



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA DE FÍSICA

**DETERMINACIÓN DE ZONAS DE MAYOR
POTENCIAL SOLAR USANDO EL MODELO GLOBAL
SYSTEM ADVISOR MODEL (SAM), EN LA PROVINCIA DE
CHIMBORAZO.**

Trabajo de Titulación

Tipo: Trabajo de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

FÍSICA

AUTORA: VIVIANA ARACELI FLORES GUANANGA

Riobamba – Ecuador

2024



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA DE FÍSICA

**DETERMINACIÓN DE ZONAS DE MAYOR
POTENCIAL SOLAR USANDO EL MODELO GLOBAL
SYSTEM ADVISOR MODEL (SAM), EN LA PROVINCIA DE
CHIMBORAZO.**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

FÍSICA

AUTORA: VIVIANA ARACELI FLORES GUANANGA

DIRECTOR: Dr. ARQUÍMIDES HARO VELASTEGUI

Riobamba – Ecuador

2024

2024, Viviana Araceli Flores Guananga

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Viviana Araceli Flores Guananga, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autora, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.




Riobamba ,7 de junio del 2024

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Viviana Flores', with a large, stylized flourish above the name.

Viviana Araceli Flores Guananga
0250172558

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA FÍSICA

El Tribunal de Trabajo de Integración Curricular certifica que: Trabajo de Integración Curricular:
Tipo: Proyecto de Investigación, **“DETERMINACIÓN DE ZONAS DE MAYOR POTENCIAL SOLAR USANDO EL MODELO GLOBAL SYSTEM ADVISOR MODEL (SAM), EN LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO.”**, realizado por la señorita: **VIVIANA ARACELI FLORES GUANANGA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Biof. Diana Carolina Coello Fiallos PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		24-06-07
Dr. Arquímides Haro Velastegui DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		24-06-07
Dr. Celso Recalde Moreno ASESOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		24-06-07

DEDICATORIA

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, por brindarme la fuerza y la sabiduría durante mi trayectoria académica. Posteriormente, a mis padres, Anita Guananga y Vicente Flores, por su apoyo y esfuerzo para brindarme la oportunidad de alcanzar un logro más en mi vida. A mis amistades, por su ánimo, y solidaridad en los momentos difíciles. Y finalmente pero no menos importante, a cada una de las personas que han sido parte de mi viaje académico, por sus enseñanzas, orientación y contribución a mi formación como profesional. Esta tesis está dedicada a ustedes, con todo mi cariño y gratitud.

Viviana

AGRADECIMIENTO

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo: Al Grupo de Energías Alternativas y Ambiente GEAA-ESPOCH por el apoyo brindado en la realización del trabajo investigativo y de manera especial al Dr. Arquímedes Haro Velastegui y al Dr. Celso Recalde por su valiosa colaboración y asesoramiento en la dirección de la presente Tesis.

Viviana

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	X
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 <i>Objetivo General:</i>	3
1.2.2 <i>Objetivos Específicos:</i>	3
1.3 Justificación.....	3
1.4 Hipótesis pregunta de investigación (Descriptiva).....	4

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Radiación solar	5
2.2 Constante solar	6
2.3 Espectro solar.....	6
2.4 Declinación solar	6
2.5 Posición solar.....	7
2.5.1 <i>Diferencia entre Irradiancia e Irradiación:</i>	8
2.5.2 <i>Componentes de la irradiación global horizontal:</i>	8
2.5.2.1 <i>Irradiación difusa horizontal:</i>	9
2.5.2.2 <i>Irradiación directa normal</i>	9
2.5.2.3 <i>Albedo</i>	9
2.6 Ciclo solar	10
2.7 Energía promedio anual.....	10
2.8 National Renewable Energy Laboratory (NREL)	10

2.9	System Advisor Model (SAM)	10
2.10	National Solar Radiation Database (NSRDB)	11
2.10.1	<i>Fundamentos físicos incorporados en NSRDB</i>	11
2.10.2	<i>Physical Model Solar (PMS)</i>	11
2.10.2.1	<i>El modelo FARMS</i>	12
2.10.2.2	<i>El modelo REST2 (Evaluación de Referencia de Transmitancia Solar, 2 bandas)</i> ...	16

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	18
3.1	Tipo de Investigación	18
3.1.1	<i>Diseño de la investigación</i>	18
3.1.2	<i>Localización del Estudio</i>	18
3.1.3	<i>Población de estudio</i>	18
3.1.4	<i>Tamaño de la muestra</i>	19
3.1.5	<i>Método de muestreo</i>	19
3.1.6	<i>Técnicas de recolección de datos</i>	19
3.1.7	<i>Metodología</i>	19

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	21
4.1	Procesamiento, análisis e interpretación de resultados	21
4.1.1	<i>Establecimiento de zonas de estudio</i>	21
4.2	Correlación entre DNI Vs altitud de puntos satelitales a nivel de provincia	28
4.2.1	<i>Identificación de zonas de alto potencial solar</i>	29
4.2.2	<i>Descripción de variables meteorológicas de las zonas de alto potencial solar</i>	31

CAPÍTULO V

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
5.1	Conclusiones	38
5.2	Recomendaciones:	38

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1 Ubicación de las estaciones meteorológicas en estudio.....	22
Tabla 4-2 Punto satelital (NSRDB) cercano a cada estación meteorológica de la provincia de Chimborazo	23
Tabla 4-3 Correlación entre el GHI de las estaciones meteorológicas analizadas y el DNI de su punto cercano	23
Tabla 4-4 Escala de valores promedio de 6 años DNI disponible en cada zona de la provincia de Chimborazo	30
Tabla 4-5 Zona de alto potencial solar de DNI de la provincia de Chimborazo	30
Tabla 4-6 Valores promedios de temperatura anual por horas disponibles de sol (7am -6pm) de las zonas de alto potencial solar.	36
Tabla 4-7 Valores promedios de velocidad del viento anual por horas disponibles de sol (7am - 6pm) de las zonas de alto potencial solar	36
Tabla 4-8 Valores promedios de velocidad del viento anual por horas disponibles de sol (7am - 6pm) de las zonas de alto potencial solar	37

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1 Distribución de la irradiancia hasta llegar a la superficie terrestre.	5
Ilustración 2-2 Distribución espectral solar en función de la longitud de onda	6
Ilustración 2-3 Angulo azimut, cenital y altura	7
Ilustración 2-4 Relación entre irradiancia e irradiación	8
Ilustración 2-5 Procesos solares	9
Ilustración 2-6 Modelo Físico Solar empleado para modelar datos de NSRDB	12
Ilustración 2-7: Las transmitancias de las nubes se pueden expresar como funciones exponenciales del espesor óptico de la nube y del ángulo solar cenital.	13
Ilustración 2-8 FARMS-DNI.....	14
Ilustración 2-9 Procesos del modelo FARMS para obtención de componentes de radiación solar	15
Ilustración 3-1 Metodología empleada para determinar zonas de alto potencial solar en la Provincia de Chimborazo	20
Ilustración 4-1 Ubicación de los puntos cercanos a las estaciones meteorológicas de la Provincia de Chimborazo donde los puntos azules son medidas satelitales y los puntos verdes corresponde a las estaciones.....	21
Ilustración 4-2 Tendencias entre los valores promedio de DNI del punto 29 satelital y el GHI de la estación Urbina.....	24
Ilustración 4-3 Tendencias entre los valores promedio de DNI del punto 152 satelital y el GHI de la estación Tunshi	24
Ilustración 4-4 Tendencias entre los valores promedios mensuales de DNI del punto 378 satelital y el GHI de la estación Tixán.....	25
Ilustración 4-5 Tendencias entre los valores promedio de DNI del punto 96 satelital y el GHI de la estación San Juan.....	25
Ilustración 4-6 Tendencias entre los valores promedio de DNI del punto 118 satelital y el GHI de la estación de Quimiag	25

Ilustración 4-7 Tendencias entre los valores promedios mensuales de DNI del punto 350 satelital y el GHI de la estación Multitud	26
Ilustración 4-8 Tendencias entre los valores promedio de DNI del punto 69 satelital y el GHI de la estación Matus	26
Ilustración 4-9 Tendencias entre los valores promedio de DNI del punto 116 satelital y el GHI de la estación Espoch	26
Ilustración 4-10 Tendencias entre los valores promedio de DNI del punto 390 satelital y el GHI de la estación Cumandá.....	27
Ilustración 4-11 Tendencias entre los valores promedio de DNI del punto 406 satelital y el GHI de la estación Atillo.....	27
Ilustración 4-12 Tendencias entre los valores promedio de DNI del punto 228 satelital y el GHI de la estación Alao	27
Ilustración 4-13 Correlación entre la radiación normal directa (DNI) en función de la altitud de los 403 puntos que se encuentran dentro del perfil de la provincia de Chimborazo	28
Ilustración 4-14 Mapa de irradiación solar directa promedio de 2014 a 2020	29
Ilustración 4-15 Temperatura promedio diario anual en la zona de:a)Espoch ,b)Tixán,c)Tunshi y d)Quimiag.....	32
Ilustración 4-16 Velocidad del viento promedio diario anual en la zona de a)Espoch ,b)Tixan,c)Tunshi y d)Quimiag.....	33
Ilustración 4-17 Humedad relativa promedio diario anual en la zona de a)Espoch ,b)Tixan,c)Tunshi y d)Quimiag.....	35

RESUMEN

Para la implementación de plantas termo solares a futuro dentro de la provincia de Chimborazo, no había contado con estudios detallados sobre dichas zonas aprovechables, en términos de irradiación normal directa (DNI). Esta investigación tuvo como objetivo identificar áreas de mayor potencial solar en la provincia de Chimborazo, mediante el Modelo Asesor del Sistema (SAM). La metodología empleada fue de enfoque cuantitativo, y diseño no experimental de tipo transversal, ya que se describió la cantidad de irradiación directa normal (DNI) en un periodo determinado de tiempo de 6 años (2014 a 2020); la población en estudio fue la provincia por lo que se consideró la zona cercana (aproximadamente <2km) a sus estaciones meteorológicas terrestres instaladas, y a su vez se utilizó la base de datos nacional de radiación solar (NSRDB) donde se utilizó estadística descriptiva para correlacionar y validar variables de irradiación global horizontal (GHI) (provenientes de datos terrestres) e irradiación directa normal (DNI) (provenientes de datos satelitales) posteriormente dichos datos se simuló en el Modelo Asesor del Sistema (SAM). Mediante esta metodología, se determinaron que las áreas con mayor potencial solar con una irradiación directa superior a 3.5 kWh/m²/día fueron las zonas cercanas a las estaciones de Tunshi, Tixán, Espoch y Quimiag. En este contexto se concluyó que las zonas con mayor potencial solar fueron Tunshi, Espoch, Tixán y Quimiag además se describió sus respectivas condiciones meteorológicas así a mayor altura, mayor es la radiación solar directa recibida en dichas zonas, no obstante, también influyen factores meteorológicos como la velocidad del viento, temperatura y humedad relativa con variaciones leves en sus tendencias durante el periodo de 6 años.

Palabras clave: <SAM>, <CONDICIONES METEOROLÓGICAS>, <MAYOR POTENCIAL SOLAR>, <CHIMBORAZO (PROVINCIA)>, <IRRADIACIÓN DIRECTA NORMAL (DNI)>



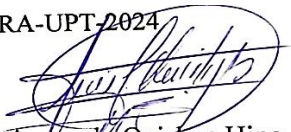
0938-DBRA-UPT-2024

ABSTRACT

For the implementation of solar thermal plants in the future within the province of Chimborazo. There had not been detailed studies on these usable areas, in terms of direct normal irradiation (DNI). This research aimed to identify areas of greatest solar potential in the province of Chimborazo, using the System Advisor Model (SAM). The methodology used was a quantitative approach, and a non-experimental cross-sectional design, since the amount of direct normal irradiation (DNI) was described in a specific period of time of 6 years (2014 to 2020); the study population was province, so the area close (approximately <2km) to its installed terrestrial meteorological stations was considered, and in turn the national solar radiation database (NSRDB) was used where descriptive statistics were used to correlate and validate global irradiation variables horizontal (GHI) (from terrestrial data) and direct normal irradiation (DNI) (from satellite data) subsequently said data was simulated in the System Advisor Model (SAM). Using this methodology, it was determined that the areas with the highest solar potential with direct irradiation greater than 3.5 kWh/m²/day were the areas near the Tunshi, Tixán, Epoch and Quimiag stations. In this context, it was concluded that the areas with the greatest solar potential were Tunshi, Epoch, Tixán and Quimiag. Their respective meteorological conditions were also described, thus, the higher the altitude, the greater the direct solar radiation received in these areas. However, they also influence meteorological factors such as wind speed, temperature and relative humidity with slight variations in their trends during the 6-year period.

Keywords: <SAM>, <METEOROLOGICAL CONDITIONS>, <HIGHEST SOLAR POTENTIAL>, <CHIMBORAZO (PROVINCE)>, <NORMAL DIRECT IRRADIATION (DNI)>

0938-DBRA-UPT-2024



Lic. Luis Armando Quishpe Hipo, Mgs.

C.I.0102801016

DOCENTE INGLES CARRERA DE FISICA

INTRODUCCIÓN

La energía solar se ha convertido en una de las alternativas más prometedoras para la generación de electricidad limpia y renovable en todo el mundo. Para aprovechar eficazmente este recurso, es fundamental identificar y evaluar las zonas con mayor potencial solar. En este contexto, la irradiación directa normal (DNI) es un parámetro clave para determinar el potencial solar de una región especialmente cuando se planea implementar plantas de energía solar de concentración (CSP) a futuro. Esto debido a que las zonas establecidas indicaran condiciones de cielo despejado. Para que una zona se considere de alto potencial solar, se recomienda un valor mínimo de DNI de 1800 kWh/m²/año (≥ 3.5 kWh/m²/día). Las plantas CSP funcionan mejor en áreas con un DNI de 2000 kWh/m²/año o más (Miranda de Assis Matheus, 2020).

En este estudio de investigación se identificó áreas de mayor potencial solar en la provincia de Chimborazo evaluando los datos satelitales que calculan el DNI. Mediante el software *Advisor Model* (SAM) se descargó y simuló variables meteorológicas dentro de un periodo de 6 años. Los resultados de este estudio contribuirán para futuros proyectos de implementación de plantas de energía solar de concentración (CSP).

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

A nivel mundial, la Agencia Internacional de Energía destaca la necesidad de llevar a cabo una evaluación extensa y continua de fuentes de energía renovable como la solar, eólica, hidroeléctrica, entre otras, con el fin de alcanzar los objetivos establecidos en el Acuerdo de París sobre cambio climático (Garín, 2019, pág. 225). Esta urgencia subraya la importancia de identificar zonas con potencial energético para impulsar la transición hacia un sistema energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

En Ecuador, según el estudio de (Ordoñez et al., 2019) Se compararon las mediciones de irradiación horizontal global (GHI) de 54 estaciones distribuidas en el país, con datos estimados por satélite del NSRDB (NREL) y validados con estaciones terrestres distribuidos por el país. Para ello, se utilizaron indicadores estadísticos de dispersión (RMSE y MBE) y bondad de ajuste (prueba KS). Los datos se agruparon por tiempo (hora, día, semana y mes) y por condición de aislamiento (claro y cielo nublado). Posteriormente, se excluyeron del estudio 12 estaciones terrestres porque presentaron malos comportamientos debido al bajo cumplimiento de los protocolos de mantenimiento y limpieza. (pág. 162)

En la provincia de Chimborazo, se han realizado estudios similares como el estudio de (Ramos y Pérez, 2014, págs. 35-36) donde se ha estimado la radiación solar para la provincia de Chimborazo utilizando modelos teóricos como el modelo físico Bristow-Campbell en función de la heliofanía, temperatura y velocidad del viento mediante datos de estaciones terrestres de la provincia donde revela que en septiembre es el mes más brillante con un promedio de 6,1 kWh, mientras que marzo destaca como el mes más oscuro con 5,0 kWh.

