL en todas las regiones del Ecuador, incluyendo la región amazónica, siendo vitales en estudios para proyectos que involucran tecnologías de captación térmica y fotovoltaica, agricultura, densidad de vegetación, construcciones autosustentables y eficiencia energética, etc.

## 4.2. Recomendaciones

Se recomienda utilizar con cautela los datos satelitales horarios y diarios de irradiación solar global horizontal ya que los resultados de este estudio indican que solo el 2% de las estaciones meteorológicas presentan coincidencia horaria entre los datos satelitales y terrestres de irradiación solar, y el 46% de las estaciones meteorológicas presentan coincidencia diaria.

El uso del paquete computacional Matlab es altamente recomendable para el manejo de datos y el cálculo de indicadores estadísticos de dispersión, como el RMSE, MBE y el coeficiente de determinación  $R^2$ , e indicadores estadístico de similitud de distribución, como la prueba K-S, ya que posee un entorno de trabajo amigable e incentiva la investigación de las fórmulas para el cálculo de los indicadores estadísticos al no poseer funciones propias para evaluarlos.

Se recomienda a la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, al INAMHI e INER que planifiquen correctamente el mantenimiento y calibración de sus equipos. Además, es vital el repotenciar las estaciones meteorológicas instalando pirheliómetros, para medición de DNI, y piranómetros, para medición de DHI, con la finalidad de incentivar el aumento de investigaciones en este campo.

Es recomendable el diseño de una página web la cual albergue las mediciones terrestres históricas de todas las estaciones meteorológicas operadas por la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, el INAMHI e INER, con la finalidad de facilitar el acceso a los datos meteorológicos en el Ecuador.

### **4.3. Trabajos futuros**

Se pueden desarrollar trabajos futuros con el objetivo de validar los datos de irradiancia horizontal difusa e irradiancia directa normal calculados por NREL para el Ecuador. Estas variables físicas no pudieron ser evaluadas en esta investigación debido a la falta de datos válidos de esta naturaleza.

El mapa solar del Ecuador debe ser actualizado con los datos de la base de datos de NREL estudiada para que su fiabilidad aumente ya que los datos de irradiación solar mensual han sido satisfactoriamente validados. Este mapa solar debe ser interactivo y recopilar los datos históricos satelitales de todo el territorio ecuatoriano.



## REFERENCIAS

- [1] BP, "BP Statistical Review of World Energy 2017."
- [2] Energy Information Administration, "International Energy Outlook 2017," 2017.
- [3] K. Aleklett and C. J. Campbell, "The Peak and Decline of World Oil and Gas Production," *Miner. Energy - Raw Mater. Rep.*, vol. 18, no. 1, pp. 5–20, Jan. 2003.
- [4] REN21, "Renewables 2016, global status report," 2016.
- [5] F. Ordóñez and J. López, "Tecnologías Energéticas," pp. 4–5, 2017.
- [6] H. M. S. Al-Maamary, H. A. Kazem, and M. T. Chaichan, "The impact of oil price fluctuations on common renewable energies in GCC countries," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, pp. 989–1007, 2017.
- [7] F. Cucchiella, I. D'Adamo, and P. Rosa, "Industrial Photovoltaic Systems: An Economic Analysis in Non-Subsidized Electricity Markets," *Energies*, vol. 8, no. 11, pp. 12865–12880, Nov. 2015.
- [8] J. Cevallos and J. Ramos, "Spatial assessment of the potential of renewable energy: The case of Ecuador," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 1154–1165, Jan. 2018.
- [9] M. Sengupta *et al.*, "Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications," 2015.
- [10] S. Mousavi Maleki, H. Hizam, and C. Gomes, "Estimation of Hourly, Daily and Monthly Global Solar Radiation on Inclined Surfaces: Models Re-Visited," *Energies*, vol. 10, no. 1, p. 134, Jan. 2017.
- [11] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*. Wiley, 2013.
- [12] D. Y. Goswami, *Principles of solar engineering*. 2015.
- [13] J. G. Webster and H. Eren, *Measurement, instrumentation, and sensors handbook. Spatial, mechanical, thermal, and radiation measurement*. .
- [14] F. J. Barbero, *Radiación solar y aspectos climatológicos de Almería : 1990-1996*. Universidad de Almería, Servicio de Publicaciones, 1998.
- [15] SENSOVANT, "Instrumentos solares." [Online]. Available: <http://sensovant.com/productos/meteorologia/radiacion-solar/sensores-medidores-instrumentos-radiacion-solar.html>. [Accessed: 12-Oct-2017].
- [16] P. W. Stackhouse, W. S. Chandler, T. Zhang, D. Westberg, A. J. Barnett, and J. M. Hoell, "Surface meteorology and Solar Energy (SSE) Release 6.0 Methodology Version 3.2.0," 2016.

- [17] "Surface meteorology and Solar Energy." [Online]. Available: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov+s00+s01+s02+s03+s04+s05+s06+s07+s08+s09+s10+s12#s12>. [Accessed: 16-Oct-2017].
- [18] "Global Solar Atlas." [Online]. Available: <http://globalsolaratlas.info/?c=-23.885838,-40.78125,2&s=-1.406109,112.148438>. [Accessed: 16-Oct-2017].
- [19] NREL, "National Renewable Energy Laboratory (NREL)." [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/>. [Accessed: 15-Jul-2017].
- [20] J. R. Raush, T. L. Chambers, B. Russo, and K. Crump, "Assessment of local solar resource measurement and predictions in south Louisiana," *Energy. Sustain. Soc.*, vol. 6, no. 1, p. 18, Dec. 2016.
- [21] E. Zell *et al.*, "Assessment of solar radiation resources in Saudi Arabia," *Sol. Energy*, vol. 119, pp. 422–438, Sep. 2015.
- [22] L. Cornejo, L. Martín-Pomares, D. Alarcon, J. Blanco, and J. Polo, "A through analysis of solar irradiation measurements in the region of Arica Parinacota, Chile," *Renew. Energy*, vol. 112, pp. 197–208, 2017.
- [23] D. Chesters, O. Sharma, F. Hasler, and T. Nielsen, "GOES-8/9 data ingest and public file service at NASA-GSFC."
- [24] M. Sengupta *et al.*, "A Physics-Based GOES Satellite Product for Use in NREL's National Solar Radiation Database Preprint A Physics-Based GOES Satellite Product for Use in NREL's National Solar Radiation Database," vol. 17613, 2014.
- [25] M. Sengupta, "The National Solar Radiation Database ( NSRDB ) Sensing , Measurement , and Forecasting," 2017.
- [26] A. K. Heidinger *et al.*, "The Pathfinder Atmospheres–Extended AVHRR Climate Dataset," *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 95, no. 6, pp. 909–922, Jun. 2014.
- [27] "Climate Data Record (CDR) Program Climate Algorithm Theoretical Basis Document (C-ATBD) Fundamental Climate Data Record (CDR) of Reflectance from AVHRR Bands 1, 2 and 3a (CDR Name: AVHRR\_CH1-2-3a\_Reflectance)," 2013.
- [28] A. Habte, Y. Xie, and P. Edwards, "Release of the New National Solar Radiation Database Webinar Outline □ Motivation and History □ Development of the New Gridded NSRDB □ New NSRDB Website and How to Access Data □ Data Availability □ Future Plans," 2015.
- [29] A. Habte, M. Sengupta, and A. Lopez, "Evaluation of the National Solar Radiation Database (NSRDB): 1998–2015," 2015.
- [30] INAMHI, "Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología." [Online]. Available: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>. [Accessed: 16-Jul-2017].