Durante la revisión bibliográfica, se evidenció escasos estudios para obtener el potencial solar analizando específicamente DNI, al utilizarlas únicamente de estaciones meteorológicas terrestres. El problema incide en que, si los datos de radiación solar de las estaciones son incorrectos (Righini, y Aristegui, 2016, pág. 73), la evaluación del potencial solar en una región será imprecisa, lo que puede llevar a sobreestimar o subestimar la cantidad de energía solar disponible. Por lo que, se destaca la importancia de mejorar la calidad de las evaluaciones de recursos y las previsiones solares mediante fuentes confiables y una mejor distribución geográfica de las estaciones de medición solar.

La energía solar se ha convertido en una de las alternativas más prometedoras para la generación de electricidad limpia y renovable en todo el mundo. Para aprovechar eficazmente este recurso, es fundamental evaluar la cantidad de radiación solar disponible en diferentes zonas. En este contexto, la irradiación directa normal (DNI) es un parámetro clave para determinar el potencial solar de una región especialmente cuando se planea implementar a futuro plantas de energía solar de concentración (CSP). Mediante la base de datos en lugar de depender únicamente de los datos de radiación solar de las estaciones meteorológicas de la provincia.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo General:*

Determinar de zonas de mayor potencial solar mediante el modelo *System Advisor Model* (SAM), en la provincia de Chimborazo.

1.2.2 *Objetivos Específicos:*

- Identificar los factores que influyen en la radiación solar de la provincia de Chimborazo mediante el estudio del arte del mismo
- Analizar el potencial de radiación solar a partir de los datos satelitales proporcionados, en el Modelo *System Advisor Model* (SAM),
- Describir las condiciones físicas y meteorológicas adecuadas en las zonas con alto potencial solar para considerarlas como alternativa energética en la provincia de Chimborazo.

1.3 Justificación.

Desde una perspectiva descriptiva, se emplean datos satelitales de radiación solar de DNI ya que el Ecuador al estar situado geográficamente en latitud 0° los rayos de sol penetran a la atmósfera perpendicularmente concentrándose en un área más pequeña, Por lo tanto, hay mayor cantidad de radiación solar; así la irradiación solar directa normal (DNI) anual sobre el Ecuador varía desde $0.9 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \text{ día}$ a $6.0 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \text{ día}$. Por lo que de manera general sugieren un valor de $3.5 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \text{ día}$ (Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018, págs. 1154-1165) como un valor umbral para proyectos de concentración solar debido a la eficiencia de los equipos.

Se seleccionó la provincia de Chimborazo para el presente estudio, debido a que cuenta con una geografía accidentada, con un alto gradiente de altitud por la orografía del territorio, al asentar el Valle Interandino entre la Cordillera Occidental y Oriental. Así, los factores atmosféricos que favorecen la radiación solar en la provincia son la temperatura, altitud, humedad relativa,

velocidad del viento y nubosidad. Según lo manifiesta (Muñoz et al.,2016) La potencia media mensual de radiación solar en la provincia de Chimborazo es de aproximadamente 500 a 600 $\frac{W}{m^2}$, este valor genera expectativas sobre el potencial de producción energética a partir de la energía solar en la región. (pág. 380)

Por otra parte, la ventaja de las mediciones satelitales de NSRDB es que puede medir las variables meteorológicas sin ningún problema distancias de 4 km entre cada uno de los puntos que consta la región llegando a obtener hasta de 5% a 15% de sesgo en sus mediciones lo cual es considerado como una medida aceptable (Gulich UNC-CONAE,2024 pág. 33). A su vez los datos de radiación solar, son introducidos en la ecuación de transferencia radioactiva como el modelo de radiación solar de cielo despejado REST2, y el modelo FARMS para modelar DNI, DHI, y GHI. (NREL Learning,2022) lo que permite analizar las condiciones atmosféricas con mayor precisión

El presente estudio tiene viabilidad dentro del campo de las energías renovables para implementar a futuro proyectos energéticos de concentración solar

1.4 Hipótesis pregunta de investigación (Descriptiva)

¿Cuáles son las zonas de la provincia de Chimborazo con mayor potencial solar, determinadas mediante el modelo *System Advisor Model* (SAM)?

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Radiación solar

La radiación solar, es la energía emitida por el Sol en forma de ondas electromagnéticas que se propagan en todas direcciones, la misma es fuente principal para generar electricidad mediante paneles solares. Esta radiación electromagnética se divide, en longitud de onda corta y larga. La radiación solar de onda corta, proveniente del Sol, se encuentra en el rango espectral de 290-4000 nm y es absorbida parcialmente en la atmósfera y en la superficie terrestre. Por otro lado, la radiación de onda larga, conocida como radiación terrestre, se sitúa en el rango espectral de 4000 a 100 000 nm y es emitida por la atmósfera y la superficie terrestre. En otras palabras, la radiación solar de onda corta es la energía proveniente del Sol que llega a la Tierra, mientras que la radiación de onda larga es la energía emitida por la Tierra de vuelta al espacio.

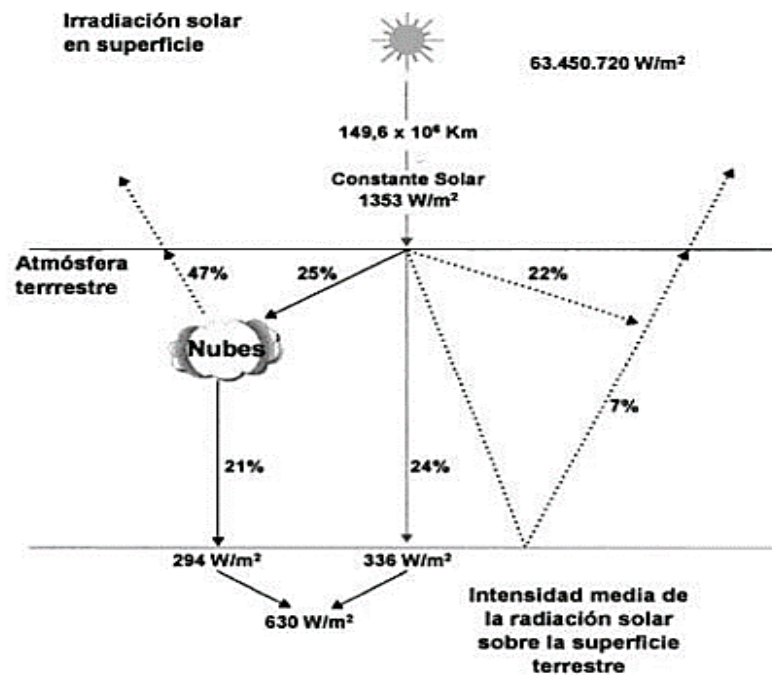


Ilustración 2-1 Distribución de la irradiancia hasta llegar a la superficie terrestre.

Fuente: Méndez y Cuervo, 2007, pág. 33-34

2.2 Constante solar

Es la cantidad de radiación solar que emite el sol desde el espacio hasta el primer contacto con la tierra, es una cantidad constante debido a que no existe perdidas en el vacío, con un valor de $1367 \frac{W}{m^2}$ y un error estimado del 1.5%. Se lo denota como G_{sc} . (Duffie y Beckman, 2013, pág. 20)

2.3 Espectro solar

La mayoría de haces solares traspasa la atmósfera en forma de luz visible (50%) con una irradiación aproximadamente de $640 \frac{W}{m^2}$, infrarroja(47%) con una irradiación aproximadamente de $618 \frac{W}{m^2}$, seguida de la radiación ultravioleta (3%) con una irradiación aproximadamente de $95 \frac{W}{m^2}$ (Meinel y Meinel,1982, pág.41).Estas aproximaciones son valores promedios que pueden variar dependiendo de la ubicación geográfica, la posición del sol ,latitud, hora del día, época del año y las condiciones climáticas entre la más principal la temperatura Asi la descomposición de esta radiación origina el espectro solar como se observa en la ilustración 2-2

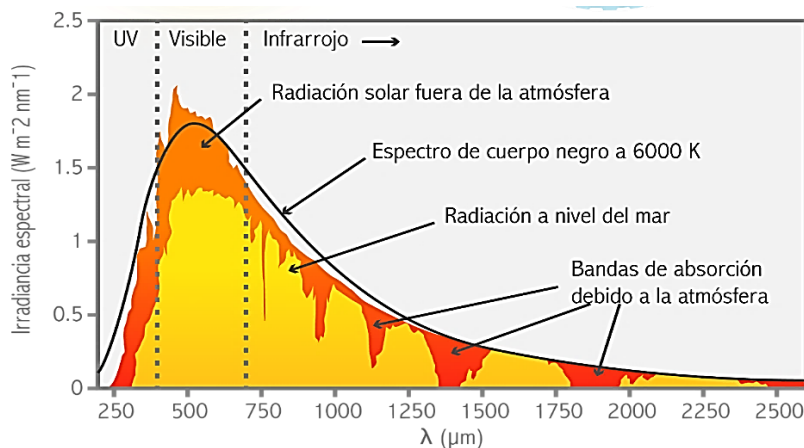


Ilustración 2-2 Distribución espectral solar en función de la longitud de onda

Fuente: Dornelles A. et al,2011, pág. 18

2.4 Declinación solar

El plano de la órbita de la Tierra alrededor del Sol es conocido como plano de la eclíptica. La Tierra a su vez rota sobre sí misma alrededor del eje polar, que forma 23.5° con la perpendicular al plano de la eclíptica durante todo el año. La rotación de la Tierra alrededor de su eje produce cambios diurnos en la radiación. La posición del eje con relación al Sol produce cambios estacionales en la radiación solar. El ángulo formado por la línea que une los centros del Sol y la Tierra y el plano ecuatorial cambia constantemente. Este ángulo se llama declinación solar.

La declinación alcanza un máximo de $23,45^\circ$ en 22 de junio (solsticio de verano en el hemisferio norte) y un mínimo de $-23,45^\circ$ el 22 de diciembre (solsticio de invierno en el hemisferio norte).

2.5 Posición solar

Para poder calcular la radiación solar que alcanza una superficie horizontal es necesario conocer la relación existente entre la posición solar y las coordenadas de la superficie sobre la Tierra:

El ángulo cenital es el ángulo entre el cenit local y la línea que une el observador y el Sol. Es un ángulo entre 0° y 90° .

El acimut solar es el ángulo en el cenit solar entre el plano del meridiano del observador y el plano del círculo máximo que pasa a través del cenit y del Sol.

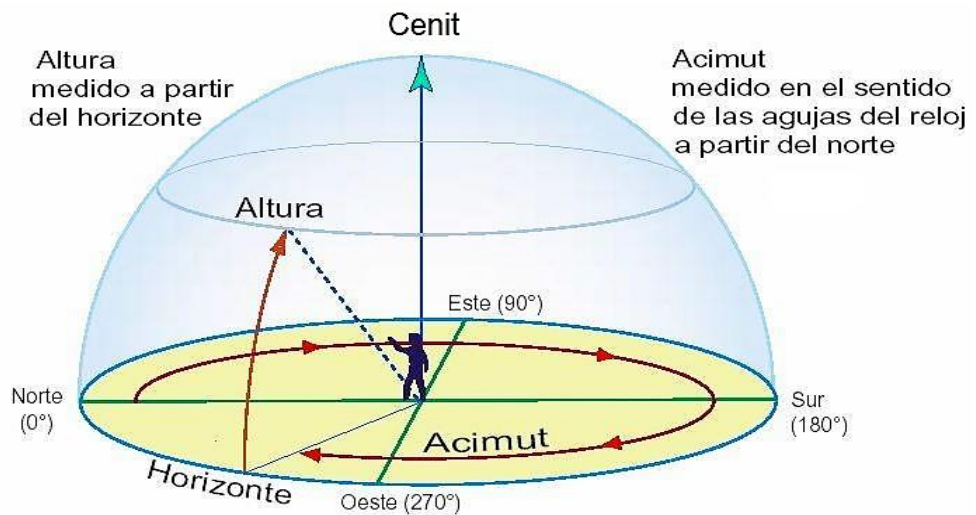


Ilustración 2-3 Ángulo azimut, cenital y altura

Fuente: ASTRO,2020

La relación matemática entre el Sol y una superficie horizontal viene dada por:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (1)$$

$$\cos \psi = \frac{\cos \theta \sin \varphi - \sin \delta}{\sin \theta \cos \varphi} \quad (2)$$

$$\omega = (t - 12) + g + \tau \quad (3)$$

Donde

θ denota el ángulo cenital solar, ψ el ángulo acimutal, φ la latitud geográfica, δ la declinación del Sol, y ω el ángulo horario. τ es la diferencia entre la longitud local y el meridiano de referencia de la zona horaria. La ecuación del tiempo viene indicada por g , y t es la hora local

2.5.1 Diferencia entre Irradiancia e Irradiación:

Para medir la radiación solar que incide sobre una superficie se utiliza la expresión “irradiación” o “irradiancia” por lo tanto:

La irradiancia se refiere a la densidad de potencia en unidades $\frac{W}{m^2}$ o $\frac{KW}{m^2}$ por lo que se mide instantáneamente, esto describe la potencia incidente por unidad de superficie

La irradiancia posee un valor distinto para cada instante del día

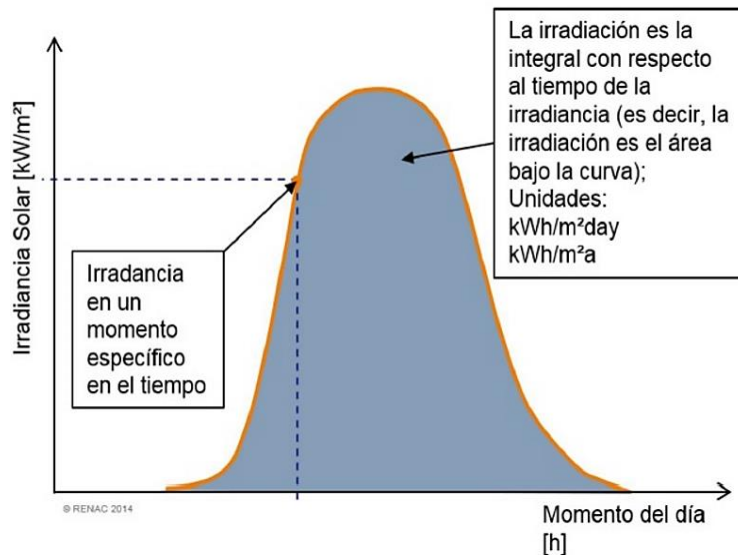


Ilustración 2-4 Relación entre irradiancia e irradiación

Fuente: Correa,2022

En cambio, la irradiación o también conocida como insolación se refiere la densidad de energía en un tiempo determinado en unidades $\frac{Wh}{m^2}$ o $\frac{kWh}{m^2}$ esta última unidad es conveniente para sistemas fotovoltaicos por lo que se mide en valores integrados en un periodo de tiempo así, geoméricamente la irradiancia es el área bajo la curva de la irradiación. En otras palabras, es la cantidad de irradiación global acumulada en un punto geográfico dado durante un tiempo determinado (día, mes, año) y sobre una superficie conocida

2.5.2 Componentes de la irradiación global horizontal:

Por sus siglas en inglés *Global Horizontal Irradiation* (GHI). Esta irradiación aparece luego de los procesos de absorción, reflexión y dispersión al atravesar la atmósfera, la radiación que llega a la superficie terrestre se conoce como radiación global está compuesta por la suma de la irradiación difusa horizontal y la irradiación directa normal y albedo

De forma técnica se puede considerar que:

$$GHI = DNI + DHICos(z) \quad (4)$$

Donde z es el ángulo cenital

La presencia de nubes incrementa la absorción, reflexión y dispersión de la radiación solar. Los componentes que componen la cantidad de radiación tanto extraterrestres como terrestre son longitudes de ondas largas y cortas, radiación difusa, radiación reflejada, radiación del haz (Duffie y Beckman, 2013, pág.44), tal cual se muestra en la Ilustración 2-5. Tomando en consideración que la radiación de onda corta está simbolizada con una flecha continua mientras que la radiación de onda larga con una flecha ondulada:

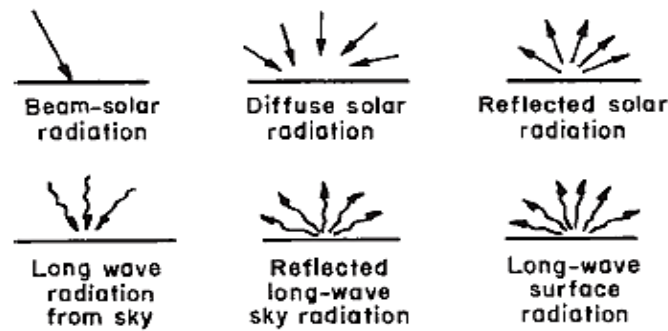


Ilustración 2-5 Procesos solares

Fuente: Duffie & Beckman, 2013, pág.44

2.5.2.1 Irradiación difusa horizontal:

Se la conoce por sus siglas en inglés *Diffuse Horizontal Irradiation* (DHI), esta radiación se genera cuando la radiación inicial penetra en la atmósfera terrestre, una parte de la radiación completa se refleja, absorbe y/o dispersa con las nubes y componentes físicos presentes (techos, cubiertas superficies etc.). En un día nublado solo se percibe esta radiación.

2.5.2.2 Irradiación directa normal

Se la conoce por sus siglas en inglés *Direct Normal Irradiation* (DNI). Es la irradiación que recibe la superficie sin haber sufrido ningún cambio de dirección ya sea por absorción, reflexión o dispersión. A esta radiación un porcentaje promedio del 51% de la radiación directa inicial emitida por el sol hasta que llega al suelo. Esta radiación es considerada para aplicaciones fotovoltaicas. Con el ángulo cenital (z) se puede calcular la radiación directa normal:

$$DNI = (GHI - DHI) / \cos(z) \quad (5)$$

2.5.2.3 Albedo

Es porcentaje de radiación reflejada con respecto a la radiación que llega directamente a la superficie terrestre (Duffie y Beckman, 2013, pág.10).

2.6 Ciclo solar

El ciclo solar se refiere a la variación periódica en la actividad del Sol que ocurre aproximadamente cada 11 años. Durante este ciclo, la cantidad de manchas solares en la superficie del Sol varía, lo que afecta la radiación solar que llega a la Tierra.

En relación con la cantidad de radiación global difusa y normal, el ciclo solar puede influir en la cantidad total de radiación solar que llega a la superficie terrestre. Durante períodos de mayor actividad solar, con más manchas solares, la radiación solar total puede aumentar. Esto puede tener un impacto en la cantidad de radiación global difusa y normal, que son componentes de la radiación solar total que se dispersan en la atmósfera y llegan a la superficie terrestre de manera directa, respectivamente (Gómez y Doncel, 2019, pág. 5).

2.7 Energía promedio anual

El grado de abundancia del recurso solar en una zona se establece a partir de la radiación solar incidente durante un año, medida en kWh/m² (Xie, 2016, pág. 436)

$$E = \frac{1}{1000} \sum_i^{8760} R_i \quad (6)$$

Donde:

E es la energía promedio anual

R_i es la radiación para la hora i en $\frac{W}{m^2}$

2.8 National Renewable Energy Laboratory (NREL)

El Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL), con sede en Estados Unidos, se especializa en la investigación y desarrollo de fuentes de energía renovables, la optimización del uso de la energía, la integración de sistemas energéticos y la promoción del transporte sostenible. Actualmente, NREL proporciona datos meteorológicos a nivel global a través de su base de datos NSRDB (*The National Solar Radiation Database*), y su plataforma de descarga de datos *System Advisor Model* (SAM) lo cual se detallará a continuación:

2.9 System Advisor Model (SAM)

El modelo SAM proporciona modelos de rendimiento del sistema y económicos a nivel horario para una variedad de tecnologías de energía solar, incluyendo sistemas de energía solar de concentración (CSP) como los sistemas de canal parabólico, fotovoltaicos, sistemas de agua caliente solar y tecnologías de uso de combustibles genéricos. Con el fin de financiar proyectos de carácter energético a nivel mundial. Este modelo convierte DNI y datos meteorológicos en valores de energía térmica, simulando el flujo a través de los componentes del sistema

considerando diversas pérdidas, y posteriormente transforman la energía térmica en energía neta. energía eléctrica. (Xie, et al ,2023)

2.10 National Solar Radiation Database (NSRDB)

Comenzó en 1994 con la difusión de datos a partir de estaciones terrestres y luego pasó a utilizar datos satelitales desde 1998 a nivel mundial. Actualmente, los datos van de 1998 a 2022 con una resolución espacial satelital más utilizada de 4 km y resolución temporal de 30 min (NREL Learning,2022).

2.10.1 Fundamentos físicos incorporados en NSRDB

En modelos empíricos DNI mostraba un sesgo mayor que el GHI (Blanc et al. 2014, pág.565). Para abordar aquello, los modelos DNI actuales, (Vaca,2018, págs.23-25) desarrollaron un modelo basado en la física, el modelo rápido de radiación solar para aplicaciones solares con DNI (FARMS-DNI), para inferir eficientemente la radiación solar en todo el cielo en la región circunsolar. Los modelos físicos calculan la radiación solar resolviendo numéricamente la ecuación de transferencia radiativa (NREL Learning,2022). Las observaciones satelitales se utilizan para recuperar propiedades meteorológicas como la cantidad de nubes, el espesor óptico de las nubes y la fase termodinámica de las nubes

2.10.2 Physical Model Solar (PMS)

Es un modelo físico universal que analiza transferencia radiativa y balance energético apoyado en varios datos satelitales que modelan propiedades atmosféricas.

El modelo físico solar incluye satélites como GOES (datos geoestacionarios), MODIS (datos satelitales de arbitraje polar), MERRA2 (de la NASA) *Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications*, y IMS (para mapear parámetros como el albedo) (NREL Learning,2022)

Los satélites geoestacionarios están encima del Ecuador en un punto de la órbita siguiendo la órbita de la tierra que está mirando hacia la tierra y el sensor captura una imagen de diferentes bandas espectrales del espectro electromagnético y con esto podemos caracterizar diferentes procesos de la atmósfera como las nubes.

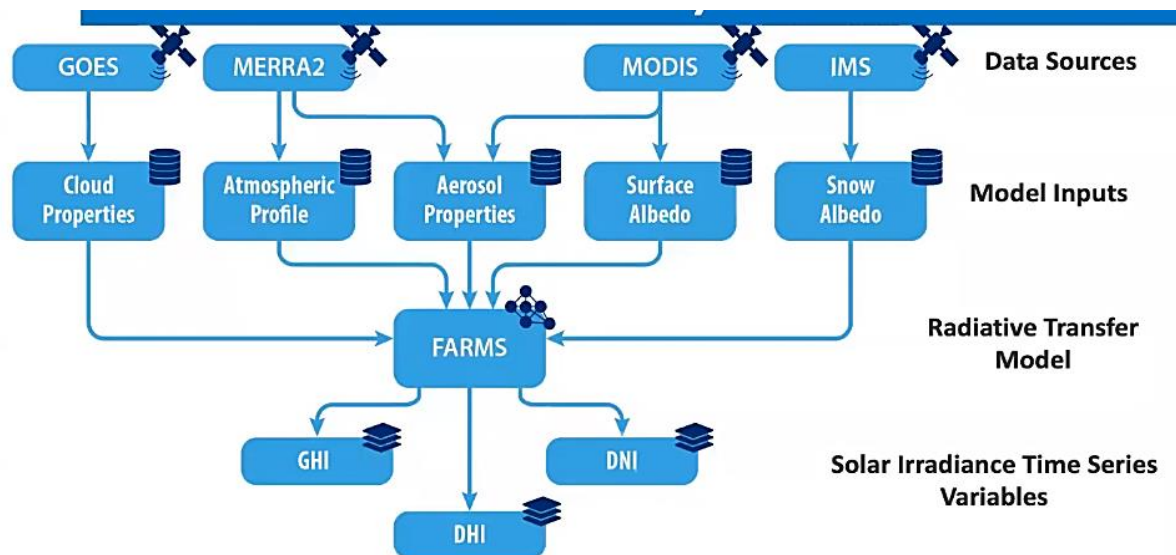


Ilustración 2-6 Modelo Físico Solar empleado para modelar datos de NSRDB

Fuente: NREL Learning. ,2022

2.10.2.1 El modelo FARMS

FARMS es un modelo eficiente de transferencia radiativa que calcula la radiación solar de banda ancha en la superficie terrestre. En condiciones de cielo despejado, emplea un modelo de transferencia radiativa en cielo despejado, como REST2 para calcular GHI y DNI. En condiciones de cielo nublado, el modelo de transferencia radiativa en cielo despejado se utiliza para calcular la transmitancia y reflectancia de la radiación solar en una atmósfera libre de nubes. Luego, el cálculo se combina con la transmitancia y reflectancia de las nubes, Al ampliar la idea detrás de FARMS y FARMS-NIT, se crea un nuevo modelo basado en la física para calcular el DNI de todo el cielo, al que hemos denominado FARMS-DNI.

A diferencia de la ley de *Beer-Bouguer-Lambert*, FARMS-DNI calcula el DNI teniendo en cuenta el efecto global de la radiación solar en el haz infinito y estrecho a lo largo de la dirección solar y la radiación dispersada cae dentro de la región circunsolar. En comparación con los modelos de descomposición, FARMS-DNI calcula numéricamente la radiación solar en ángulos sólidos diferenciales dentro de la región circunsolar y utiliza un algoritmo de integración de superficies finitas para inferir su contribución al DNI. Aunque FARMS-DNI se basa en la solución de la ecuación de transferencia radiativa, restaura la transmitancia de nubes recalculada, lo que lleva a una eficiencia significativamente mejorada en los modelos de transferencia radiativa atmosférica de última generación. La comparación con la ley de *Beer-Bouguer-Lambert* y el modelo DISC revela que FARMS-DNI ofrece una mejora notable en el cálculo del DNI en condiciones de cielo nublado. (Xie et al. 2023)

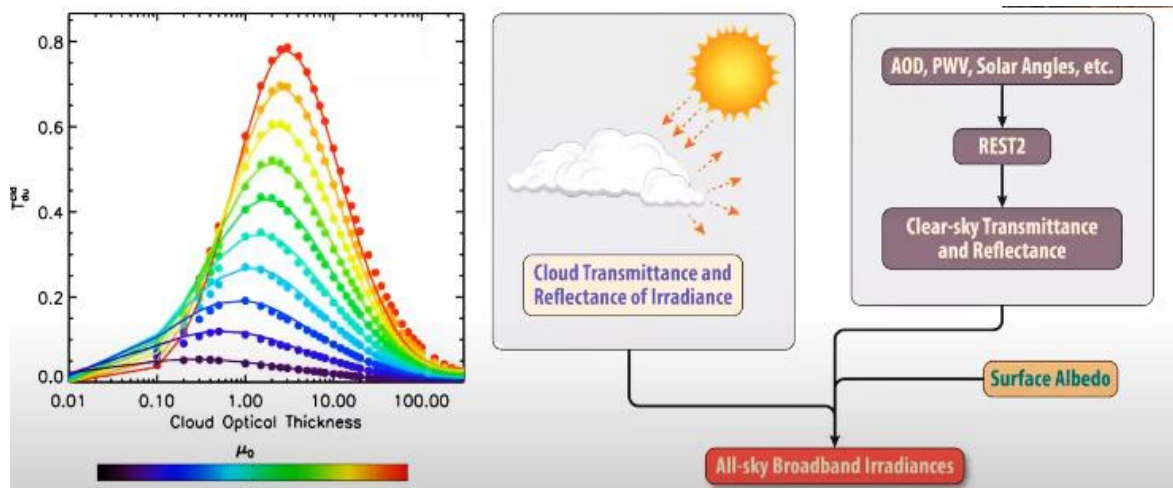


Ilustración 2-7: Las transmitancias de las nubes se pueden expresar como funciones exponenciales del espesor óptico de la nube y del ángulo solar cenital.

Fuente: NREL Learning. 2022.

Como se observa en la Ilustración 2-7, las transmitancias difusas aumentan con el espesor óptico de las nubes debido a la creciente dispersión de las nubes cuando son ópticamente delgadas. Las transmitancias difusas aumentan con el espesor óptico para valores desde 0,2 a 5 y disminuir después de eso. Las transmitancias difusas de las nubes también son sensibles al ángulo cenital solar. Cuando las nubes son muy delgadas, los ángulos cenital solares más grandes conducen a mayor T_{dd}^{cl} debido al recorrido más largo de la radiación.

Por otro lado, la corrección de paralaje se enfoca en corregir errores debidos a la posición relativa entre el observador y el objeto observado, mientras que la reasignación de sombreado implica ajustar los datos de radiación solar considerando las sombras creadas por objetos cercanos. Se considera la curvatura de la Tierra, el ángulo de visión desde el satélite, la geometría de la nube, la altitud de la nube y la posición del sol para obtener una representación más precisa del resplandor observado en la superficie. Se ha implementado un método de *Machine Learning* para predecir las propiedades de las nubes, lo que mejora la precisión y sincronización de la información sobre el sombreado de los píxeles.

Los modelos de transferencia radiativa (RT) simulan la radiación solar para cielos despejados, considerando la dispersión y absorción de la luz por la atmósfera. Estos modelos son útiles para calcular el recurso solar disponible en ubicaciones específicas y para pronósticos solares a corto

plazo. Se utilizan tanto para cielos despejados como nublados, aunque los cálculos son más complejos en este último caso.

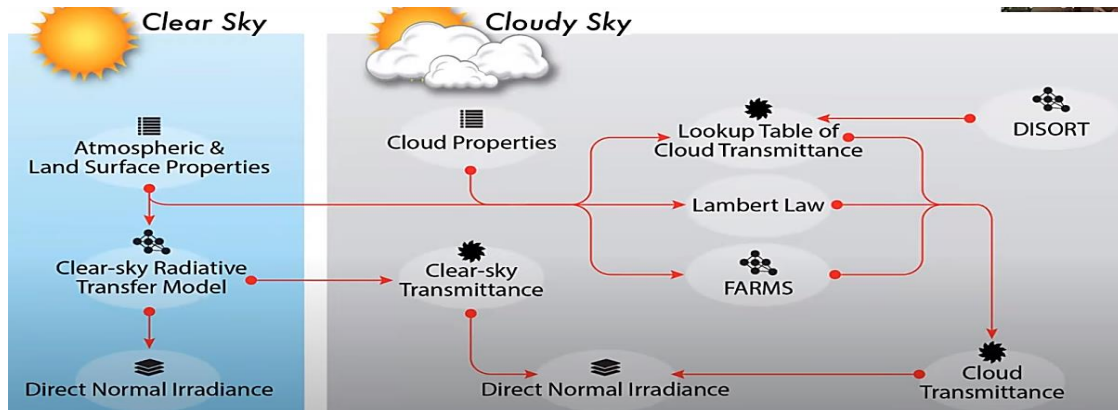


Ilustración 2-8 FARMS-DNI

Fuente: NREL Learning,2022

El modelo FARMS que es eficiente y preciso en la simulación de la irradiación solar en la superficie terrestre, con menos del 5% de incertidumbre. Utiliza modelos RT existentes para calcular la transmitancia y reflectancia de la nube, mejorando la precisión al emplear cálculos de flujos discretos en lugar de la aproximación de dos flujos. (Xie et al., 2016, pág. 436)

Así el modelo FARMS, en un cielo parcialmente nublado, la radiación solar puede estimarse utilizando la fracción de nubes y un promedio ponderado de la radiación en condiciones de nubes cubiertas. Por ejemplo, la irradiancia horizontal global (GHI) y la irradiancia normal directa (DNI) en un cielo parcialmente nublado se pueden expresar mediante las siguientes fórmulas:

$$GHI = fGHI_{cld} + (1 - f)GHI_{clr} \quad (7)$$

$$DNI = fDNI_{cld} + (1 - f)DNI_{clr} \quad (8)$$

Donde:

f fracción de nube

cld condiciones de cielo nublado

clr condiciones de cielo nublado despejado

Este es un modelo simplificado para derivar la radiación solar bajo un cielo nublado. Se supone que la dispersión y absorción de la luz por las nubes ocurre en la parte superior de la atmósfera, lo que puede llevar a incertidumbres en la simulación de la radiación solar en la superficie terrestre. Solo se considera la dispersión y absorción por las nubes dentro de la capa de nubes, mientras que la absorción por los gases atmosféricos se calcula en otras partes de la atmósfera. Bajo estos supuestos; el flujo solar directo en la dirección descendente en la superficie puede estar dado por:

$$F_d = u_0 F_0 T_{dd}^{cld} T_{dd}^{clr} \quad (9)$$

Donde:

u_0 es el coseno del ángulo cenital solar

F_0 es el flujo radiativo en el parte alta de la tamosfeara (top of athmofery)

$T_{dd}^{cl d}$ es la transmitancia de la nube para la radiación incidente directa y la radiación saliente directa después de ser dispersada por las nubes

$T_{dd}^{cl r}$ es la transmitancia de la atmósfera de cielo despejado en relación con los flujos directos incidentes y de salida.