- [31] SEMPLADES, "Proyectos de Inversión Pública en Imbabura."
- [32] SEMPLADES, "Plan Nacional para el Buen Vivir," p. 114,125,228, 2013.
- [33] CONELEC, "Atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica," 2008.
- [34] D. R. Myers, "Solar Radiation Modeling and Measurements for Renewable Energy Applications: Data and Model Quality," 2003.
- [35] C. A. Nunes, V. O. Alvarenga, A. de Souza Sant'Ana, J. S. Santos, and D. Granato, "The use of statistical software in food science and technology: Advantages, limitations and misuses," *Food Res. Int.*, vol. 75, pp. 270–280, Sep. 2015.
- [36] A. Nottrott and J. Kleissl, "Validation of the NSRDB–SUNY global horizontal irradiance in California," *Sol. Energy*, vol. 84, no. 10, pp. 1816–1827, Oct. 2010.
- [37] D. R. Myers, S. Wilcox, W. Marion, R. George, and M. Anderberg, "Broadband Model Performance for an Updated National Solar Radiation Database in the United States of America: Preprint," 2005.
- [38] C. A. Gueymard, "A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 1024–1034, Nov. 2014.
- [39] F. Vignola, P. Harlan, R. Perez, and M. Kmiecik, "Analysis of satellite derived beam and global solar radiation data," *Sol. Energy*, vol. 81, no. 6, pp. 768–772, Jun. 2007.
- [40] R. Djebbar, R. Morris, D. Thevenard, R. Perez, and J. Schlemmer, "Assessment of SUNY Version 3 Global Horizontal and Direct Normal Solar Irradiance in Canada," *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 1274–1283, 2012.
- [41] OMM, "Guia de instrumentos y métodos de observación meteorológicos," *Organ. Meteorológica Mund.*, vol. 8, no. 6, p. 528, 1996.
- [42] Kipp & Zonen, "Instruction manual CM3 pyranometer," *System*, no. 3381, 2004.
- [43] Kipp & Zonen, "Manual de Usuario serie CMP," 2010.
- [44] Hukseflux, "USER MANUAL SR11 Hukseflux Thermal Sensors."
- [45] R. Veerasamy, H. Rajak, A. Jain, S. Sivadasan, C. P. Varghese, and R. K. Agrawal, "Ravichandran Veerasamy, et al : Validation of QSAR Models-Strategies and Importance Validation of QSAR Models -Strategies and Importance."
- [46] A. K. Sharma, *Text book of correlation and regression*. Discovery Publishing House, 2005.
- [47] B. Beckers, *El diagrama solar*. 2004, p. 16.
- [48] D. R. Myers, *Solar Radiation: Practical Modeling for Renewable Energy Applications*, vol. 58, no. 1513. 2013.

- [49] S. Seo and P. D. Gary M. Marsh, "A review and comparison of methods for detecting outliers in univariate data sets," *Dep. Biostat. Grad. Sch. Public Heal.*, pp. 1–53, 2006.
- [50] INAMHI, "Estudios e investigaciones meteorológicas boletín meteorológico mensual mes: Mayo de 2008 N°: 397," 2008.
- [51] "Global Solar Atlas." [Online]. Available: <http://globalsolaratlas.info/?c=12.554564,61.171875,2&s=-23.885838,27.773438>. [Accessed: 28-Dec-2017].
- [52] F. Vignola, J. Michalsky, and T. L. Stoffel, *Solar and infrared radiation measurements*. CRC Press, 2012.
- [53] Barriga Miguel, Vicaíno Juan, and Recalde Celso, "Implementación de una red de Estaciones Meteorológicas utilizando transmisión GPRS en la Región Centro Andina Ecuatorial," *X Congr. Cienc. y Tecnología ESPE*, pp. 2009–214, 2015.
- [54] S. M. Stigler, *The history of statistics: the measurement of uncertainty before 1900*. Belknap Press of Harvard University Press, 1986.
- [55] Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, "Datos REMMAQ." [Online]. Available: <http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/indice-de-calidad-del-aire-2>. [Accessed: 12-Jan-2018].
- [56] INER, "Información Meteorológica del cantón Cuenca." [Online]. Available: <http://redenti.ups.edu.ec:8086/iner/>. [Accessed: 20-Jan-2018].
- [57] "Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética." [Online]. Available: <http://filesky.net/QuienesSomos.htm>. [Accessed: 01-Apr-2018].
- [58] F. Maldonado and Tipán Cristina, "Implementación de un sistema web para manejo de datos meteorológicos del Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética de la Escuela Politécnica Nacional," 2011.

## ANEXO I.

### COMPARACIÓN DE LOS PAQUETES COMPUTACIONALES MATLAB, PYTHON Y R STUDIO

A continuación se comparan las prestaciones de los paquetes computacionales Matlab, Python y R studio para el cálculo de los indicadores estadísticos utilizados en esta investigación. Los datos horarios, diarios y mensuales de irradiación solar global horizontal de la estación meteorológica de Belisario fueron empleados para el cálculo de los indicadores estadísticos de comparación RMSE, MBE, MAE, R<sup>2</sup> y K-S test.

Tabla I. 1. Resumen de resultados horarios (H), diarios (D) y mensuales (M) de comparación de la estación meteorológica de Belisario para cada año de medición con los softwares Matlab, Python y R studio.

Año	H/D/M	Software	RMSE	MBE	MAE	R <sup>2</sup>	K-S test	K-S test indicador
	Horario Diario Mensual						1 Negativo 0 Positivo	
			[%]	[%]	[%]	[-]		[-]
2004	H	Matlab	32,447	-0,318	54,418	0,5763	1	0,0000
		Python	32,447	-0,318	54,418	0,5763	1	0,0000
		R studio	32,447	-0,318	54,418	0,5763	1	0,0000
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		0,0%
	D	Matlab	14,138	-0,318	14,046	0,7877	0	0,6761
		Python	14,138	-0,318	14,045	0,7877	0	0,6761
		R studio	14,138	-0,318	14,045	0,7877	0	0,6877
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		1,7%
	M	Matlab	7,236	-0,318	6,490	0,7762	0	0,9913
		Python	7,236	-0,318	6,490	0,7762	0	0,9913
		R studio	7,236	-0,318	6,490	0,7762	0	0,9985
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		0,7%
2005	H	Matlab	39,516	20,608	72,911	0,5606	1	0,0000
		Python	39,516	20,608	72,911	0,5606	1	0,0000
		R studio	39,516	20,608	72,911	0,5606	1	0,0000
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		0,0%
	D	Matlab	26,938	20,608	33,992	0,7530	1	0,0000
		Python	26,938	20,608	33,992	0,7530	1	0,0000
		R studio	26,938	20,608	33,992	0,7530	1	0,0000
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		0,0%
	M	Matlab	23,247	20,608	24,257	0,7136	0	0,1862
		Python	23,247	20,608	24,257	0,7136	0	0,1862

		R studio	23,247	20,608	24,257	0,7136	0	0,2558
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		27,2%
2006	H	Matlab	32,635	6,726	59,932	0,6100	1	0,0000
		Python	32,635	6,726	59,932	0,6100	1	0,0000
		R studio	32,635	6,726	59,932	0,6100	1	0,0000
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		0,0%
	D	Matlab	16,505	6,726	22,455	0,8303	1	0,0024
		Python	16,505	6,726	22,455	0,8303	1	0,0024
		R studio	16,505	6,726	22,455	0,8303	1	0,0027
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		12,1%
	M	Matlab	11,912	6,726	11,766	0,9202	0	0,7864
		Python	11,912	6,726	11,766	0,9202	0	0,7864
		R studio	11,912	6,726	11,766	0,9202	0	0,8690
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		9,5%
2007	H	Matlab	31,070	10,670	53,432	0,6734	1	0,0000
		Python	31,070	10,670	53,432	0,6734	1	0,0000
		R studio	31,070	10,670	53,432	0,6734	1	0,0000
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		0,0%
	D	Matlab	17,748	10,670	19,466	0,8097	1	0,0089
		Python	17,748	10,670	19,466	0,8097	1	0,0089
		R studio	17,748	10,670	19,466	0,8097	1	0,0098
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		9,2%
	M	Matlab	11,832	10,670	12,056	0,9304	0	0,1862
		Python	11,832	10,670	12,056	0,9304	0	0,1862
		R studio	11,832	10,670	12,056	0,9304	0	0,2558
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		27,2%
2008	H	Matlab	38,259	6,666	52,876	0,5062	1	0,0000
		Python	38,259	6,666	52,876	0,5062	1	0,0000
		R studio	38,259	6,666	52,876	0,5062	1	0,0000
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		0,0%
	D	Matlab	15,614	6,666	15,234	0,7900	0	0,0660
		Python	15,613	6,666	15,234	0,7900	0	0,0660
		R studio	15,613	6,666	15,234	0,7900	0	0,0704
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		6,2%
	M	Matlab	7,241	6,666	6,739	0,8211	0	0,1862
		Python	7,240	6,666	6,739	0,8211	0	0,1862
		R studio	7,240	6,666	6,739	0,8211	0	0,2558
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		27,2%
2009	H	Matlab	34,295	3,634	48,214	0,5767	1	0,0000
		Python	34,295	3,634	48,214	0,5767	1	0,0000
		R studio	34,295	3,634	48,214	0,5767	1	0,0000
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		0,0%
	D	Matlab	12,814	3,634	12,036	0,8390	0	0,1909
		Python	12,813	3,634	12,036	0,8390	0	0,1909