Por lo que el DNI viene dado por:

$$DNI = \frac{F_d}{u_0} = F_0 T_{dd}^{cl d} T_{dd}^{cl r} \quad (10)$$

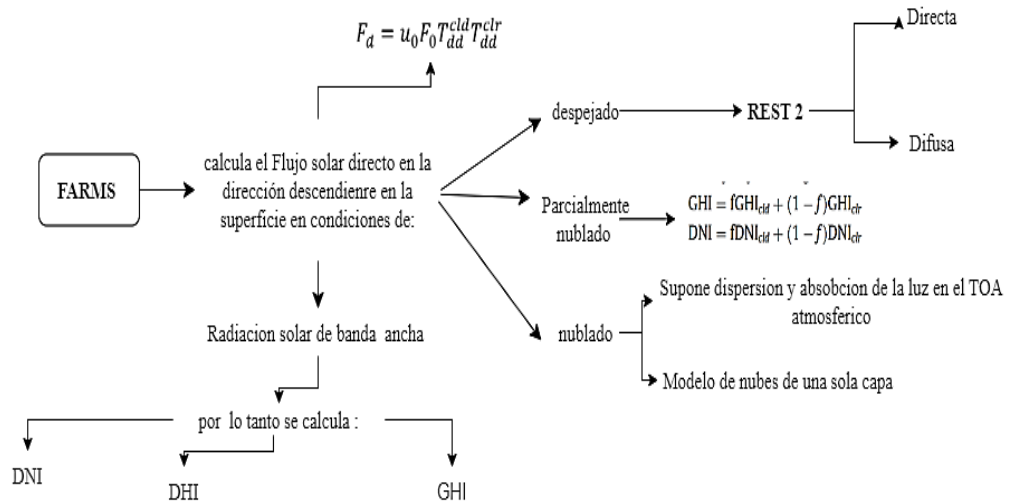
F representa el flujo radiativo en la dirección descendente. El primer carácter del subíndice indica si la radiación incidente que consideramos es directa ("d") o difusa ("u"). El segundo carácter del subíndice representa el estado de la radiación saliente después de la dispersión atmosférica. Por ejemplo, "dd" representa los flujos incidente y saliente que son ambos directos. De manera similar, el subíndice "uu" representa los flujos incidente y saliente, ambos difusos. El subíndice, "du", representa incidencia directa y salida difusa. El flujo descendente total de primer orden es:

$$F_1 = u_0 F_0 T_{dd}^{cl d} T_{dd}^{cl r} + u_0 F_0 T_{du}^{cl d} T_{uu}^{cl r} \quad (11)$$

$$F_{total} = F_1 [1 - R_s (R_{dd}^{cl r} + R_{uu}^{cl d} T_{uu}^{cl r 2})]^{-1} + u_0 F_0 T_{du}^{cl d} T_{uu}^{cl r} \quad (12)$$

Mediante las expresiones anteriores se puede obtener el DHI:

$$DHI = F_{total} - F_d \quad (13)$$



$$DNI = \frac{F_d}{u_0} = F_0 T_{dd}^{cl d} T_{dd}^{cl r} \quad DHI = F_{total} - F_d \quad F_{total} = F_1 [1 - R_s (R_{dd}^{cl r} + R_{uu}^{cl d} T_{uu}^{cl r 2})]^{-1} + u_0 F_0 T_{du}^{cl d} T_{uu}^{cl r}$$

Ilustración 2-9 Procesos del modelo FARMS para obtención de componentes de radiación solar

Realizado por: Flores V, 2024

2.10.2.2 El modelo REST2 (Evaluación de Referencia de Transmitancia Solar, 2 bandas)

REST 2 es un modelo completo y de alto rendimiento para predecir la irradiancia directa, difusa y global. Emplea los algoritmos que se utilizaron para obtener el modelo CPCR2 de dos bandas con predicción determinista de la irradiancia solar, la iluminancia y la radiación, fotosintéticamente activa (PAR) bajo cielos sin nubes. (Gueymard, 2008, pág. 282)

La estructura general de REST2

Donde:

Banda 1: cubre los rayos UV y visible, de 0,29 a 0,70 μm . caracterizado por una fuerte absorción por el ozono en los rayos UV y una fuerte dispersión por moléculas y aerosoles en toda la banda.

Banda 2: cubre el infrarrojo cercano, de 0,7 a 4 μm , y se caracteriza por una fuerte absorción por parte del vapor de agua, dióxido de carbono y otros gases, junto con una dispersión limitada.

Utiliza la distribución de energía espectral extraterrestre y el valor constante solar.

En el modelo de REST 2, el DNI se obtiene mediante el producto de transmitancias para cada banda:

$$E_{bni} = T_{Ri}T_{gi}T_{oi}T_{ni}T_{wi}T_{ai}E_{0ni} \quad (14)$$

Donde:

$T_{Ri}, T_{gi}, T_{oi}, T_{ni}, T_{wi}, T_{ai}, E_{0ni}$ son las transmitancias de banda para la dispersión de Rayleigh, la absorción de gases mezclados uniformemente, la absorción de ozono, la absorción de dióxido de nitrógeno, la absorción de vapor de agua y la extinción de aerosoles, respectivamente. Estas transmitancias se han obtenido a través de ejecuciones paramétricas del código SMARTS y relaciones polinómicas computacionalmente eficientes

Se obtienen a partir del ángulo cenital del sol, z

Las entradas atmosféricas requeridas para el modelo son:

Presión del sitio, ρ (hpa);

Cantidad de ozono u_o (atm-cm);

Cantidad total de dióxido de nitrógeno u_n , (atm-cm);

Agua precipitable, w (cm)

Coefficientes de turbidez de Ångström, α_1, α_2 siendo valores respectivos para cada banda y β .

Adicionalmente para obtener la irradiación difusa y irradiancia global: se basa en un modelo de dos capas donde la capa superior se encarga de la dispersión de Rayleigh y la absorción de ozono y gases, mientras que la capa inferior se encarga de la dispersión y absorción de aerosoles, vapor de agua y dióxido de nitrógeno. Después de la dispersión en la capa superior, se asume que la irradiancia difusa se comporta como irradiancia directa en una masa de aire efectiva con un valor de 1.66. Este valor se utiliza para calcular las transmitancias relacionadas con la absorción en la capa inferior.

Por lo que se utiliza esta definición:

$$E_{dpi} = T_{oi}T_{gi}T'_{ni}T'_{wi}[B_{Ri}(1 - T_{Ri})T_{ai}^{0.25} + B_a F_i T_{Ri}(1 - T_{ast}^{0.25})]E_{0i} \quad (15)$$

Donde

$$E_{0i} = E_{0ni} \cos Z \quad (16)$$

Función F_i es un factor de corrección introducido para compensar múltiples efectos de dispersión y otras deficiencias en el enfoque de transmitancia simple utilizado aquí B_{R1} y B_{R2} las fracciones de dispersión directa de la extinción de *Rayleigh*

En combinación con FARMS, calcula la dispersión y absorción de la luz por aerosoles y gases traza en la atmósfera para estimar la radiación en la superficie bajo diversas condiciones atmosféricas. REST2 es fundamental en el cálculo preciso de la radiación solar en FARMS al considerar múltiples factores atmosféricos:

- Dispersión y absorción de la luz: Se calcula la dispersión y absorción de la luz por aerosoles y gases traza en la atmósfera, lo cual afecta la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre.
- Profundidad óptica del aerosol (AOD): La profundidad óptica del aerosol se utiliza para calcular la transmitancia y reflectancia en cielo despejado, lo que influye en la cantidad de radiación solar que atraviesa la atmósfera.
- Albedo de la superficie: Se considera el albedo de la superficie de onda corta de banda ancha, que representa la capacidad de la superficie terrestre para reflejar la radiación solar incidente

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de Investigación

El presente trabajo de investigación es de nivel descriptivo con diseño no experimental tipo transversal, debido a que se utilizó datos tanto terrestres pertenecientes como satelitales de irradiación normal directa y variables meteorológicas (humedad relativa, velocidad del viento, temperatura) descargados de la base de datos NSRDB, para determinar zonas de alto potencial más no se predijo algún patrón de comportamiento de radiación solar.

Este estudio cuenta con un enfoque cuantitativo, ya que mediante SAM se simuló datos meteorológicos correspondientes a las zonas de alto potencial solar de la provincia de Chimborazo. En cuanto al nivel de profundización, se considera correlacional-causal ya que se determinó una correlación entre la irradiación global horizontal y la altura de todos los datos satelitales de las zonas que pertenecen a la región. La inferencia utilizada es deductiva debido a que se inició con zonas distribuida por toda la provincia para determinar únicamente zonas de alto potencial solar cercanas a las 11 estaciones terrestres

3.1.1 *Diseño de la investigación*

Debido al objetivo de estudio, se recurrió a un diseño no experimental porque se procesó datos existentes proporcionados por GEAA y datos satelitales (NSRDB) sin la necesidad de generar o predecir nuevos datos a través de experimentos o salidas de campo.

3.1.2 *Localización del Estudio*

El estudio se enfoca en la provincia de Chimborazo, ubicada en la región interandina de la Sierra de Ecuador, entre las coordenadas geográficas aproximadas de 1.6619° S de latitud y 78.6471° O de longitud. La provincia tiene una extensión aproximada de 6.500,66 km². Presenta un rango altitudinal que va desde los 135 hasta los 6.310 metros sobre el nivel del mar (msnm), con una temperatura que oscila entre -5°C y 30°C.

3.1.3 *Población de estudio*

Es un tipo de población finita, ya que se tomó los valores promedios de DNI un periodo de 11 horas diarias disponibles de sol que van de 7am a 6pm dentro de un periodo de 6 años de la provincia de Chimborazo.

Donde se estableció como zonas de alto potencial aquellas que superen su valor de DNI a 3,5 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ diario

3.1.4 Tamaño de la muestra

Se seleccionó 11 puntos satelitales cercanos (< 2km) a cada una de las ubicaciones de las estaciones meteorológicas terrestres de la provincia de Chimborazo

3.1.5 Método de muestreo

Se optó por utilizar un método de muestreo no probabilístico como es el método por conveniencia debido a que el tamaño de la muestra favorece la disponibilidad de datos previos para validar datos, y a la vez estos se utilizará para observar tendencias con respecto a los datos terrestres y satelitales.

3.1.6 Técnicas de recolección de datos

- Se descargó datos de radiación solar normal directa y variables meteorológicas mediante fuentes bases de datos satelitales (NSRDB) y base de datos terrestres para datos de GHI de mediciones terrestres realizadas por el GEAA-ESPOCH,
- Para el análisis de zonas: *Microsoft Excel, ArGIS, RStudio* .
- Para la simulación de factores atmosféricos de la radiación DNI: Software *System Advisor Model (SAM)*

3.1.7 Metodología

En el presente trabajo se aplicó la siguiente metodología:

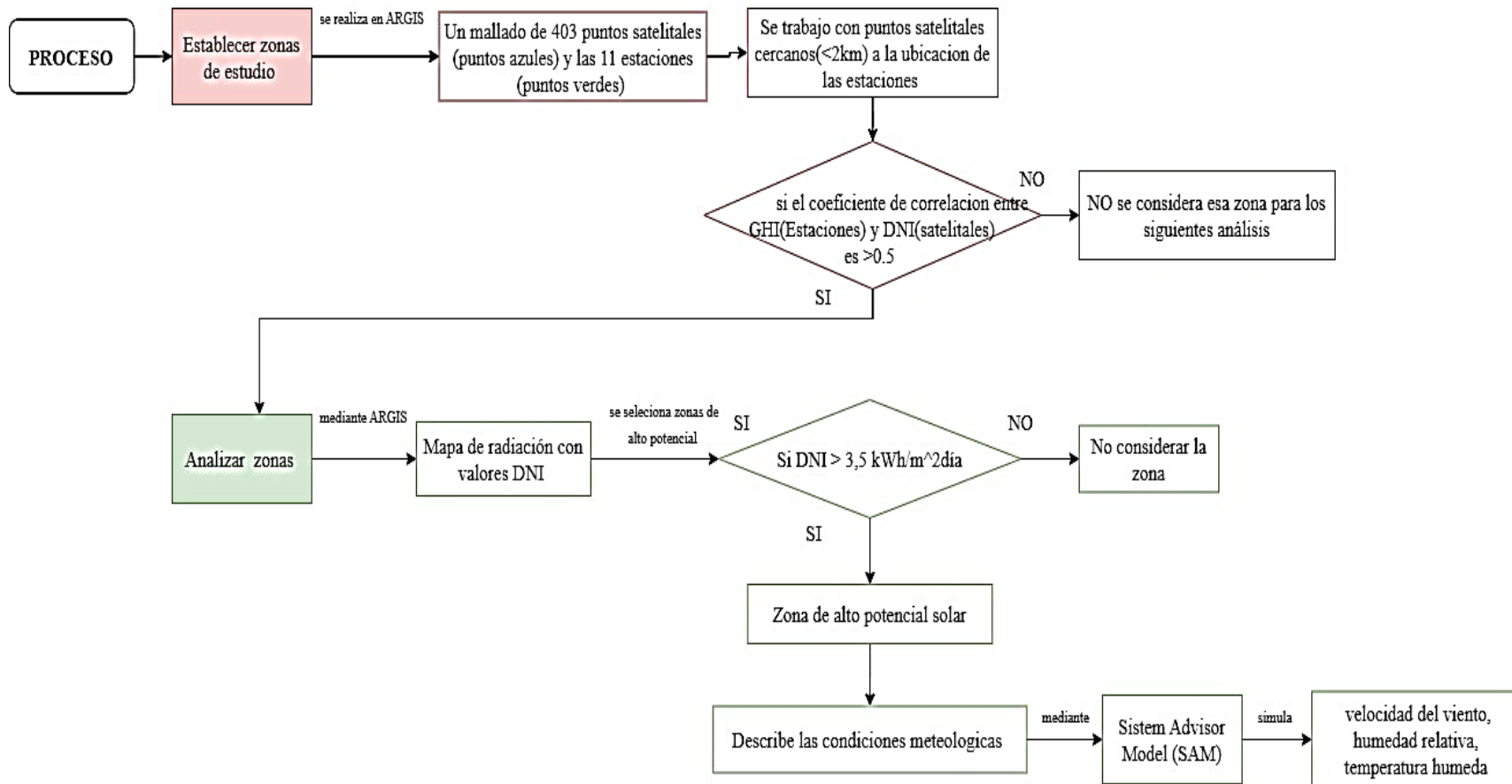


Ilustración 3-1 Metodología empleada para determinar zonas de alto potencial solar en la Provincia de Chimborazo

Realizado por: Flores V.,2024

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Procesamiento, análisis e interpretación de resultados

4.1.1 Establecimiento de zonas de estudio

En ArcGIS:

- Se estableció un mallado de 403 puntos azules separados entre sí a 4km lo que representó los datos satelitales. También se incluyen en la misma cuadrícula las ubicaciones de las estaciones del GEAA, representadas por puntos verdes. Como se observa en la Ilustración 4-1

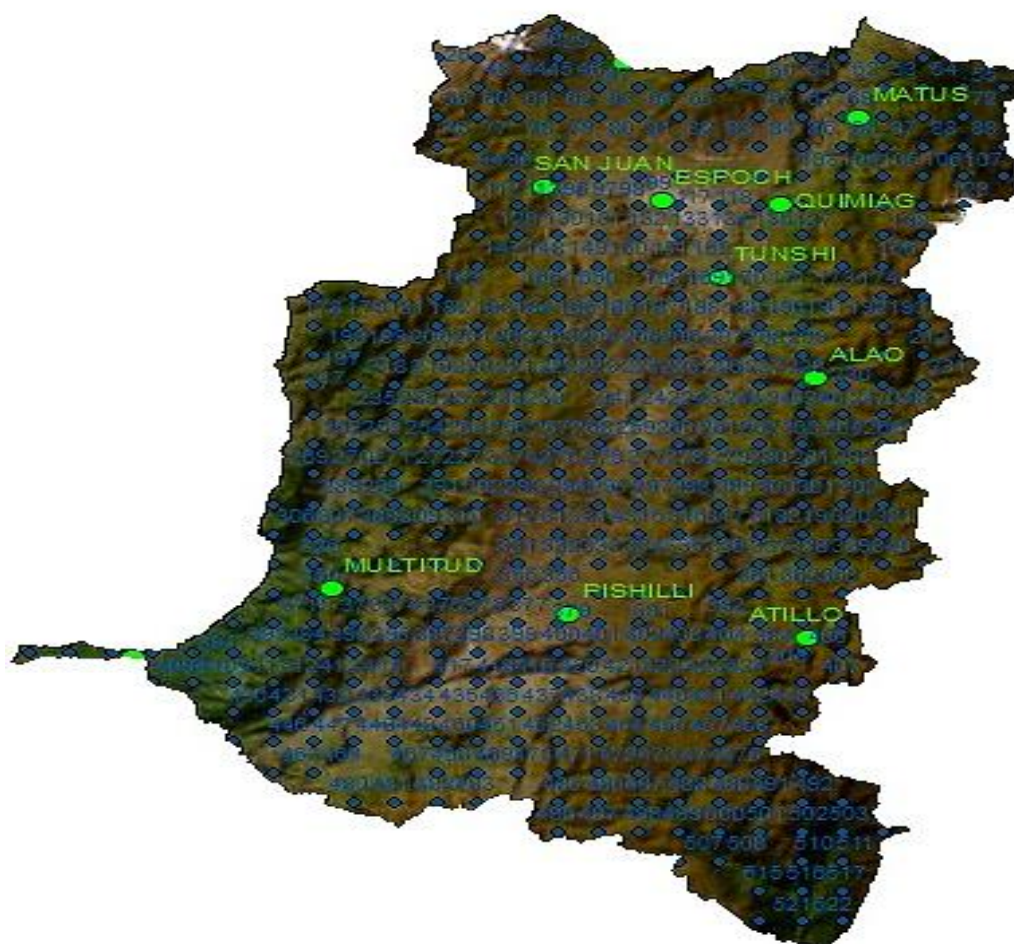


Ilustración 4-1 Ubicación de los puntos cercanos a las estaciones meteorológicas de la Provincia de Chimborazo donde los puntos azules son medidas satelitales y los puntos verdes corresponde a las estaciones

Realizado por: Flores V.,2024

A continuación, se presenta las ubicaciones de las 11 estaciones meteorológicas terrestres perteneciente a la provincia de Chimborazo

Tabla 4-1 Ubicación de las estaciones meteorológicas en estudio

Estación	Parroquia	Cantón	X	Y	Latitud	Longitud	Altitud (m)
EsPOCH	Lizarzaburu	Riobamba	758398	9816965	-1.65460177	-78.6775198	2754
Urbina	San Andrés	Guano	754533	9835326	-1.488365	-78.712055	3642
Tunshi	Licto	Riobamba	764087	9806678	-1.74752939	-78.6263025	2840
Quimiag	Quimiag	Riobamba	770083	9816392	-1.65964689	-78.5725452	2709
Pishilli	Tixán	Alausí	749103	9761332	-2.15763504	-78.7603694	3546
San Juan	San Juan	Riobamba	746596	9818849	-1.6376917	-78.7835603	3232
Alao	Pungala	Riobamba	773499	9793173	-1.86948947	-78.5415915	3064
Cumanda	Cumandá	Cumandá	706262	9755579	-2.21016903	-79.1453264	330
Multitud	Multitud	Alausí	725688	9764881	-2.2499	-78.97084	1483
Matus	Matus	Penipe	777759	9827878	-1.55575093	-78.5037299	2704
Atillo	Cebadas	Guamote	772610	9758048	-2.186991	-78.5490996	3467

Fuente: GEAA,2022

Realizado por: Flores V.,2024.

Y el punto satelital más cercano (<2km) obtenido de la Ilustración 4-1 con sus coordenadas geográficas para cada estación en análisis como se observa en esta Tabla 4-2

Tabla 4-2 Punto satelital (NSRDB) cercano a cada estación meteorológica de la provincia de Chimborazo

Estación meteorológica terrestre	NSRDB		
	Punto	Coordenadas geográficas	Altitud (m)
Urbina	29	-1.48200,-78.73518	4102
Matus	69	-1.55405,-78.51953	2891
San juan	96	-1.662556,-78.77095	3576
Riobamba (ESPOCH)	116	-1.662643,-78.66311	2760
Quimiag	118	-1.662556,-78.59125	2767
Alao	228	-1.87936,-78.55504	3392
Atillo	406	-2.20463,-78.55455	3713
Tixan (Pishilli)	378	-2.16882,-78.77026	3120
Multitud	350	-2.13298,-78.98600	2222
Cumandá	390	-2.2057,-79.12971	316
Tunshi	152	-1.734489,-78.62710	2725

Realizado por: Flores V.,2024.

En base a lo anterior, se estableció una correlación entre GHI (base de datos de la estación terrestre) y su DNI (base de datos satelital NSRDB) para el periodo del 2014 al 2020 obteniendo los siguientes resultados

Tabla 4-3 Correlación entre el GHI de las estaciones meteorológicas analizadas y el DNI de su punto cercano

Estación meteorológica terrestre	NSRDB	Correlación
Cumandá	390	0.17
Alao	228	0.44
Multitud	350	0.46
Tixán (Pishilli)	378	0.51
Tunshi	152	0.52
San juan	96	0.53
Riobamba (ESPOCH)	116	0.53
Matus	69	0.58
Urbina	29	0.68
Quimiag	118	0.73
Atillo	406	0.83

Realizado por: Flores V.,2024.

De acuerdo a los resultados observados en Tabla 4-3, la mayoría de zonas tiene una correlación mayor a 0.5 por lo que demuestra la validez de los datos empleados.

Posteriormente, se graficó los valores medios de DNI calculada mediante las mediciones satelitales y GHI que pertenecen a cada una de las estaciones de acuerdo a la Tabla 4-3

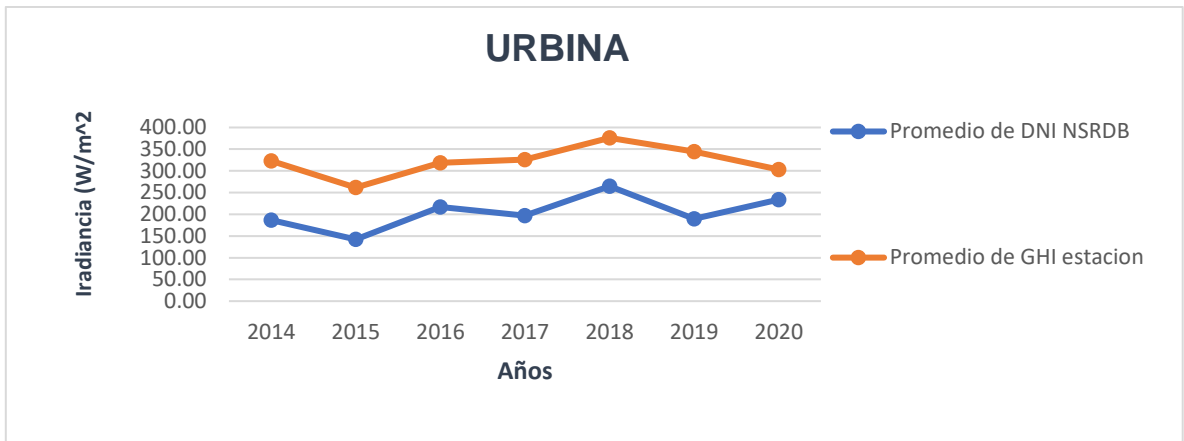


Ilustración 4-2 Tendencias entre los valores promedio de DNI del punto 29 satelital y el GHI de la estación Urbina

Realizado por: Flores V.,2024

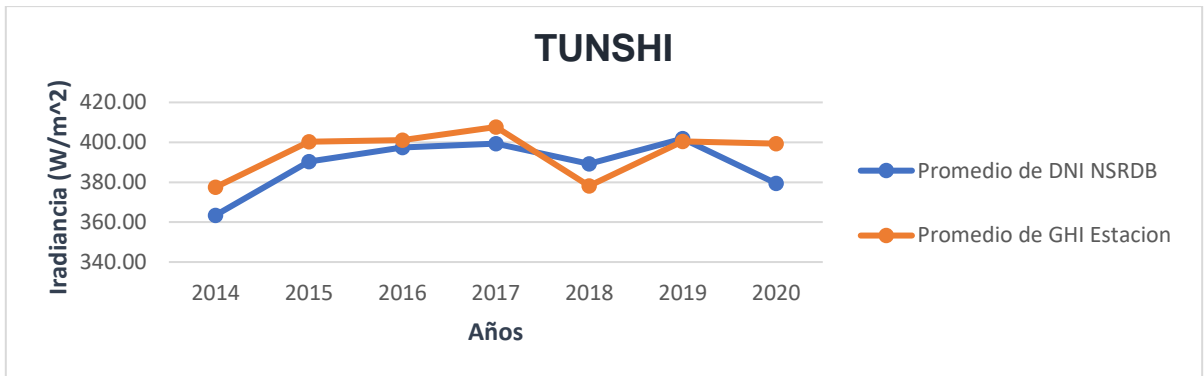


Ilustración 4-3 Tendencias entre los valores promedio de DNI del punto 152 satelital y el GHI de la estación Tunshi

Realizado por: Flores V.,2024

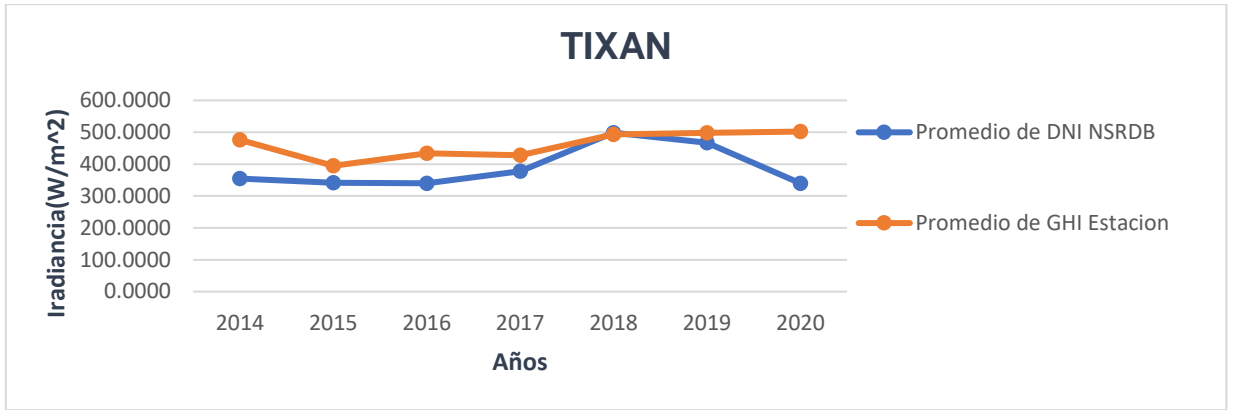


Ilustración 4-4 Tendencias entre los valores promedios mensuales de DNI del punto 378 satelital y el GHI de la estación Tixán

Realizado por: Flores V.,2024

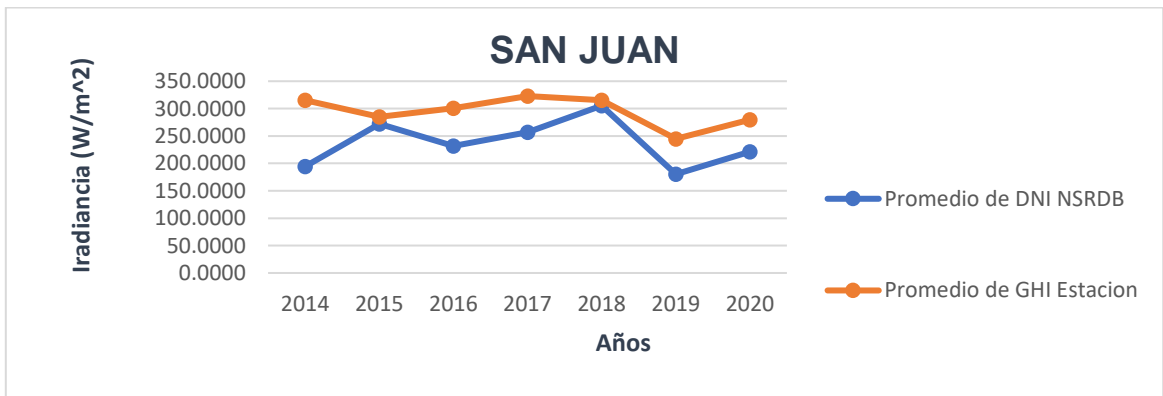


Ilustración 4-5 Tendencias entre los valores promedio de DNI del punto 96 satelital y el GHI de la estación San Juan

Realizado por: Flores V.,2024.

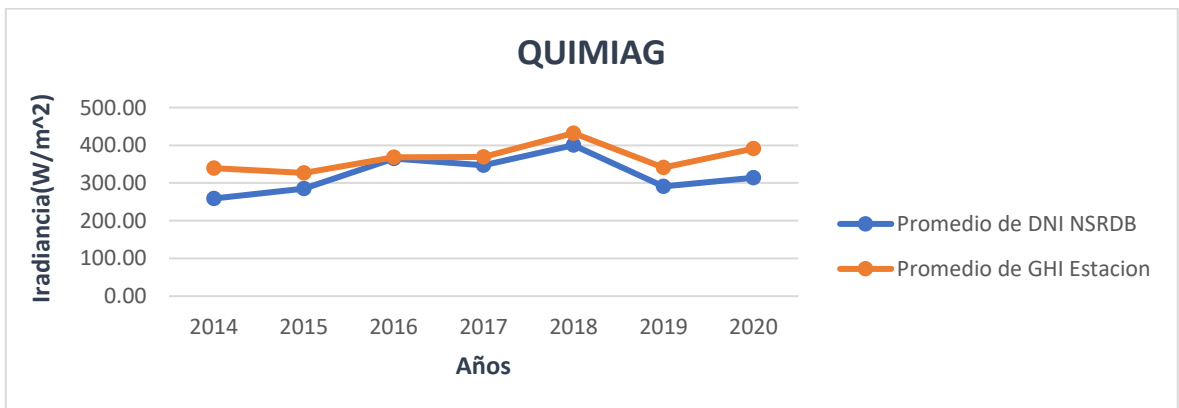


Ilustración 4-6 Tendencias entre los valores promedio de DNI del punto 118 satelital y el GHI de la estación de Quimiag

Realizado por: Flores V.,2024.

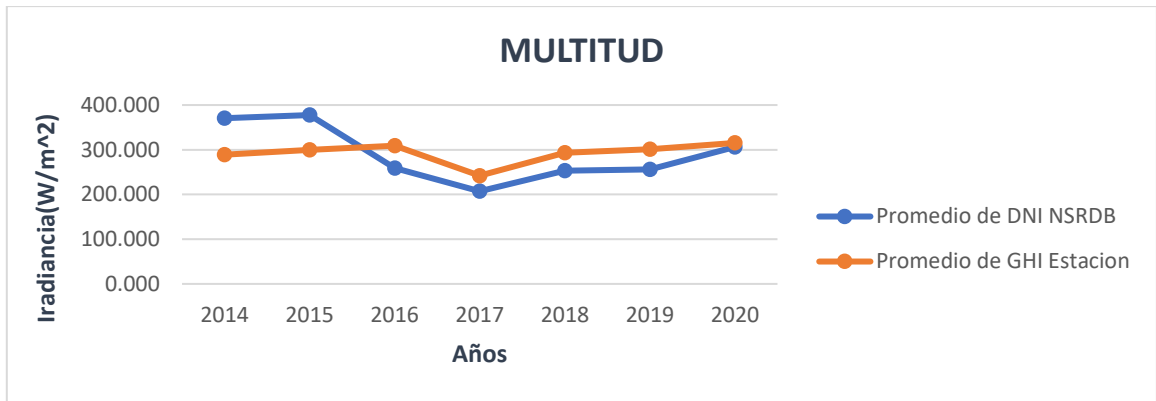


Ilustración 4-7 Tendencias entre los valores promedios mensuales de DNI del punto 350 satelital y el GHI de la estación Multitud

Realizado por: Flores V.,2024.