		R studio	12,813	3,634	12,036	0,8390	0	0,1995
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		4,3%
	M	Matlab	5,486	3,634	5,211	0,9467	0	0,7864
		Python	5,486	3,634	5,211	0,9467	0	0,7864
		R studio	5,486	3,634	5,211	0,9467	0	0,8690
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		9,5%
2010	H	Matlab	34,204	4,720	48,132	0,5777	1	0,0000
		Python	34,204	4,720	48,132	0,5777	1	0,0000
		R studio	34,204	4,720	48,132	0,5777	1	0,0000
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		0,0%
	D	Matlab	12,581	4,720	12,504	0,8471	0	0,1367
		Python	12,581	4,720	12,504	0,8471	0	0,1367
		R studio	12,581	4,720	12,504	0,8471	0	0,1437
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		4,9%
	M	Matlab	6,618	4,720	6,580	0,8881	0	0,7864
		Python	6,618	4,720	6,580	0,8881	0	0,7864
		R studio	6,618	4,720	6,580	0,8881	0	0,8690
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		9,5%
2011	H	Matlab	33,671	6,421	49,220	0,5993	1	0,0000
		Python	33,671	6,421	49,220	0,5993	1	0,0000
		R studio	33,671	6,421	49,220	0,5993	1	0,0000
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		0,0%
	D	Matlab	12,859	6,421	12,885	0,8511	1	0,0145
		Python	12,859	6,421	12,885	0,8511	1	0,0145
		R studio	12,859	6,421	12,885	0,8511	1	0,0159
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		9,0%
	M	Matlab	7,174	6,421	6,778	0,9448	0	0,1862
		Python	7,174	6,421	6,778	0,9448	0	0,1862
		R studio	7,174	6,421	6,778	0,9448	0	0,2558
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		27,2%
2012	H	Matlab	33,615	5,104	49,213	0,5895	1	0,0000
		Python	33,614	5,104	49,213	0,5895	1	0,0000
		R studio	33,614	5,104	49,213	0,5895	1	0,0000
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		0,0%
	D	Matlab	11,925	5,104	11,207	0,8539	1	0,0442
		Python	11,925	5,104	11,207	0,8539	1	0,0442
		R studio	11,925	5,104	11,207	0,8539	1	0,0475
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		6,9%
	M	Matlab	5,605	5,104	5,368	0,9768	0	0,4333
		Python	5,605	5,104	5,368	0,9768	0	0,4333
		R studio	5,605	5,104	5,368	0,9768	0	0,5361
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		19,2%
2013	H	Matlab	33,674	6,698	47,845	0,5835	1	0,0000
		Python	33,674	6,698	47,844	0,5835	1	0,0000

		R studio	33,674	6,698	47,844	0,5835	1	0,0000
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		0,0%
	D	Matlab	12,710	6,698	12,376	0,8389	1	0,0406
		Python	12,710	6,698	12,376	0,8389	1	0,0406
		R studio	12,710	6,698	12,376	0,8389	1	0,0437
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		7,0%
	M	Matlab	7,169	6,698	6,852	0,9646	0	0,4333
		Python	7,169	6,698	6,852	0,9646	0	0,4333
		R studio	7,169	6,698	6,852	0,9646	0	0,5361
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		19,2%
2014	H	Matlab	34,270	7,551	49,815	0,5843	1	0,0000
		Python	34,270	7,551	49,815	0,5843	1	0,0000
		R studio	34,270	7,551	49,815	0,5843	1	0,0000
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		0,0%
	D	Matlab	15,738	7,551	14,283	0,7937	1	0,0090
		Python	15,738	7,551	14,283	0,7937	1	0,0090
		R studio	15,738	7,551	14,283	0,7937	1	0,0099
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		9,5%
	M	Matlab	8,956	7,551	7,889	0,8255	0	0,1862
		Python	8,956	7,551	7,889	0,8255	0	0,1862
		R studio	8,956	7,551	7,889	0,8255	0	0,2558
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		27,2%
2015	H	Matlab	33,341	5,627	48,955	0,5971	1	0,0000
		Python	33,341	5,626	48,955	0,5971	1	0,0000
		R studio	33,341	5,626	48,955	0,5971	1	0,0000
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		0,0%
	D	Matlab	11,088	5,627	10,927	0,8758	0	0,1146
		Python	11,088	5,626	10,927	0,8758	0	0,1146
		R studio	11,088	5,626	10,927	0,8758	0	0,1209
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		5,2%
	M	Matlab	6,397	5,627	5,816	0,9275	0	0,1862
		Python	6,397	5,626	5,816	0,9275	0	0,1862
		R studio	6,397	5,626	5,816	0,9275	0	0,2558
		<b>ERROR</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		27,2%

(Fuente: Propia)



Se puede apreciar en la tabla I.1. que los resultados obtenidos de los indicadores estadísticos RMSE, MBE, MAE y  $R^2$  son iguales tras utilizar los softwares Matlab, Python y R studio. Los paquetes computacionales Matlab y Python arrojan los mismos resultados al calcular el indicador del K-S test, el cual debe ser mayor a 0,05 para afirmar que los datos satelitales de radiación solar son comparables con los terrestres. El software R studio calcula el indicador del K-S test generalmente con un sobrevalor de hasta el 27,2%, sin embargo este error no interfiere con la aprobación o desaprobación del K-S test. Consecuentemente, las prestaciones del paquete computacional Matlab son aceptables para realizar este estudio.

## ANEXO II.

### LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS SELECCIONADAS

Tabla II. 2 Estaciones meteorológicas de estudio manejadas por la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito

Estación Meteorológica	Prov.	Coordenadas Geográficas		Altura [m s.n.m.]	Medida GHI /DHI /DNI	Datos por año	Años	Marca y modelo del instrumento de medición
		Lat.	Long.					
<b>BELISARIO</b>	Pichincha	-0,18	-78,49	2835	GHI	3420	2004-2015	<i>Marca: Kipp &amp; Zonen y modelo: CM3</i>
<b>EL CAMAL</b>	Pichincha	-0,25	-78,51	2840	GHI	2400	2007-2014	
<b>CARAPUNGO</b>	Pichincha	-0,10	-78,45	2660	GHI	3570	2004-2015	
<b>LOS CHILLOS</b>	Pichincha	-0,30	-78,46	2453	GHI	2545	2007-2015	
<b>COTOCOLLAO</b>	Pichincha	-0,11	-78,50	2739	GHI	3473	2004-2015	
<b>TUMBACO</b>	Pichincha	-0,21	-78,4	2331	GHI	2485	2007-2015	

(Fuente: [55])

Tabla II. 3. Estaciones meteorológicas de estudio manejadas por el INER

Estación Meteorológica	Provincia	Coordenadas Geográficas		Altura [m s.n.m.]	Medida GHI / DHI / DNI	Datos por año	Años	Marca y modelo del instrumento de medición
		Lat.	Long.					
<b>BAÑOS</b>	Azuay	-2,96	-79,09	3062	GHI / DHI	3681	2014- 2015	Marca: Kipp & Zonen y modelo: CMP6
<b>CAJAS</b>	Azuay	-2,78	-79,19	3646	GHI / DHI	2382	2015	
<b>NULTI</b>	Azuay	-2,87	-78,94	2623	GHI / DHI	3719	2014- 2015	
<b>TIXAN</b>	Azuay	-2,83	-78,99	2725	GHI / DHI	3780	2014- 2015	
<b>ALAO</b>	Chimborazo	-1,87	-78,54	3064	GHI / DHI	4160	2014	
<b>ALTILLO</b>	Chimborazo	-2,19	-78,55	3442	GHI / DHI	3825	2014	
<b>CUMANDA</b>	Chimborazo	-2,21	-79,15	331	GHI / DHI	3961	2014	
<b>ESPOCH</b>	Chimborazo	-1,66	-78,68	2754	GHI / DHI	3529	2014	
<b>MULTITUD</b>	Chimborazo	-2,13	-79,00	1483	GHI / DHI	3978	2014	
<b>QUIMIAG</b>	Chimborazo	-1,66	-78,57	2709	GHI / DHI	3538	2014	
<b>SAN JUAN</b>	Chimborazo	-1,64	-78,78	3232	GHI / DHI	3838	2014	
<b>TIXAN PISTILLI</b>	Chimborazo	-2,16	-78,76	3546	GHI / DHI	3138	2014	
<b>TUNSHI</b>	Chimborazo	-1,75	-78,63	2840	GHI / DHI	3522	2014	
<b>URBINA</b>	Chimborazo	-1,49	-78,71	3642	GHI / DHI	3610	2014	

(Fuente: [51, 55])