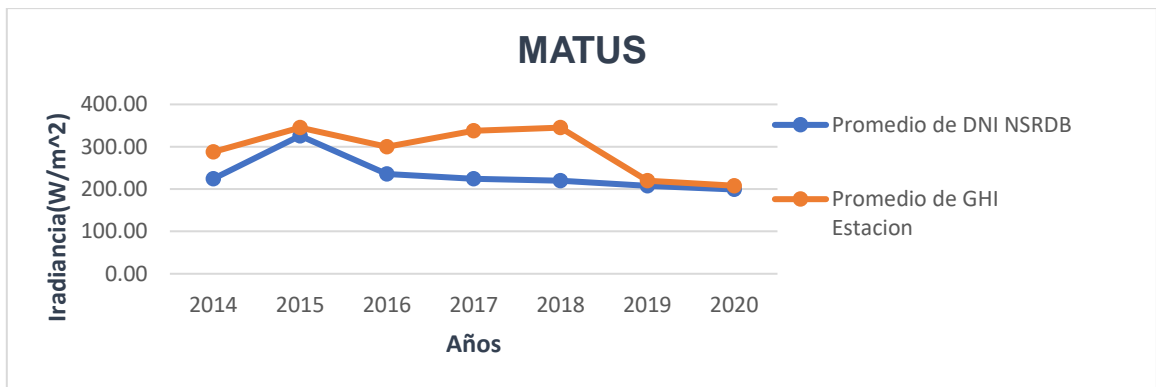


Ilustración 4-8 Tendencias entre los valores promedio de DNI del punto 69 satelital y el GHI de la estación Matus

Realizado por: Flores V.,2024.

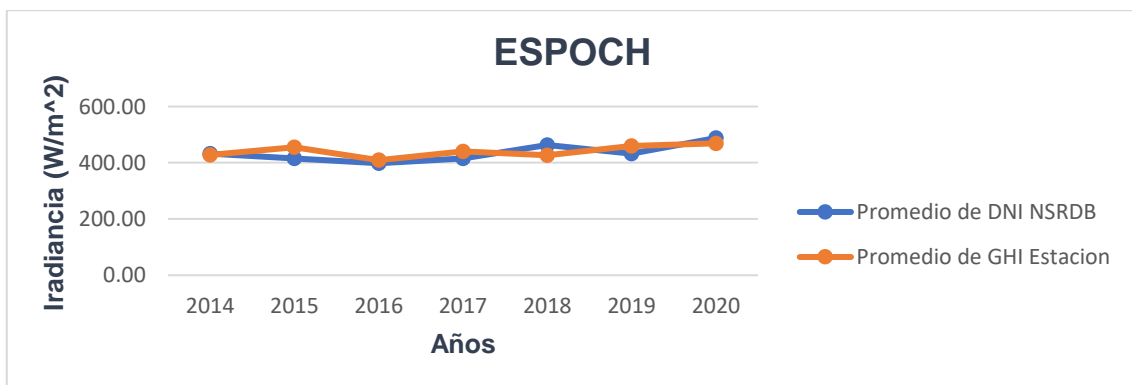


Ilustración 4-9 Tendencias entre los valores promedio de DNI del punto 116 satelital y el GHI de la estación Espoch

Realizado por: Flores V.,2024

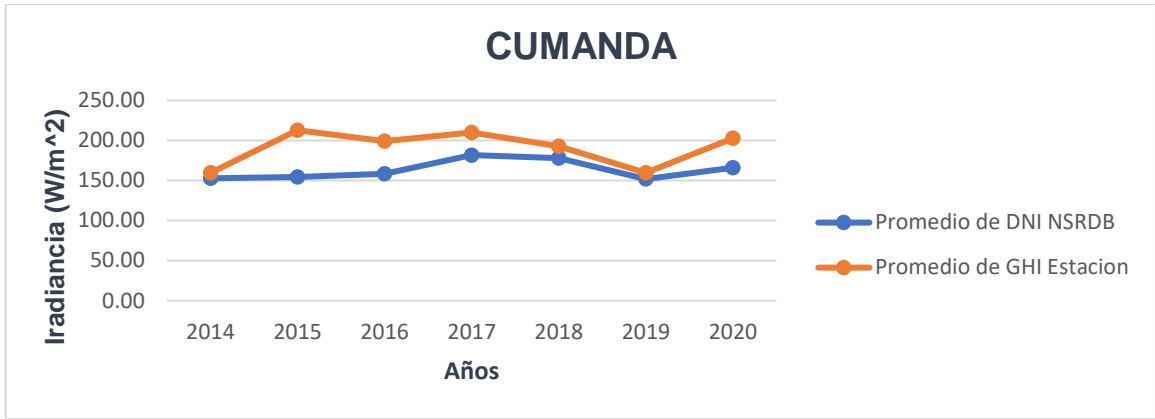


Ilustración 4-10 Tendencias entre los valores promedio de DNI del punto 390 satelital y el GHI de la estación Cumandá

Realizado por: Flores V.,2024.



Ilustración 4-11 Tendencias entre los valores promedio de DNI del punto 406 satelital y el GHI de la estación Atillo

Realizado por: Flores V.,2024.

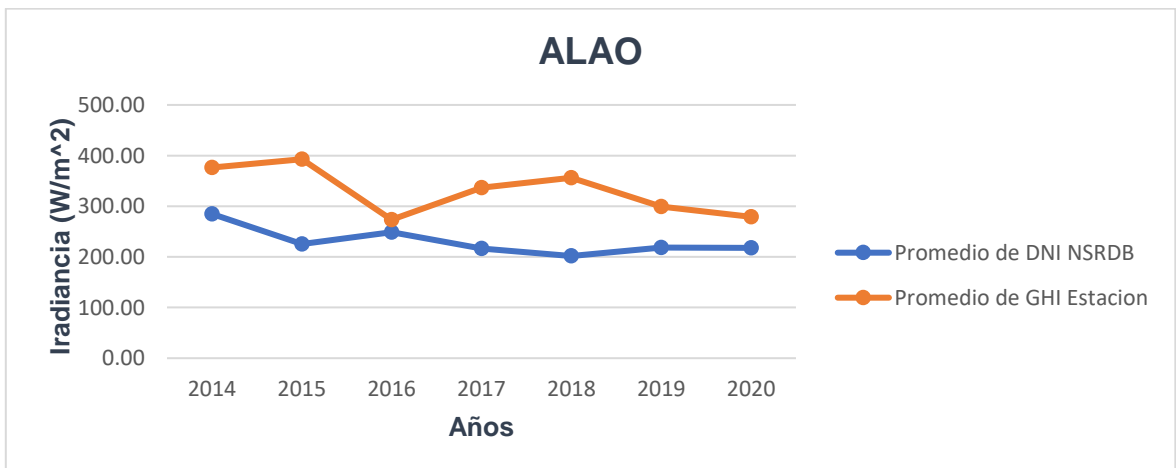


Ilustración 4-12 Tendencias entre los valores promedio de DNI del punto 228 satelital y el GHI de la estación Alao

Realizado por: Flores V.,2024.

En las ilustraciones anteriores que corresponde a Tixán y Espoch se observa que las tendencias de DNI sobrepasa a GHI, en los meses de Junio a Septiembre para la primera zona y los meses de junio y julio para la segunda. Un caso similar sucede con la zona de multitud en donde se observa este comportamiento a lo largo del año. Entonces, la radiación directa (DNI) calculada por los modelos satelitales tiende a ser mayor porque se efectúan a una mayor altitud en comparación con las estaciones en superficie. Conforme la radiación atraviesa la atmósfera, una porción de la radiación directa se pierde por dispersión y absorción de los gases, partículas y nubes presentes, disminuyendo la radiación global que finalmente llega a la superficie terrestre

Por el contrario, en las estaciones de Urbina, Tunshi, San Juan, Quimiag, Matus, Cumánda, Atillo, y Alao la diferencia entre GHI y DNI es mayor

La radiación solar directa normal es la componente más intensa de la radiación solar que alcanza la Tierra, pero su cantidad depende en gran medida de las condiciones meteorológicas y la transparencia de la atmósfera en un momento dado.

4.2 Correlación entre DNI Vs altitud de puntos satelitales a nivel de provincia

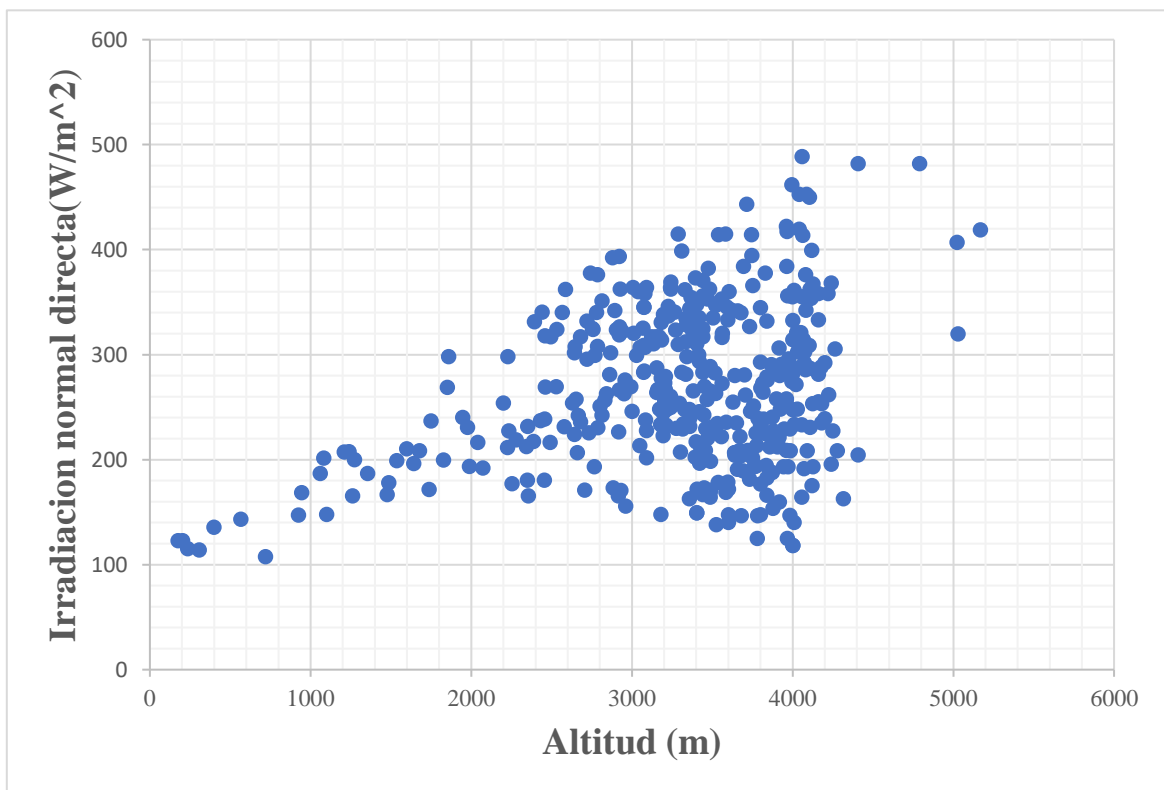


Ilustración 4-13 Correlación entre la radiación normal directa (DNI) en función de la altitud de los 403 puntos que se encuentran dentro del perfil de la provincia de Chimborazo

Realizado por: Flores V., 2024.

De acuerdo a la Ilustración 4-13 y a las tendencias observadas en las secciones anteriores se puede inferir que, a mayor altitud, existe menos atmósfera para atenuar la radiación directa, lo que resulta en una mayor intensidad de la misma. Sin embargo, es importante considerar que la correlación entre estas es débil porque la mayoría de las estaciones meteorológicas se encuentran ubicadas en las cordilleras, donde históricamente se registran mayores niveles de precipitación presentando una mayor nubosidad casi o durante todo el año. Por lo que básicamente la radiación directa normal no depende únicamente de la altitud a la que se encuentra sino también de otros parámetros atmosféricos

4.2.1 Identificación de zonas de alto potencial solar

A partir de los datos de la base de datos NSRDB, se generó un mapa solar en ArcGIS (ver Ilustración 4-14) que muestra la radiación promedio DNI en la provincia durante el año que corresponde al promedio de 22 años con datos históricos de 1998 al 2020. En este mapa, se utilizaron escalas de colores que van desde tonos rojizos, indicando altas cantidades de radiación, hasta tonos verdosos, representando bajas cantidades de radiación. En base a Cevallos-Sierra & Ramos-Martin (2018), donde sugiere un valor umbral de $3.5 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{día}}$ por día como un nivel significativo de potencial solar destinado para proyectos de concentración solar.

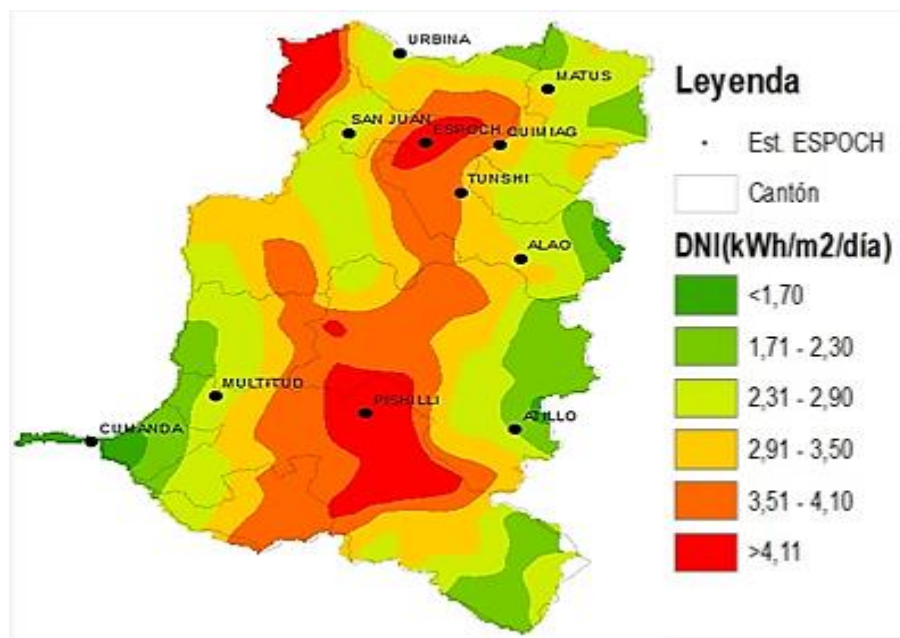


Ilustración 4-14 Mapa de irradiación solar directa promedio de 2014 a 2020

Realizado por: Flores V.,2024.

Tabla 4-4 Escala de valores promedio de 6 años DNI disponible en cada zona de la provincia de Chimborazo

Irradiancia promedio anual $\frac{W}{m^2}$	Irradiación $\frac{Wh}{m^2}$	Irradiación $\frac{kWh}{m^2}$	Irradiación $\frac{kWh}{m^2}$ <i>dia</i>
142	518300	518.3	1.42
143	521950	521.95	1.43
192	700800	700.8	1.92
193	704450	704.45	1.93
242	883300	883.3	2.42
243	886950	886.95	2.43
292	1065800	1065.8	2.92
293	1069450	1069.45	2.93
342	1248300	1248.3	3.42
351	1281150	1281.15	3.51

Realizado por: Flores V.,2024.