Tabla II. 4. Estaciones meteorológicas de estudio manejadas por el INAMHI

Estación Meteorológica	Código	Provincia	Coordenadas Geográficas		Altura	Medida	Datos por año	Años	Marca y modelo del instrumento de medición
			Lat.	Long.	[m s.n.m.]	GHI /DHI /DNI			
<b>NOBOL</b>	M1207	Guayas	-1,90	-80,04	7	GHI	3513	2015	Hukseflux SR11
<b>SANTA ELENA</b>	M1170	Santa Elena	-2,23	-80,88	13	GHI	492	2015	Kipp & Zonen CMP6
<b>MILAGRO (INGENIO VALDEZ)</b>	M0037	Guayas	-2,12	-79,60	13	GHI	3236	2015	Hukseflux SR11
<b>LA CUCA</b>	M0012	El Oro	-3,49	-80,08	32	GHI	3435	2015	
<b>PEDERNALES</b>	M0168	Manabí	0,06	-80,05	33	GHI	2921	2015	Kipp & Zonen CM3
<b>CHONE - U. CATÓLICA</b>	M0162	Manabí	-0,66	-80,04	36	GHI	3510	2015	Hukseflux SR11
<b>PALESEMA - SAN LORENZO</b>	M1249	Esmeraldas	1,30	-78,73	45	GHI	3702	2015	
<b>PUCE -BAHÍA DE CARÁQUEZ</b>	M1217	Manabí	-0,65	-80,40	55	GHI	3602	2015	
<b>LA TEODÓMIRA</b>	M1208	Manabí	-1,17	-80,39	60	GHI	2598	2015	
<b>CANTAGALLO - GRANJA UN</b>	M1233	Manabí	-1,28	-80,73	64	GHI	3497	2015	
<b>QUININDE</b>	M0156	Esmeraldas	0,32	-79,47	115	GHI	3309	2015	
<b>PICHILINGUE</b>	M0006	Los Ríos	-1,07	-79,49	120	GHI	629	2015	
<b>SAN JUAN LA MANA</b>	M0124	Cotopaxi	-0,92	-79,25	215	GHI	2994	2015	
<b>PUERTO ILA</b>	M0026	Pichincha	-0,49	-79,35	319	GHI	3658	2015	
<b>LA CONCORDIA</b>	M0025	Pichincha	-0,03	-79,38	379	GHI	3509	2015	
<b>CHILLANES</b>	M0130	Bolívar	-1,98	-79,07	2320	GHI	2664	2015	
<b>LAGUACOTO - GUARANDA</b>	M1107	Bolívar	-1,61	-79,00	2608	GHI	3651	2015	
<b>RUMIPAMBA</b>	M0004	Cotopaxi	-1,02	-78,59	2685	GHI	3551	2015	
<b>TOMALON</b>	M1094	Pichincha	0,01	-78,26	2790	GHI	3625	2015	

<b>SAN GABRIEL</b>	M0103	Carchi	0,60	-77,82	2860	GHI	3444	2015	
<b>QUEROCHACA</b>	M0258	Tungurahua	-1,36	-78,61	2865	GHI	2338	2015	
<b>ANGEL</b>	M0102	Carchi	0,62	-77,94	3000	GHI	3854	2015	
<b>IZOBAMBA</b>	M0003	Pichincha	-0,37	-78,56	3058	GHI	3492	2015	Kipp & Zonen CM3
<b>CAÑAR</b>	M0031	Cañar	2,55	-78,95	3083	GHI	3599	2015	
<b>RIOBAMBA - ESPOCH</b>	M1036	Chimborazo	-1,65	-78,67	2850	GHI	3527	2015	
<b>OTAVALO</b>	M0105	Imbabura	0,24	-78,25	2550	GHI	3553	2015	
<b>LA TOLA</b>	M0002	Pichincha	-0,23	-78,37	2480	GHI	3517	2015	
<b>IBARRA - INAMHI</b>	M1240	Imbabura	0,33	-78,13	2256	GHI	3857	2015	
<b>GUALACEO</b>	M0139	Azuay	-2,90	-78,78	2230	GHI	3257	2015	
<b>LA ARGELIA - LOJA</b>	M033	Loja	-4,04	-79,20	2160	GHI	1005	2015	Hukseflux SR11
<b>CARIAMANGA</b>	M0146	Loja	-4,30	-79,55	1950	GHI	3569	2015	
<b>MACAS</b>	M1040	Morona Sa.	-2,21	-78,16	1110	GHI	2752	2015	
<b>PUYO</b>	M0008	Pastaza	-1,50	-77,96	956	GHI	194	2015	
<b>TENA - HDA. CHAUPISHUNGO</b>	M1219	Napo	-0,92	-77,82	665	GHI	3651	2015	
<b>LUMBAQUI</b>	M1203	Sucumbíos	0,04	-77,34	580	GHI	3856	2015	

(Fuente: [30])

## ANEXO III.

### DESCARGA DE DATOS METEOROLÓGICOS DE LA PÁGINA WEB DEL NREL

Para descargarlos es necesario seguir los siguientes pasos:

- Ingresar a la página web de NREL, cuyo link es: <https://nsrdb.NREL.gov/>
- Señalar la opción Data Sets y escoger la opción NSRDB viewer.
- Ingresar a la opción Launch the NSRDB Viewer (botón amarillo) y se desplegará un atlas mundial.

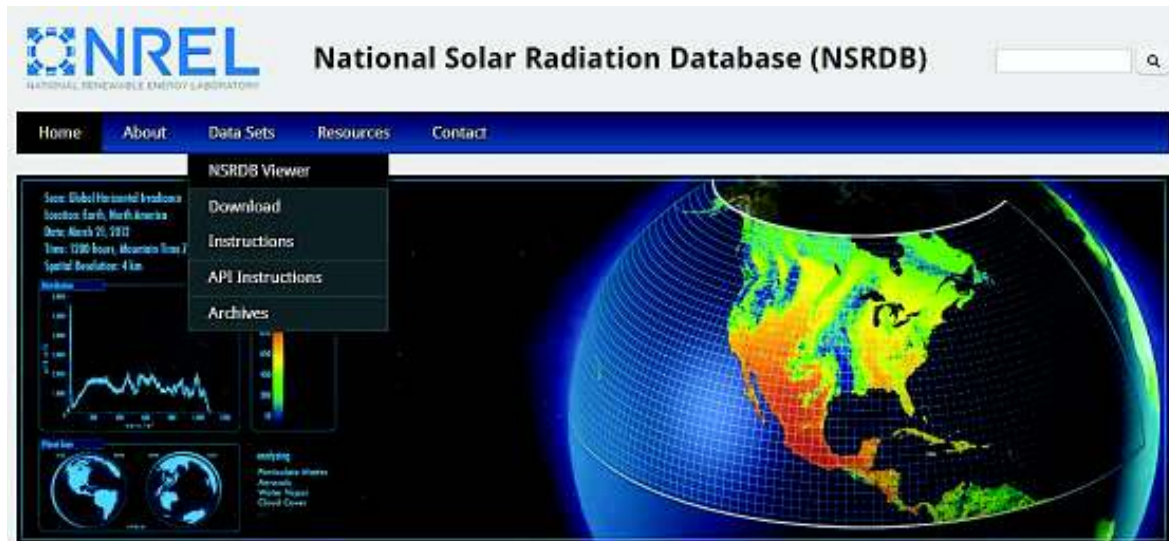


Figura III. 1. Página inicial del NREL.  
(Fuente: [19])

- Para apreciar de mejor manera las localidades dentro del mapa, en la opción legend setear una transparencia mayor a 75%.
- Clickear la opción Download Data y elegir la opción NSRDB Data Download (Point)
- Encontrar y seleccionar la ubicación exacta de localidad estudiada de la cual se desea los datos de irradiancia.



Figura III. 2. Mapa de descarga de datos meteorológicos.  
(Fuente: [19])

- Ingresar los datos en la forma que se desplegará:

### Data Download Information Form

Please fill out the following information in order to utilize the data download tool. This information helps us to justify improvements to the tool.

**Note: All fields are required.**

<p><b>Full Name:</b></p> <input style="width: 90%;" type="text" value="Diego Vaca"/>	<p><b>Email:</b></p> <input style="width: 90%;" type="text" value="diego.vaca@epn.edu.ec"/>
<p><b>Organization/Affiliation:</b></p> <input style="width: 90%;" type="text" value="EPN"/>	<p><input type="checkbox"/> Please keep me informed of future releases and publications.</p>
<p><b>Planned Use:</b></p> <input style="width: 90%;" type="text" value="Research"/>	

Figura III. 3. Información de contacto para descargar datos del NREL  
(Fuente: [19])

- A continuación se desplegarán las opciones de descarga en la cual se seleccionarán todas las mediciones satelitales correspondientes a todos los años (no elegir TMY ya que este estudio no engloba el año típico de irradiancia). Además, seleccionar todos los atributos y dentro de las opciones de descarga seleccionar la opción: incluir 29 de febrero en años bisiestos, convertir UCT a hora local y setear los intervalos de tiempo entre medición de 30 minutos, así:

Figura III. 4. Selección de datos meteorológicos que se desean descargar (Fuente: [19])

- Seleccionar la opción descargar datos
- Después de unas horas, el link de descarga estará disponible en el correo con el cual se llenó la forma de información inicial.
- Al clicar el link la descarga iniciará automáticamente. Dentro del archivo descargado hay varios documentos con formato .csv los cuales pueden ser leídos en Excel fácilmente y transformados a formato .xism.