De acuerdo a los valores establecidos en la Tabla 4-4, se consideraron de alto potencial debido a que superan el umbral de $3.5 \frac{kWh}{m^2}$ por día sugerido por Cevallos-Sierra & Ramos-Martin (2018) para proyectos de concentración solar. De ahí que se identificaron 4 zonas con alto potencial solar (DNI) cercanas a las estaciones meteorológicas de la provincia de Chimborazo como se detalló en la Tabla 4-5

Tabla 4-5 Zona de alto potencial solar de DNI de la provincia de Chimborazo

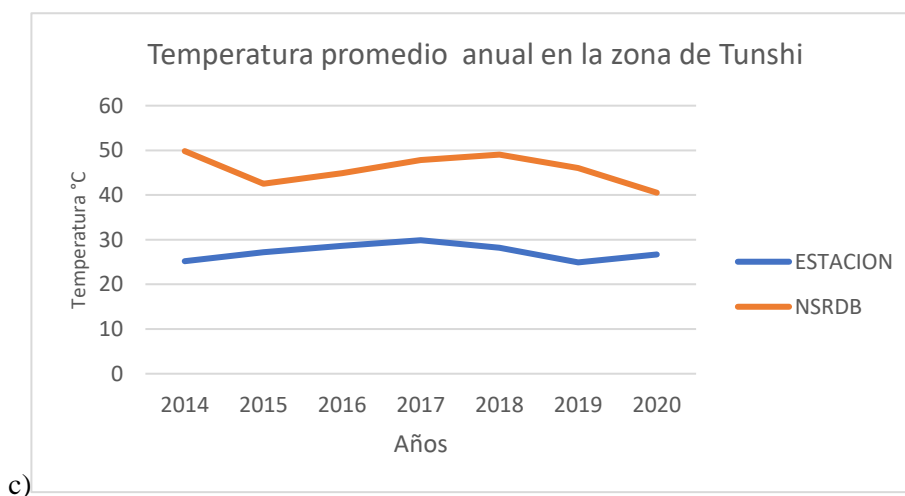
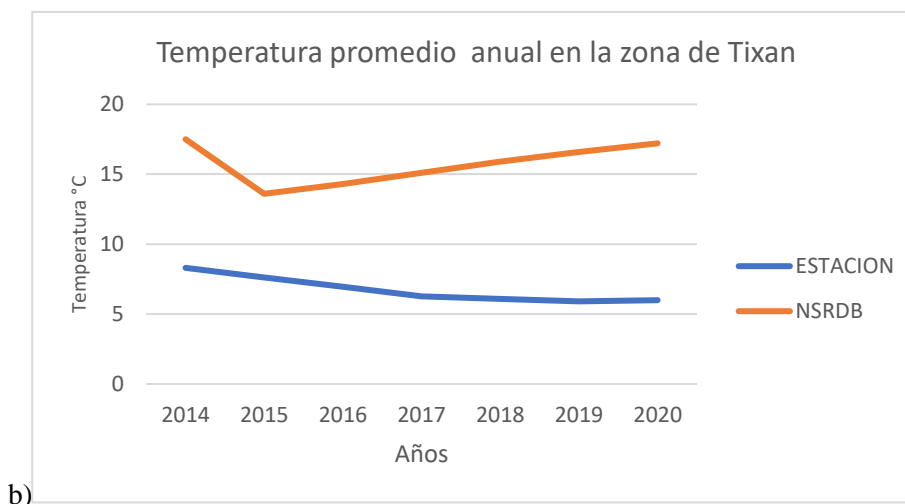
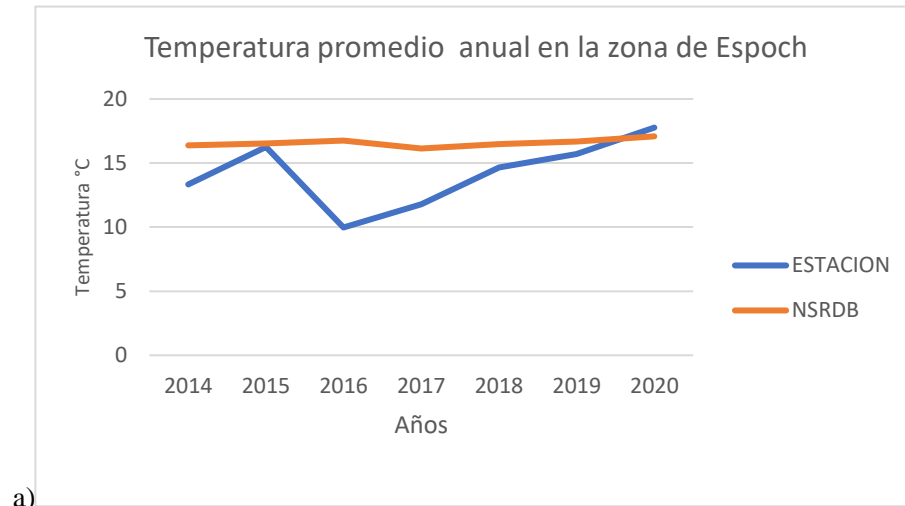
Zonas	Irradiancia promedio anual $\frac{W}{m^2}$	Irradiación $\frac{kWh}{m^2}$ <i>dia</i>
Riobamba (ESPOCH)	347.38	3.47
Quimiag	298.97	2.99
Pishilli (Tixán)	350.01	3.47
Tunshi	298.19	2.98

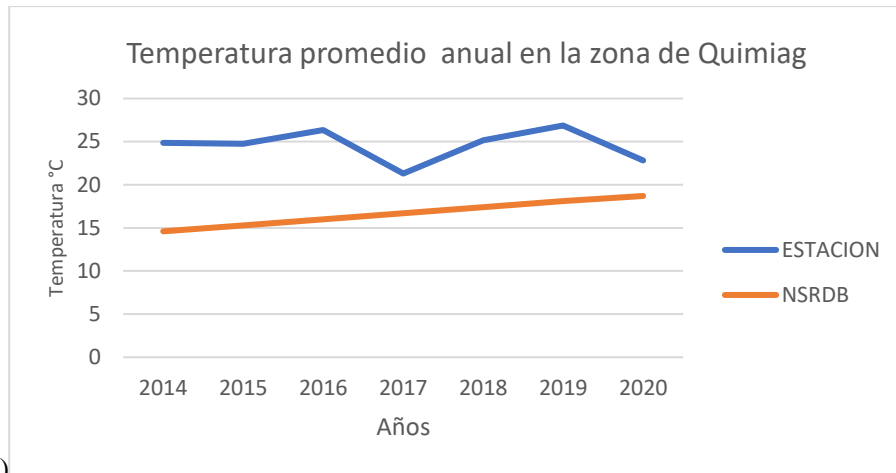
Realizado por: Flores V.,2024.

- Espoch y Pishilli (Tixán), con valores de radiación directa de $3.47 \frac{kWh}{m^2}$ por día
- Tunshi, y Quimiag, con valores de radiación directa de 2.98 y $2.99 \frac{kWh}{m^2}$ por día respectivamente.

4.2.2 Descripción de variables meteorológicas de las zonas de alto potencial solar

En esta sección, para cada una de las 4 zonas identificadas como zonas de alto potencial se graficaron los valores promedio anuales de velocidad del viento, temperatura y humedad relativa, utilizando datos de la base de datos satelital (NSRDB) y de las estaciones meteorológicas



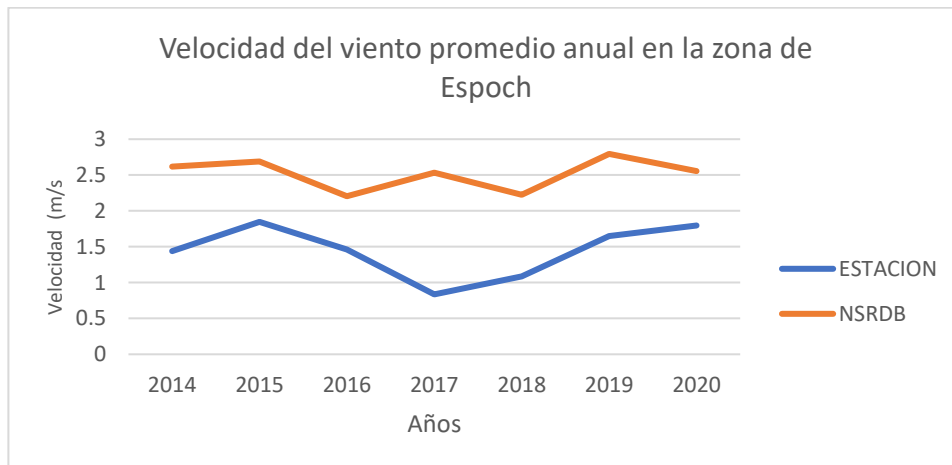


d)

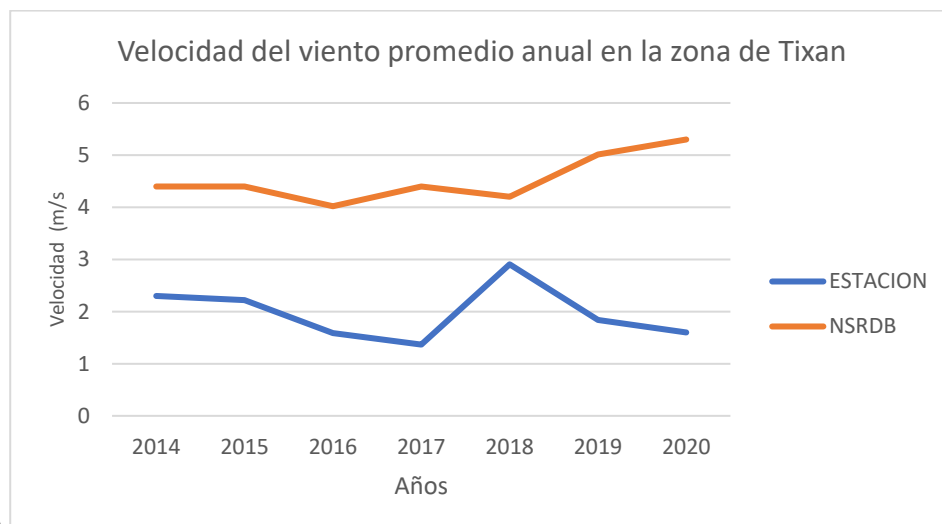
Ilustración 4-15 Temperatura promedio diario anual en la zona de: a)Espoch, b)Tixán,c)Tunshi y d)Quimiag

Realizado por: Flores V.,2024.

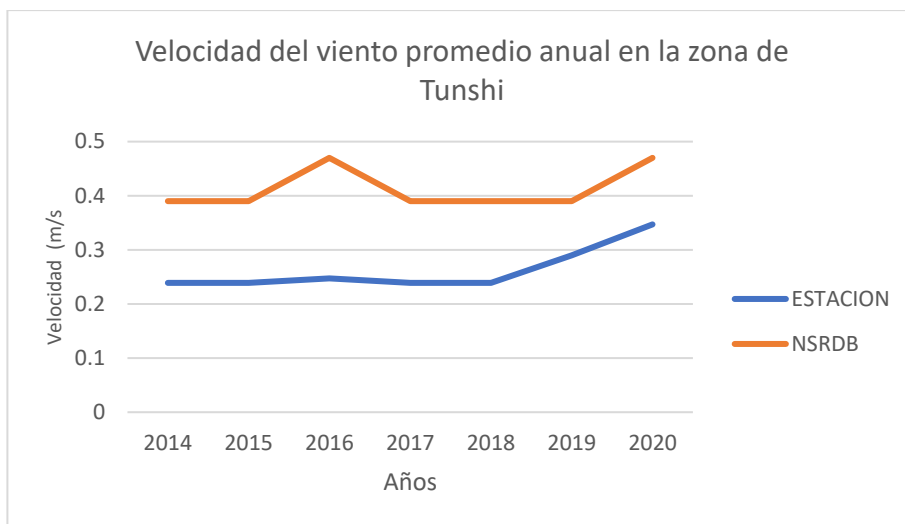
De manera general se observó que los comportamientos a lo largo de los años tienen a no tener un gran desfase visual.



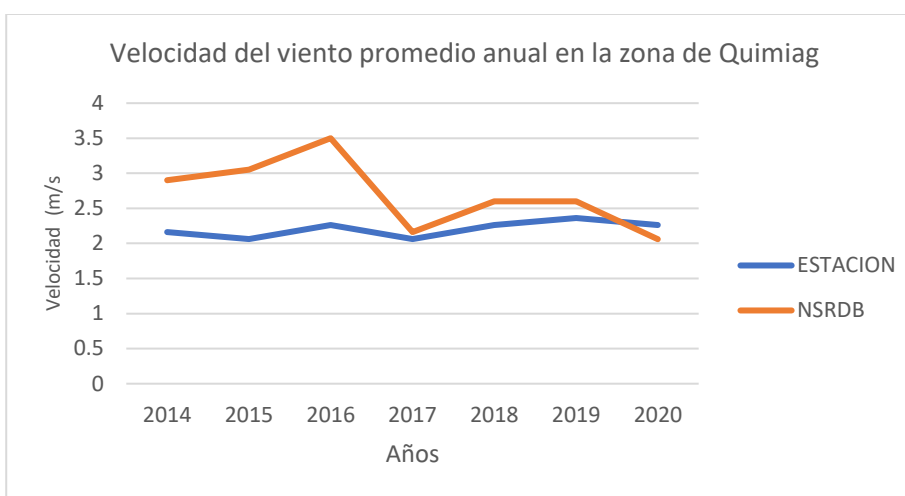
a)



b)



c)

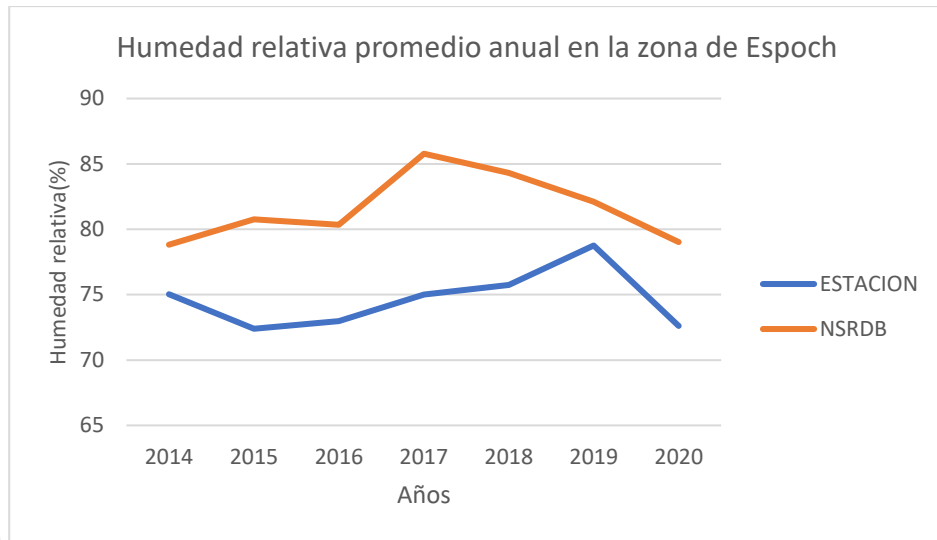


d)

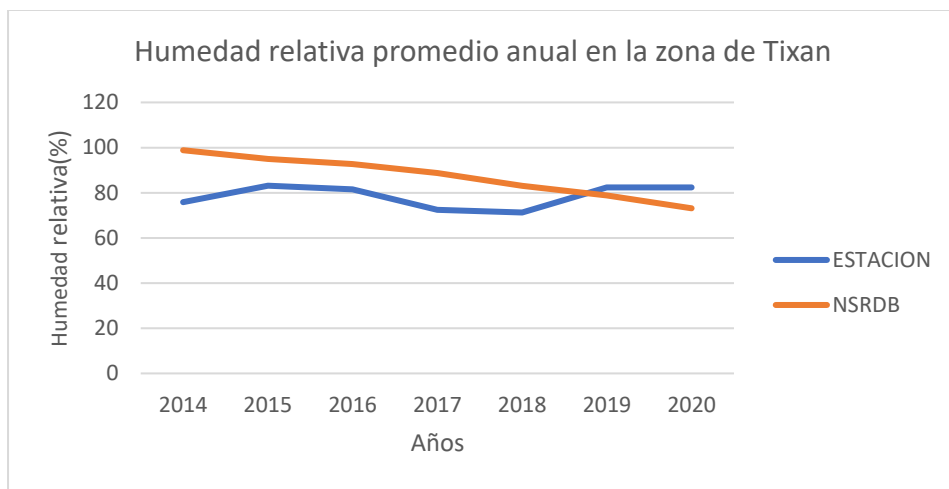
Ilustración 4-16 Velocidad del viento promedio diario anual en la zona de a)Espoch, b)Tixan, c)Tunshi y d)Quimiag

Realizado por: Flores V., 2024.