## ANEXO IV.

### INDICADORES ESTADÍSTICOS CALCULADOS PARA CADA ESTACIÓN METEOROLÓGICA

#### Estaciones meteorológicas operadas por Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito

Tabla IV. 1. Resumen de resultados horarios (H), diarios (D) y mensuales (M) de las estaciones meteorológicas de la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito.

Estación Meteorológica	Año	H/D/M	RMSE	MBE	R cuadrado	K-S test resultado	K-S test indicador
	[-]	Horario Diario Mensual	[%]	[%]	[-]	1 Negativo 2 Positivo	[-]
<b>Belisario</b>	2004	H	32,45	-0,32	0,5763	1	< 0,0001
		D	14,14	-0,32	0,7877	0	0,6761
		M	7,24	-0,32	0,7762	0	0,9913
	2005	H	39,52	20,61	0,5606	1	< 0,0001
		D	26,94	20,61	0,753	1	< 0,0001
		M	23,25	20,61	0,7136	0	0,1862
	2006	H	32,63	6,73	0,61	1	< 0,0001
		D	16,50	6,73	0,8303	1	0,0024
		M	11,91	6,73	0,9202	0	0,7864
	2007	H	31,07	10,67	0,6734	1	< 0,0001
		D	17,75	10,67	0,8097	1	0,0089
		M	11,83	10,67	0,9304	0	0,1862
	2008	H	38,26	6,67	0,5062	1	< 0,0001
		D	15,61	6,67	0,79	0	0,066
		M	7,24	6,67	0,8211	0	0,1862
	2009	H	34,29	3,63	0,5767	1	< 0,0001
		D	12,81	3,63	0,839	0	0,1909
		M	5,49	3,63	0,9467	0	0,7864
2010	H	34,20	4,72	0,5777	1	< 0,0001	

		<b>D</b>	12,58	4,72	0,8471	0	0,1367
		<b>M</b>	6,62	4,72	0,8881	0	0,7864
2011	H		33,67	6,42	0,5993	1	< 0,0001
		<b>D</b>	12,86	6,42	0,8511	1	0,0145
		<b>M</b>	7,17	6,42	0,9448	0	0,1862
2012	H		33,61	5,10	0,5895	1	< 0,0001
		<b>D</b>	11,92	5,10	0,8539	1	0,0442
		<b>M</b>	5,60	5,10	0,9768	0	0,4333
2013	H		33,67	6,70	0,5835	1	< 0,0001
		<b>D</b>	12,71	6,70	0,8389	1	0,0406
		<b>M</b>	7,17	6,70	0,9646	0	0,4333
2014	H		34,27	7,55	0,5843	1	< 0,0001
		<b>D</b>	15,74	7,55	0,7937	1	0,009
		<b>M</b>	8,96	7,55	0,8255	0	0,1862
2015	H		33,34	5,63	0,5971	1	< 0,0001
		<b>D</b>	11,09	5,63	0,8758	0	0,1146
		<b>M</b>	6,40	5,63	0,9275	0	0,1862
<b>Camal</b>	2007	H	41,10	20,62	0,537	1	< 0,0001
		<b>D</b>	27,84	20,62	0,683	1	< 0,0001
		<b>M</b>	23,69	20,62	0,6971	0	0,0656
	2008	H	37,31	8,04	0,5324	1	< 0,0001
		<b>D</b>	17,72	8,04	0,6852	1	0,0042
		<b>M</b>	10,78	8,04	0,1553	0	0,0656
	2009	H	34,67	7,40	0,5754	1	< 0,0001
		<b>D</b>	15,52	7,40	0,7676	1	0,0008
		<b>M</b>	9,21	7,40	0,7749	0	0,4333
	2010	H	31,82	2,87	0,616	1	< 0,0001
		<b>D</b>	13,13	2,87	0,802	0	0,2238
		<b>M</b>	6,95	2,87	0,8282	0	0,7864
	2011	H	32,53	5,74	0,6093	1	< 0,0001
		<b>D</b>	14,90	5,74	0,7375	1	0,0438

		<b>M</b>	7,43	5,74	0,8302	0	0,4333
	2012	H	33,49	4,70	0,581	1	< 0,0001
		D	13,80	4,70	0,7969	1	0,0186
		M	7,64	4,70	0,8957	0	0,7864
	2013	H	31,58	3,19	0,6099	1	< 0,0001
		D	12,58	3,19	0,8012	0	0,3869
		M	5,74	3,19	0,8113	0	0,9913
	2014	H	33,19	6,19	0,5894	1	< 0,0001
		D	17,79	6,19	0,6992	1	0,0127
		M	8,66	6,19	0,8603	0	0,25
<b>Carapungo</b>	2004	H	35,00	-5,67	0,5501	1	< 0,0001
		D	16,73	-5,67	0,6772	1	0,0009
		M	9,17	-5,67	0,7958	0	0,4333
	2005	H	27,09	-6,71	0,7191	1	< 0,0001
		D	12,71	-6,71	0,819	1	0,0013
		M	8,37	-6,71	0,9808	0	0,3744
	2006	H	28,58	3,74	0,6753	1	< 0,0001
		D	16,22	3,74	0,7205	0	0,2224
		M	9,12	3,74	0,1925	0	0,7864
	2007	H	25,83	2,65	0,7231	1	< 0,0001
		D	11,09	2,65	0,8135	0	0,2607
		M	3,80	2,65	0,9038	0	0,9913
	2008	H	35,01	1,52	0,5296	1	0,0004
		D	11,73	1,52	0,8064	0	0,2238
		M	3,52	1,52	0,8087	0	0,7864
	2009	H	31,23	3,96	0,6074	1	0,0006
		D	10,24	3,96	0,8561	0	0,1367
		M	4,44	3,96	0,9522	0	0,7864
	2010	H	31,62	5,08	0,6121	1	< 0,0001
		D	11,22	5,08	0,8468	0	0,0956
		M	5,77	5,08	0,9078	0	0,4333

	2011	H	31,79	10,23	0,6256	1	< 0,0001
		D	13,73	10,23	0,8528	1	< 0,0001
		M	10,33	10,23	0,9646	0	0,0656
	2012	H	30,51	-0,51	0,6082	1	0,0002
		D	9,65	-0,51	0,8219	0	0,9472
		M	2,39	-0,51	0,988	0	0,7864
	2013	H	29,90	2,43	0,6216	1	< 0,0001
		D	10,04	2,43	0,8383	0	0,3375
		M	2,90	2,43	0,9787	0	0,4333
	2014	H	31,32	2,48	0,5991	1	0,0003
		D	14,07	2,48	0,685	0	0,5034
		M	6,26	2,48	0,5578	0	0,7864
	2015	H	30,53	1,94	0,6213	1	< 0,0001
		D	9,98	1,94	0,7972	0	0,63
		M	3,89	1,94	0,6915	0	0,7864
<b>Chillos</b>	2007	H	34,64	18,15	0,6473	1	< 0,0001
		D	25,16	18,15	0,7171	1	< 0,0001
		M	22,43	18,15	0,6618	0	0,0656
	2008	H	35,14	3,43	0,5441	1	< 0,0001
		D	11,84	3,43	0,7919	0	0,1872
		M	5,63	3,43	0,6605	0	0,4333
	2009	H	31,87	1,82	0,5966	1	< 0,0001
		D	9,70	1,82	0,8494	0	0,7533
		M	4,29	1,82	0,8722	0	0,7864
	2010	H	30,66	-3,55	0,6325	1	< 0,0001
		D	10,13	-3,55	0,863	0	0,0654
		M	4,51	-3,55	0,9143	0	0,4333
	2011	H	29,96	-1,90	0,6418	1	< 0,0001
		D	9,08	-1,90	0,8511	0	0,3019
		M	2,35	-1,90	0,9716	0	0,7864
	2012	H	30,68	-1,77	0,6205	1	< 0,0001