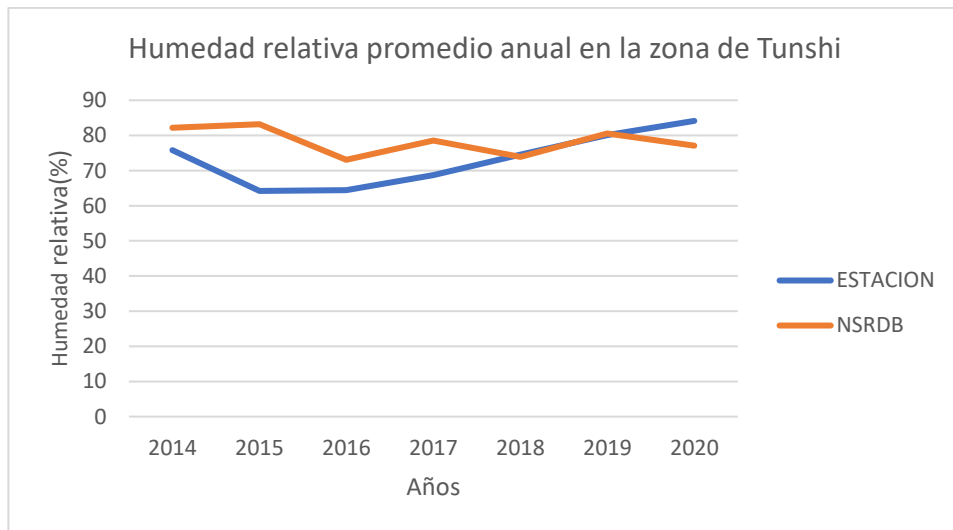
En cuanto, a la velocidad del viento durante estos años presento tendencias con variaciones leves. Esto se debe a la diferencia de alturas de cada una de las fuentes de obtención de datos y debido al movimiento de convección del viento en donde el satélite puede calcular un aproximado en diferentes puntos del movimiento.



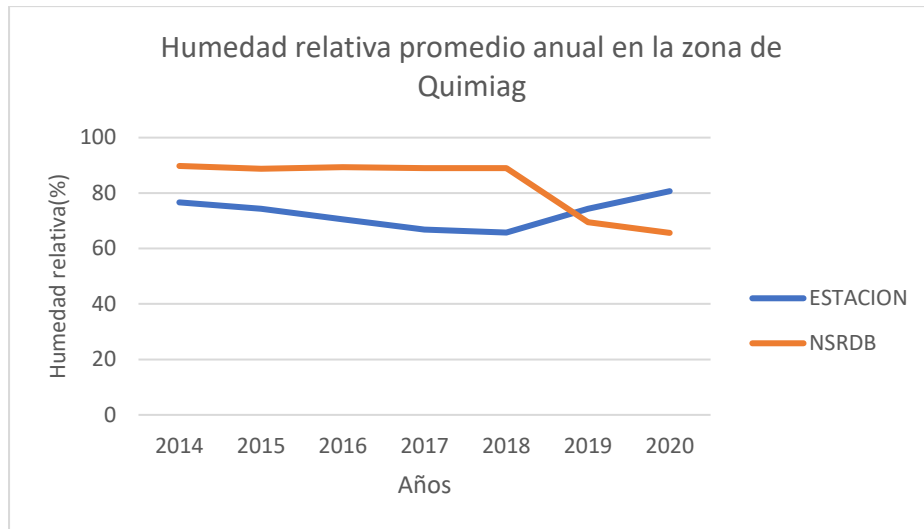
a)



b)



c)



d)

Ilustración 4-17 Humedad relativa promedio diario anual en la zona de a)Epoch, b)Tixan, c)Tunshi y d)Quimiag

Realizado por: Flores V., 2024.

De acuerdo a Ilustración 4-17, la humedad relativa durante estos años mantuvo valores superiores al 60%. Por otra parte, se analizó la variabilidad de los datos mediante una prueba de T-student con las siguientes hipótesis:

Hipótesis Nula (H₀) = La media anual entre las mediciones satelitales y terrestres son iguales con un nivel de significancia de 0.05

Hipótesis Nula (H₁) = La media anual entre las mediciones satelitales y terrestres no son iguales con un nivel de significancia de 0.05

Tabla 4-6 Valores promedios de temperatura anual por horas disponibles de sol (7am -6pm) de las zonas de alto potencial solar.

Parámetros de la prueba T-Student	TEMPERATURA (C °)							
	ESPOCH		TIXÁN		TUNSHI		QUIMIAG	
	NSRDB	EST	NSRDB	EST	NSRDB	EST	NSRDB	EST
Media	15.57	17.6687	10.06	15.27	15.07	17.35	14.48	17.06
Varianza	4.115	3.64699	1.58	4.16	3.60	3.58	2.88	3.47
Coeficiente de correlación de Pearson	0.48		0.89		0.53		0.59	
Estadístico t	-3.47		-15.96		-4.12		-5.27	
P(T<=t) una cola	0.003		9x10-9		0.001		0.0001	
P(T<=t) dos colas	0.006		1.9x10-8		0.002		0.004	

Realizado por: Flores V.,2024.

Tabla 4-7 Valores promedios de velocidad del viento anual por horas disponibles de sol (7am -6pm) de las zonas de alto potencial solar

Parámetros de la prueba T-Student	VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)							
	ESPOCH		TIXÁN		TUNSHI		QUIMIAG	
	NSRDB	EST	NSRDB	EST	NSRDB	EST	NSRDB	EST
Media	2.95	3.06	5.10	3.33	1.95	3.07	2.34	2.97
Varianza	1.31	0.99	0.44	1.16	0.66	0.97	0.78	0.90
Coeficiente de correlación de Pearson	-0.76		0.20		-0.80		-0.84	
Estadístico t	-0.17		5.11		-2.17		-1.20	
P(T<=t) una cola	0.43		0.0002		0.03		0.13	
P(T<=t) dos colas	0.87		0.0004		0.06		0.26	

Realizado por: Flores V.,2024.

Tabla 4-8 Valores promedios de velocidad del viento anual por horas disponibles de sol (7am -6pm) de las zonas de alto potencial solar

Parámetros de la prueba T-Student	HUMEDAD (%)							
	ESPOCH		TIXAN		TUNSHI		QUIMIAG	
	NSRDB	EST	NSRDB	EST	NSRDB	EST	NSRDB	EST
Media	63.92	65.44	75.03	70.09	70.35	67.45	74.78	69.14
Varianza	88.58	73.66	25.37	104.59	66.30	79.65	50.24	80.35
Coefficiente de correlación de Pearson	0.15		0.92		0.37		0.38	
Estadístico t	-0.43		2.79		1.00		2.05	
P(T<=t) una cola	0.34		0.01		0.17		0.03	
P(T<=t) dos colas	0.68		0.02		0.34		0.07	

Realizado por: Flores V.,2024.

Tras analizar las medias estimadas entre los puntos satelitales y terrestres mediante la prueba t-student, se ha observado que en su mayoría las medias rechazan la hipótesis nula. Por consiguiente, se sugiere para futuras investigaciones la instalación de estaciones meteorológicas en la zona de interés para una medición directa de estas variables. Esta estrategia facilitará una mayor precisión en la determinación de los valores de las variables en el punto específico que se pretende estudiar.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se determinó que las zonas donde se ubican las estaciones de Tunshi, Tixán, EsPOCH y Quimiag tienen un alto potencial solar, ya que los datos promedios anuales de radiación solar directa (DNI) de la base de datos satelital NSRDB tomados desde 6am a 7pm (horas de disponibilidad de sol) y simulados con el software SAM, arrojan valores mayores a 3.50 kWh/m²/día, lo cual se considera un potencial aprovechable para proyectos de energía solar. Además, se identificó que factores como la altura, la velocidad del viento, temperatura, nubosidad y humedad relativa inflúan en la radiación solar de la provincia de Chimborazo, tal como se describió utilizando el modelo SAM en los resultados presentados ya que las zonas a mayor altitud, donde existía menos atmósfera para atenuar la radiación directa, presentaban una mayor intensidad de la misma. Esto se debía a que, al atravesar la atmósfera, una porción de la radiación directa se perdía por dispersión y absorción de los gases, partículas y nubes presentes, disminuyendo la cantidad que llegaba a la superficie terrestre. Por lo tanto, la radiación directa normal no dependía únicamente de la altitud, sino también de otros parámetros atmosféricos.

Con respecto a la velocidad del viento, se determinó que una mayor velocidad podía aumentar la convección y la mezcla de la atmósfera. Además, una mayor humedad relativa solía estar asociada a una mayor presencia de nubes y vapor de agua en la atmósfera, lo que disminuía la DNI. En cuanto a la temperatura, se observó que el aumento de la misma solía estar asociado a una mayor concentración de gases en la atmósfera, lo que podía influir en la absorción y dispersión de la radiación solar directa.

5.2 Recomendaciones:

Se recomienda utilizar otras bases de datos que se ajusten mejor a las condiciones específicas de las zonas de estudio, en lugar de depender únicamente de los datos meteorológicos disponibles. Esto permitirá obtener estimaciones más precisas del recurso solar, evitando sesgos o discrepancias entre los datos modelados y los observados en campo.

Se recomienda que se realice un mejor control en la medida de los datos para la radiación difusa en las estaciones meteorológicas

Se recomienda instalar estaciones meteorológicas de superficie en las zonas donde se vaya a implementar dispositivos de aprovechamiento solar

BIBLIOGRAFÍA

1. **ASTRO** *¿Qué significan los términos Acimut y Altura?* [blog], El Salvador ,2020. [consulta: 15 mayo 2024]. Disponible en: <https://astro.org.sv/publicaciones/que-significan-los-terminos-acimut-y-altura/>.
2. **BLANC, Philippe; et al.** Direct normal irradiance related definitions and applications: The circumsolar issue. *Solar Energy* [en línea], 2014 vol. 110, págs. 561-577 [consulta: 15 mayo 2024] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.001>
3. **CEVALLOS-SIERRA, Jaime & RAMOS-MARTÍN, Jesús.** “Spatial assessment of the potential of renewable energy: The case of Ecuador”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [en línea], 2018, (Ecuador) vol. 81, págs. 1154-1165. [Consulta: 15 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.015>
4. **CORREA, Christian.** *El secreto para sobresalir en fotovoltaica* [blog]. MPVSolarReference 2022. [Consulta: 15 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://www.mpvsolarreference.com/post/el-secreto-para-sobresalir-en-fotovoltaica>
5. **DUFFIE, John & BECKMAN, William.** *Solar engineering of thermal processes* [en línea]. 4.a ed. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2013 [Consulta: 15 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118671603>
6. **GARÍN, Andrea,** “Principios del derecho ambiental en el Acuerdo de París sobre Cambio Climático”.*Revista Derecho del Estado* [en línea], 2019. no. 44 págs. 195-226, [consulta: 15 mayo 2024]. Disponible en: DOI <https://doi.org/10.18601/01229893.n44.08>
7. **GÓMEZ, José María & DONCEL, Fredy.** “Predicción completa del ciclo solar 24 a través del método combinado”. *Reportes Científicos de La FACEN* [en línea]. 2019, (Paraguay) volumen. 10, (1), págs. 3-9. [Consulta: 15 de mayo de 2024]. ISSN 2222-0550. Disponible en: <https://doi.org/10.18004/rcfacen.2019.10.1.3>
8. **GUEYMARD, Christian.** “REST2: High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation – Validation with a benchmark dataset”. *Solar Energy* [en línea], 2008 volumen. 82(3). págs. 272-285 [Consulta: 15 mayo 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.008>
9. **GULICH UNC-CONAE.** Técnicas satelitales para la estimación de irradiancia solar descendente [YouTube Video]. (2024). Disponible en https://www.youtube.com/watch?v=XIHXsbsrKA&list=WL&index=10&ab_channel=GulichUNC-CONAEJ.

10. **IBRAHIM, Safwati; et al.** “Linear Regression Model in Estimating Solar Radiation in Perlis”. *Energy Procedia* [en línea]. 2012, volumen.18, págs. 1402-1412 [consulta: 15 de mayo de 2024]. ISSN 1876-6102. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.156>
11. **DORNELLES, Kelen; et al.** “Thermal performance of white solar-reflective paints for cool roofs and the influence on the thermal” *ResearchGate* [en línea]2011. [consulta: 15 mayo 2024]. Disponible en: [10.13140/RG.2.1.1745.5843](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1745.5843)
12. **MEINEL, Aden & MEINEL, Marjorie.** *Aplicaciones de la energía solar* [en línea]. Barcelona. Reverté 1982. [Consulta: 15 mayo 2024]. ISBN 9788429141993. Disponible en: https://www.reverte.com/libro/aplicaciones-de-la-energia-solar_80961/
13. **MÉNDEZ, Javier & CUERVO, Rafael.** *Energía solar fotovoltaica*, [en línea] España: Fundación Confemetal 2007 [Consulta: 15 mayo 2024]. Disponible en https://www.google.com.ec/books/edition/Energ%C3%ADa_solar_fotovoltaica/GZh1DGUQoOUC?hl=es&gbpv=1&dq=M.+M%C3%A9ndez+y+R.+Cuervo,+%C2%ABRadiaci%C3%B3n+Solar,+de+Energ%C3%ADa+solar+t%C3%A9rmica,&printsec=frontcover
14. **MIRANDA DE ASSIS, Matheus.** Potencial de generación de energía eléctrica a partir de sistemas de energía heliotérmica en el estado de Minas Gerais. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento* [en línea], 2020. vol. 01, no. 06, [consulta: 19 mayo 2024]. Disponible en: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/ingenieria-ambiental-es/potencial-de-generación>.
15. **MUÑOZ, J; et al.** “Modelación de Sistema Termosolar para Pasteurización en Producción de Quesos de Comunidades Andinas, Provincia de Chimborazo”. *Revista técnica energía* [en línea], 2016. volumen. 12(19, [consulta: 15 mayo 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v12.n1.2016.63>.
16. **NREL Learning.** 2022 National Solar Radiation Database Webinar [YouTube Video]. [consulta: 15 mayo 2024].2022 Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=BzNoYACXCOY&list=LL>
17. **ORDOÑEZ, Freddy; et al.** “Assessment of the Solar Resource in Andean Regions by Comparison between Satellite Estimation and Ground Measurements: Study Case of Ecuador”. *Journal of sustainable development* [en línea], 2019 vol. 12(4), pág.62 [consulta: 15 mayo 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.5539/jsd.v12n4p62>
18. **RAMOS, Cristina & PÉREZ, Natalia.** Estimación y modelación geoestadística de la radiación solares [En línea] (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Escuela Superior Politécnica del Chimborazo. Facultad de Ciencias. Escuela de Física y Matemática.

- Riobamba, Ecuador. 2014. [consulta:15-05-2024]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/3456>
19. **RIGHINI, R & ARISTEGUI, R.** “Plantas fotovoltaicas: perjuicios por no evaluar convenientemente el recurso solar”. 2016. vol. 4, pág. 73 Unlp.edu.ar [en línea], [consulta: 15 mayo 2024]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/66137>.
 20. **VACA, Diego.** Validación de datos satelitales de radiación solar utilizando mediciones terrestres para el Ecuador. [en línea] (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Escuela Superior Politécnica Nacional. Facultad de ingeniería mecánica, (Quito, Ecuador) ,2018 págs. 23-25. [Consulta: 15 mayo 2024]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19516?mode=full>.
 21. **XIE, Yu; et al.** Integration of a physics-based direct normal irradiance (DNI) model to enhance the National Solar Radiation Database (NSRDB). *Solar energy* [en línea], 2023 vol. 266, [consulta: 15 mayo 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112195>
 22. **XIE, Yu; et al.** “A Fast All-sky Radiation Model for Solar applications (FARMS): Algorithm and performance evaluation”. *Solar energy* [en línea], 2016 volumen. 135, págs.435–445 [consulta: 15 mayo 2024]. Disponible en: DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.003>





ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA
NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO

Fecha de entrega: 10/07/2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Viviana Araceli Flores Guananga
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Física
Título a optar: Física
 Dr. Arquímides Xavier Haro Velastegui Director del Trabajo de Titulación
 Dr. Celso Guillermo Recalde Moreno Asesor del Trabajo de Titulación