	<b>D</b>		8,98	-1,77	0,8806	0	0,5052
	<b>M</b>		3,13	-1,77	0,9699	0	0,9913
2013	H		30,86	-2,49	0,6124	1	< 0,0001
	<b>D</b>		9,40	-2,49	0,8531	0	0,2956
	<b>M</b>		2,91	-2,49	0,982	0	0,4333
2014	H		30,64	0,66	0,6251	1	< 0,0001
	<b>D</b>		13,38	0,66	0,7287	0	0,4495
	<b>M</b>		3,95	0,66	0,7946	0	0,9913
2015	H		29,60	-2,14	0,649	1	< 0,0001
	<b>D</b>		9,00	-2,14	0,863	0	0,5694
	<b>M</b>		3,22	-2,14	0,9351	0	0,7864
<b>Cotocollao</b>	2004	H	37,44	9,43	0,5107	1	< 0,0001
		D	20,65	9,43	0,6004	1	0,0043
		<b>M</b>	10,61	9,43	0,9132	0	0,1862
	2005	H	35,33	10,00	0,573	1	< 0,0001
		D	20,80	10,00	0,6567	1	0,0002
		<b>M</b>	12,37	10,00	0,8744	0	0,3129
	2006	H	38,47	8,43	0,4837	1	< 0,0001
		D	21,24	8,43	0,6294	1	0,0355
		<b>M</b>	9,61	8,43	0,8393	0	0,4333
	2007	H	37,79	3,21	0,4726	1	< 0,0001
		<b>D</b>	20,80	3,21	0,5496	0	0,3474
		<b>M</b>	10,26	3,21	0,6318	0	0,4333
	2008	H	43,77	-6,15	0,3285	1	< 0,0001
		D	21,07	-6,15	0,4608	1	< 0,0001
		<b>M</b>	9,87	-6,15	0,3442	0	0,0656
	2009	H	39,74	-2,25	0,4166	1	0,0009
		<b>D</b>	18,37	-2,25	0,5714	0	0,2211
		<b>M</b>	5,95	-2,25	0,7626	0	0,4333
	2010	H	38,77	-4,56	0,4335	1	< 0,0001

		D	17,39	-4,56	0,6255	1	0,0181
		<b>M</b>	6,42	-4,56	0,7922	0	0,4333
2011	H		39,20	-10,83	0,4262	1	< 0,0001
		D	19,70	-10,83	0,5853	1	< 0,0001
		<b>M</b>	11,21	-10,83	0,897	0	0,0656
2012	H		39,25	-10,21	0,4261	1	< 0,0001
		D	19,68	-10,21	0,5851	1	< 0,0001
		<b>M</b>	10,77	-10,21	0,9233	0	0,1862
2013	H		38,70	-7,95	0,4275	1	< 0,0001
		D	19,73	-7,95	0,5513	1	< 0,0001
		<b>M</b>	8,98	-7,95	0,8336	0	0,0656
2014	H		39,44	-7,73	0,4248	1	< 0,0001
		D	20,96	-7,73	0,4852	1	0,0032
		<b>M</b>	9,31	-7,73	0,5437	1	0,0191
2015	H		39,40	-8,43	0,4272	1	< 0,0001
		D	18,63	-8,43	0,5599	1	< 0,0001
		<b>M</b>	9,89	-8,43	0,6371	1	0,0191
<b>Tumbaco</b>	2007	H	36,60	18,23	0,6087	1	< 0,0001
		D	25,85	18,23	0,7531	1	< 0,0001
		<b>M</b>	22,61	18,23	0,9023	0	0,4333
	2008	H	33,52	6,31	0,5914	1	< 0,0001
		D	11,92	6,31	0,8199	1	0,0165
		<b>M</b>	6,77	6,31	0,8831	0	0,1862
	2009	H	31,24	7,95	0,6426	1	< 0,0001
		D	13,30	7,95	0,8265	1	0,0013
		<b>M</b>	9,75	7,95	0,8658	0	0,4333
	2010	H	29,89	-1,29	0,6449	1	< 0,0001
		<b>D</b>	10,76	-1,29	0,8268	0	0,3973
		<b>M</b>	3,46	-1,29	0,8989	0	0,9913
	2011	H	28,46	1,34	0,6754	1	< 0,0001
		<b>D</b>	9,87	1,34	0,8218	0	0,5694
		<b>M</b>	2,77	1,34	0,9248	0	0,9913
	2012	H	30,31	1,47	0,6321	1	< 0,0001

	<b>D</b>		11,41	1,47	0,8058	0	0,1553
	<b>M</b>		3,87	1,47	0,9493	0	0,7864
2013	<b>H</b>		30,40	2,93	0,6219	1	< 0,0001
	<b>D</b>		10,42	2,93	0,8173	0	0,0908
	<b>M</b>		3,91	2,93	0,9401	0	0,4333
2014	<b>H</b>		30,01	2,77	0,6373	1	< 0,0001
	<b>D</b>		13,64	2,77	0,7182	0	0,1367
	<b>M</b>		4,67	2,77	0,799	0	0,4333
2015	<b>H</b>		28,27	1,33	0,6766	1	< 0,0001
	<b>D</b>		9,18	1,33	0,8565	0	0,3956
	<b>M</b>		2,65	1,33	0,9647	0	0,7864

(Fuente: Propia)

## Estaciones meteorológicas operadas por INER

Irradiación horizontal global:

Tabla IV. 2. Resumen de resultados horarios (H), diarios (D) y mensuales (M) de irradiación horizontal global de las estaciones meteorológicas de INER.

Estación Meteorológica	Año	H/D/M	RMSE	MBE	R cuadrado	K-S test resultado	K-S test indicador
	[-]	Horario Diario Mensual	[%]	[%]	[-]	1 Negativo 0 Positivo	[-]
<b>Baños</b>	2014	<b>H</b>	40,66	10,06	0,5854	1	< 0,0001
		<b>D</b>	20,40	10,06	0,7705	1	0,0012
		<b>M</b>	11,64	10,06	0,8753	0	0,4333

	2015	H	37,99	9,03	0,6149	1	< 0,0001
		D	13,95	9,03	0,894	1	0,007
		M	9,33	9,03	0,9673	0	0,1862
<b>Cajas</b>	2015	H	36,05	-0,99	0,6318	1	0,0025
		D	14,30	-0,99	0,8714	0	0,4512
		M	3,56	-0,99	0,9292	0	0,9913
<b>Nulti</b>	2014	H	35,52	-4,94	0,5612	1	0,0009
		D	19,52	-4,94	0,5934	1	0,0113
		M	9,02	-4,94	0,7267	0	0,4333
	2015	H	32,39	-6,40	0,6284	1	< 0,0001
		D	13,83	-6,40	0,7891	1	0,0054
		M	7,42	-6,40	0,8887	0	0,1862
<b>Tixán</b>	2014	H	36,50	6,16	0,6339	1	< 0,0001
		D	18,86	6,16	0,734	1	0,0438
		M	8,82	6,16	0,8003	0	0,4333
	2015	H	35,06	5,37	0,6446	1	< 0,0001
		D	13,62	5,37	0,8456	0	0,1367
		M	6,80	5,37	0,8846	0	0,4333
<b>Alao</b>	2014	H	47,06	14,25	0,5323	1	< 0,0001
		D	29,58	14,25	0,4199	1	< 0,0001
		M	16,63	14,25	0,4431	1	0,0468
<b>Atillo</b>	2014	H	38,72	5,77	0,6637	1	0,0033
		D	20,72	5,77	0,7702	0	0,145
		M	9,41	5,77	0,8136	0	0,9852
<b>Cumandá</b>	2014	H	55,56	25,59	0,5326	1	< 0,0001
		D	40,31	25,59	0,5322	1	< 0,0001
		M	28,18	25,59	0,5992	1	0,0025
<b>ESPOCH</b>	2014	H	31,62	5,36	0,6466	1	< 0,0001
		D	15,36	5,36	0,6562	1	0,0071
		M	6,09	5,36	0,8511	0	0,3744
<b>Multitud</b>	2014	H	86,19	83,57	0,5524	1	< 0,0001
		D	86,56	83,57	0,4748	1	< 0,0001
		M	80,96	83,57	0,7987	1	0,0004
<b>Quimiag</b>	2014	H	37,33	10,47	0,5868	1	< 0,0001
		D	19,70	10,47	0,6646	1	0,0002



		<b>M</b>	11,32	10,47	0,8455	0	0,1473
<b>San Juan</b>	2014	H	53,52	19,38	0,4636	1	< 0,0001
		D	37,44	19,38	0,3211	1	< 0,0001
		M	23,35	19,38	0,4372	1	0,0121
<b>Tixán Pistilli</b>	2014	H	41,15	6,38	0,4355	1	< 0,0001
		D	23,01	6,38	0,5419	1	0,0138
		M	8,55	6,38	0,8806	0	0,3744
<b>Tunshi</b>	2014	H	43,98	2,54	0,4006	1	< 0,0001
		D	29,44	2,54	0,1204	0	0,3427
		M	5,86	2,54	0,7029	0	0,7358
<b>Urbina</b>	2014	H	44,47	6,52	0,4973	1	0,0037
		D	26,24	6,52	0,5765	0	0,0586
		M	9,95	6,52	0,7315	0	0,3744

(Fuente: Propia)

Irradiación horizontal difusa:

Tabla IV. 3. Resumen de resultados horarios (H), diarios (D) y mensuales (M) de irradiación difusa horizontal de las estaciones meteorológicas de INER.

Estación Meteorológica	Año	H/D/M	RMSE	MBE	R cuadrado	K-S test resultado	K-S test indicador
	[-]	Horario Diario Mensual	[%]	[%]	[-]	1 Negativo 0 Positivo	[-]
<b>Baños</b>	2014	H	50,43	-4,61	0,2483	1	0,0003
		D	30,91	-4,61	0,1393	0	0,2157
		M	16,20	-4,61	0,0144	0	0,4333
	2015	H	56,00	-12,89	0,1725	1	< 0,0001
		D	43,87	-12,89	0,0023	1	< 0,0001
		M	25,14	-12,89	0,1381	0	0,0656
<b>Cajas</b>	2015	H	56,89	-23,16	0,2217	1	< 0,0001
		D	45,24	-23,16	0,5363	1	0,0006
		M	27,18	-23,16	0,8508	0	0,4333
<b>Nulti</b>	2014	H	45,33	-13,26	0,3403	1	< 0,0001
		D	31,29	-13,26	0,1712	1	< 0,0001
		M	18,95	-13,26	0,1357	1	0,0046

	2015	H	56,86	-29,81	0,1857	1	< 0,0001
		D	47,70	-29,81	0,0034	1	< 0,0001
		M	36,33	-29,81	0,1193	1	0,0002
<b>Tixán</b>	2014	H	44,40	-3,91	0,3523	1	< 0,0001
		<b>D</b>	30,42	-3,91	0,1043	0	0,0956
		<b>M</b>	10,23	-3,91	0,1605	0	0,4333
	2015	H	53,37	-17,90	0,2288	1	< 0,0001
		D	41,72	-17,90	0,014	1	< 0,0001
		M	26,18	-17,90	0,2944	1	0,0191
<b>Alao</b>	2014	H	50,55	-12,89	0,3863	1	< 0,0001
		D	34,60	-12,89	0,0469	1	< 0,0001
		<b>M</b>	22,76	-12,89	0,3228	0	0,3744
<b>Atillo</b>	2014	H	52,34	-21,44	0,3513	1	< 0,0001
		D	38,24	-21,44	0,0688	1	< 0,0001
		M	25,76	-21,44	0,4543	1	0,0025
<b>Cumandá</b>	2014	H	50,20	16,61	0,4633	1	< 0,0001
		D	32,30	16,61	0,2265	1	< 0,0001
		M	23,09	16,61	0,1722	1	0,0468
<b>ESPOCH</b>	2014	H	58,97	-20,71	0,1759	1	< 0,0001
		D	46,56	-20,71	0,0476	1	< 0,0001
		M	35,18	-20,71	0,3756	1	0,0468
<b>Multitud</b>	2014	H	71,36	24,26	0,1902	1	< 0,0001
		D	55,55	24,26	0,0031	1	< 0,0001
		M	39,89	24,26	0,0156	1	0,0004
<b>Quimiag</b>	2014	H	54,25	-23,46	0,159	1	< 0,0001
		D	39,23	-23,46	0,0042	1	< 0,0001
		M	27,70	-23,46	0,0139	1	0,0025
<b>San Juan</b>	2014	H	48,83	-14,87	0,3608	1	< 0,0001
		D	35,24	-14,87	0,0145	1	< 0,0001
		M	23,93	-14,87	0,1565	1	0,0121
<b>Tixán Pistilli</b>	2014	H	57,12	-29,29	0,1324	1	< 0,0001
		D	45,39	-29,29	0,0626	1	< 0,0001
		M	34,94	-29,29	0,3192	1	0,0025
<b>Tunshi</b>	2014	H	62,33	-35,40	0,0823	1	< 0,0001

		D	49,17	-35,40	0,0139	1	< 0,0001
		M	39,73	-35,40	0,0966	1	< 0,0001
<b>Urbina</b>	2014	H	48,87	-19,17	0,2943	1	< 0,0001
		D	31,90	-19,17	0,0759	1	< 0,0001
		M	20,46	-19,17	0,4411	1	< 0,0001

(Fuente: Propia)

## Estaciones meteorológicas operadas por INAMHI

Tabla IV. 4. Resumen de resultados horarios (H), diarios (D) y mensuales (M) de las estaciones meteorológicas de INAMHI.

Estación Meteorológica	Año	H/D/M	RMSE	MBE	R cuadrado	K-S test resultado	K-S test indicador
	[-]	Horario Diario Mensual	[%]	[%]	[-]	1 Negativo 0 Positivo	[-]
<b>Ángel</b>	2015	H	36,45	3,19	0,5574	1	< 0,0001
		D	15,30	3,19	0,7073	0	0,249
		M	4,28	3,19	0,9289	0	0,1862
<b>La Argelia - Loja</b>	2015	H	39,43	12,49	0,6408	1	< 0,0001
		D	20,14	12,49	0,7861	1	0,0265
		M	12,84	12,49	0,9886	0	0,5344
<b>Cañar</b>	2015	H	31,99	-1,57	0,6006	1	0,0002
		D	13,17	-1,57	0,7587	0	0,0869
		M	5,37	-1,57	0,8227	0	0,9913
<b>Cantagallo - Granja UNESUM</b>	2015	H	30,98	8,52	0,7163	1	< 0,0001
		D	16,39	8,52	0,8632	1	0,0247
		M	11,59	8,52	0,9483	0	0,1862
<b>PUCE -Bahía de Caráquez</b>	2015	H	34,97	7,87	0,6006	1	< 0,0001
		D	14,28	7,87	0,8513	1	0,013
		M	8,82	7,87	0,9259	0	0,4333
<b>Cariamanga</b>	2015	H	32,15	4,71	0,6025	1	< 0,0001

		<b>D</b>	12,12	4,71	0,8127	0	0,0737
		<b>M</b>	6,35	4,71	0,8905	0	0,7864
<b>Chillanes</b>	2015	<b>H</b>	46,57	-16,33	0,437	1	< 0,0001
		<b>D</b>	24,50	-16,33	0,6985	1	< 0,0001
		<b>M</b>	16,62	-16,33	0,9697	0	0,1108
<b>Chone – U. Católica</b>	2015	<b>H</b>	31,97	3,82	0,6512	1	< 0,0001
		<b>D</b>	11,06	3,82	0,8717	0	0,213
		<b>M</b>	5,25	3,82	0,9526	0	0,1862
<b>La Concordia</b>	2015	<b>H</b>	32,77	1,37	0,6518	1	0,0029
		<b>D</b>	11,03	1,37	0,8742	0	0,7263
		<b>M</b>	4,39	1,37	0,9507	0	0,9913
<b>La Cuca</b>	2015	<b>H</b>	29,08	2,51	0,7122	1	< 0,0001
		<b>D</b>	8,60	2,51	0,9264	0	0,8995
		<b>M</b>	4,37	2,51	0,9538	0	0,7864
<b>Santa Elena</b>	2015	<b>H</b>	55,27	39,09	0,5445	1	< 0,0001
		<b>D</b>	44,78	39,09	0,524	1	0,0003
		<b>M</b>	42,80	39,09	1	0	0,097
<b>San Gabriel</b>	2015	<b>H</b>	40,80	-10,55	0,5093	1	< 0,0001
		<b>D</b>	20,25	-10,55	0,684	1	< 0,0001
		<b>M</b>	11,17	-10,55	0,9184	0	0,3744
<b>Gualaceo</b>	2015	<b>H</b>	35,17	2,61	0,5525	1	0,0043
		<b>D</b>	13,41	2,61	0,8479	0	0,782
		<b>M</b>	3,69	2,61	0,9708	0	0,7864
<b>Ibarra - INAMHI</b>	2015	<b>H</b>	33,17	3,55	0,6197	1	0,0005
		<b>D</b>	12,29	3,55	0,7863	0	0,3342
		<b>M</b>	5,56	3,55	0,8416	0	0,4333
<b>Puerto Ila</b>	2015	<b>H</b>	40,27	11,69	0,6043	1	< 0,0001
		<b>D</b>	18,26	11,69	0,8197	1	< 0,0001
		<b>M</b>	13,94	11,69	0,8425	0	0,0656
<b>Izobamba</b>	2015	<b>H</b>	33,80	0,87	0,5951	1	< 0,0001
		<b>D</b>	13,06	0,87	0,7932	0	0,6455
		<b>M</b>	2,93	0,87	0,9724	0	0,9913
<b>Laguacoto - Guaranda</b>	2015	<b>H</b>	30,77	0,88	0,656	1	0,0002
		<b>D</b>	10,03	0,88	0,8898	0	0,9863
		<b>M</b>	2,52	0,88	0,9889	0	0,9913

<b>Lumbaqui</b>	2015	H	34,72	12,44	0,7226	1	< 0,0001
		D	17,36	12,44	0,8881	1	0,0028
		<b>M</b>	12,96	12,44	0,9721	0	0,0656
<b>Macas</b>	2015	H	45,91	18,85	0,4875	1	< 0,0001
		D	26,68	18,85	0,8367	1	0,0017
		<b>M</b>	19,90	18,85	0,9703	0	0,4333
<b>San Juan La Mana</b>	2015	H	37,23	1,45	0,5565	1	< 0,0001
		<b>D</b>	13,11	1,45	0,8743	0	0,8208
		<b>M</b>	6,88	1,45	0,9358	0	0,9913
<b>Milagro (Ingenio Valdéz)</b>	2015	H	35,90	11,28	0,6048	1	< 0,0001
		D	16,39	11,28	0,8751	1	0,0011
		<b>M</b>	12,18	11,28	0,9575	0	0,4333
<b>Nobol</b>	2015	H	28,81	12,09	0,7493	1	< 0,0001
		D	15,90	12,09	0,8655	1	< 0,0001
		M	12,76	12,09	0,9	1	0,0046
<b>Otavalo</b>	2015	H	40,62	20,40	0,59	1	< 0,0001
		D	27,26	20,40	0,6887	1	< 0,0001
		M	21,59	20,40	0,761	1	0,0009
<b>Palesema - San Lorenzo</b>	2015	H	33,85	4,12	0,593	1	0,0061
		<b>D</b>	10,25	4,12	0,8343	0	0,0737
		<b>M</b>	5,00	4,12	0,9154	0	0,1862
<b>Pedernales</b>	2015	H	32,73	14,93	0,6857	1	< 0,0001
		D	17,49	14,93	0,8949	1	< 0,0001
		M	15,38	14,93	0,9588	1	0,0468
<b>Pichilingue</b>	2015	<b>H</b>	34,88	6,19	0,687	0	0,0764
		<b>D</b>	13,28	6,19	0,8957	0	0,8935
		<b>M</b>	6,31	6,19	0,9988	0	0,9762
<b>Puyo</b>	2015	<b>H</b>	41,41	7,18	0,5826	0	0,295
		<b>D</b>	12,45	7,18	0,8704	0	0,6725
		<b>M</b>	7,18	7,18		0	0,289
<b>Querochaca</b>	2015	H	37,27	6,13	0,5389	1	< 0,0001
		<b>D</b>	16,63	6,16	0,7917	0	0,2663
		<b>M</b>	8,06	6,16	0,9867	0	0,3744
<b>Quinindé</b>	2015	H	35,61	6,83	0,5876	1	< 0,0001
		D	12,55	6,83	0,8709	1	0,004
		<b>M</b>	7,29	6,83	0,9848	0	0,4333
	2015	H	30,26	5,61	0,6205	1	< 0,0001

<b>Riobamba - ESPOCH</b>		<b>D</b>	11,33	5,61	0,8192	1	0,01
		<b>M</b>	5,98	5,61	0,9577	0	0,4333
<b>Rumipamba</b>	2015	<b>H</b>	30,66	0,79	0,6367	1	< 0,0001
		<b>D</b>	8,58	0,79	0,9125	0	0,9689
		<b>M</b>	2,00	0,79	0,9519	0	0,9913
<b>Tena - Hda, Chaupishungo</b>	2015	<b>H</b>	38,29	3,68	0,5916	1	< 0,0001
		<b>D</b>	12,01	3,68	0,89	0	0,3275
		<b>M</b>	4,87	3,68	0,9658	0	0,0656
<b>La Teodómira</b>	2015	<b>H</b>	32,44	-1,86	0,6624	1	< 0,0001
		<b>D</b>	9,78	-1,86	0,8723	0	0,7487
		<b>M</b>	3,47	-1,86	0,9807	0	0,9575
<b>La Tola</b>	2015	<b>H</b>	31,30	0,48	0,6117	1	0,0003
		<b>D</b>	8,69	0,48	0,8875	0	0,8462
		<b>M</b>	2,02	0,48	0,9807	0	0,9913
<b>Tomalón</b>	2015	<b>H</b>	31,68	-1,95	0,6106	1	0,005
		<b>D</b>	11,92	-1,95	0,8174	0	0,5399
		<b>M</b>	4,07	-1,95	0,9482	0	0,4333

(Fuente: Propia)

## ANEXO V.

### DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

La facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional cuenta con una estación meteorológica automática, la cual es manejada por el Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética (LEAEE). Este laboratorio fue instaurado en el año 2002 y se ha equipado planificadamente permitiendo que en el año 2010 se realicen ensayos a colectores solares térmicos según normas UNE-EN 12976 – 1 y 2 – 2006 para la empresa Acqua Corphitec [57]. El laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética tiene por misión la de adaptar modelos o prototipos para desarrollar energías alternativas que permitan disminuir la dependencia de los derivados del petróleo como fuente de energía, así como también acciones sobre eficiencia energética mediante asistencia técnica, auditorías, entre otras; e impartir prácticas de laboratorio que refuercen los conocimientos impartidos en el ámbito que compete al Laboratorio. El LEAEE cuenta con la página web *filesky.net*, en la cual se dan a conocer más datos de interés de este laboratorio. En la figura V.1. se indica la portada de la página web mencionada anteriormente.



Figura V. 1. Página web del Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética de la EPN.

(Fuente: [57])

En el año 2010 el LEAEE adquirió los equipos necesarios para implementar una estación meteorológica automática, la cual se encuentra ubicada en la terraza de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Las variables físicas registradas en esta estación son velocidad de viento, temperatura, humedad relativa y radiación solar.

Esta estación meteorológica cuenta con un piranómetro de primera clase LSI-LASTEM DPA153 para medir la radiación solar global ( $W/m^2$ ), un anemómetro LSI-LASTEM DNA001 para medir la velocidad del viento ( $m/s$ ) y un termohigrómetro LSI-LASTEM DMA672.1 para medir la temperatura ( $^{\circ}C$ ) y humedad relativa (%) [58]. La estación meteorológica cuenta con un data logger LSI-LASTEM ELO105, cuya función es la de registrar las mediciones de los sensores conectados a él. En la figura V.2. se aprecian los equipos de la estación meteorológica automática del LEAEE.



(a)



(b)



(c)



(d)

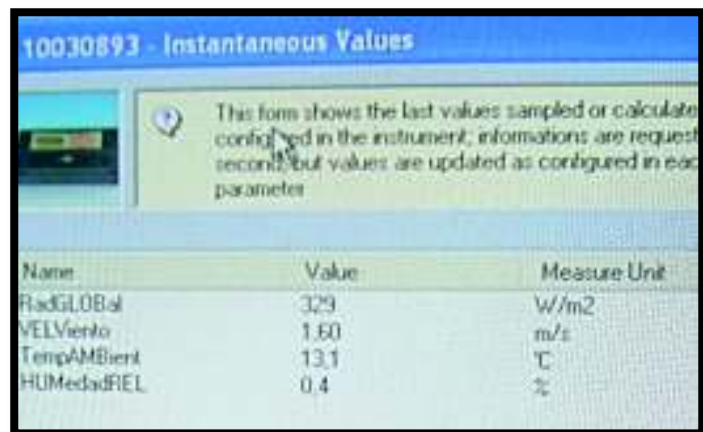
Figura V. 2. Estación meteorológica del LEAEE. (a) Anemómetro, (b) termohigrómetro, (c) piranómetro y (d) data logger.  
(Fuente: Propia y (c) [58])



Los datos se manejan y administran con el software proporcionado por LSI compatible con el data logger. Mediante este paquete computacional es posible recolectar los datos del data logger y visualizar las mediciones en tiempo real tomadas por los sensores, como lo muestra la figura V.3.



(a)



10030893 - Instantaneous Values

This form shows the last values sampled or calculated configured in the instrument; informations are requested second, but values are updated as configured in each parameter

Name	Value	Measure Unit
RadGLOBAL	329	W/m2
VELViento	1.60	m/s
TempAMBIent	13.1	°C
HUMedadREL	0.4	%

(b)

Figura V. 3. (a) Computador utilizado para la manejar y administrar los datos y (b) mediciones en tiempo real de los sensores.  
(Fuente: Propia)