



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

**GENERACIÓN DEL AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO
(TMY) PARA LA PLATAFORMA SOLAR DE
HERMOSILLO (PSH)**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:

ANA SOPHIA ALTAMIRANO CARRANZA

DIRECTOR: RAFAEL E. CABANILLAS LÓPEZ

Hermosillo, Sonora

Septiembre, 2020

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

OFICIO DE APROBACIÓN DEL JURADO

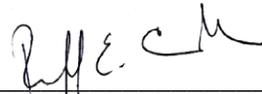
de la tesis presentada por:

ANA SOPHIA ALTAMIRANO CARRANZA

Esta tesis ha sido revisada por cada uno de los miembros del Jurado y por mayoría de votos la han encontrado satisfactoria.

25/09/2020

Fecha



Dr. Rafael E. Cabanillas López
Presidente

20/09/2020

Fecha



Dr. Fernando Hinojosa Palafox

Secretario

15/09/2020

Fecha



Dr. David Riveros Rosas

Sinodal Externo



16/09/2020

Fecha

Dr. Rodrigo Alonso Suárez
Sinodal Externo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ingeniería

Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química

AUTORIZACIÓN DEL EXAMEN DE GRADO

09 de Septiembre de 2020.

Por medio de la presente se hace constar que la estudiante **ANA SOPHIA ALTAMIRANO CARRANZA**, ha cumplido satisfactoriamente con los requisitos académicos correspondientes para la realización del Examen de grado del programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería.

Abraham Rogelio Martín García
DR. ABRAHAM ROGELIO MARTIN GARCÍA

COORDINADOR POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA:
INGENIERÍA QUÍMICA

RESUMEN

En el presente trabajo se describen los procedimientos para obtener un año meteorológico típico, o mejor conocido como "TMY" (por sus siglas en inglés) para la ciudad de Hermosillo, Sonora. Esta metodología fue propuesta en los Laboratorios Nacionales de Sandia en 1978 por Hall et al. La cual ha sido utilizada mundialmente por diversos investigadores obteniendo buenos resultados. Los datos recopilados para el uso de esta metodología fueron otorgados por dos estaciones ubicadas en la Plataforma Solar de Hermosillo (PSH), la cual se encuentra a 21 km de la ciudad de Hermosillo, Sonora, por un plazo de aproximadamente 10 años. Los parámetros utilizados fueron: Irradiancia solar global en plano horizontal, Temperatura de bulbo seco, Humedad relativa, velocidad y dirección de viento. Los datos meteorológicos fueron procesados, analizados y filtrados con el fin de conservar la mejor calidad y variabilidad de éstos. Se aplicaron ponderaciones distintas a cada uno de los parámetros con el fin de obtener TMY's para distintas aplicaciones. La metodología implementada en este trabajo obtuvo buenos resultados, ya que los TMY's demostraron buena representación con los datos de largo plazo, estos podrán ser usados en lugar de los valores promedios de largo plazo. Constituyendo una ventaja en la utilización de simulaciones de aplicaciones que utilicen datos meteorológicos o para evaluación de desempeño de ciertas aplicaciones. También se propone una nueva metodología utilizando solo la variable de dirección de viento y las frecuencias relativas, basados en la metodología de Sandia, esto con el fin de encontrar cual es la velocidad y dirección de viento más característico de la zona.

ABSTRACT

This paper describes the procedures to obtain a typical meteorological year, or better known as “TMY” for the city of Hermosillo, Sonora. This methodology was proposed at the Sandia National Laboratories in 1978 by Hall et al. which has been used worldwide by various researchers obtaining good results. The data collected for the use of this methodology was provided by two stations located in the Solar Platform of Hermosillo (PSH), for a period of approximately 10 years, this platform is relatively close, it has a distance of 21 km with Hermosillo, Sonora. The parameters used were: global solar irradiance in the horizontal plane, dry bulb temperature, relative humidity, wind speed and direction. The meteorological data was processed, analyzed and filtered in order to preserve the best quality and variability representing long-term data. Different weights were applied to each of the parameters in order to obtain TMYs for different applications. The methodology implemented leads to acceptable results, TMY can effectively be used instead of the long term averaged. The result presented in this work can facilitate the use of application simulations that use meteorological data or for performance evaluation of certain applications or systems. A new methodology is also proposed using only the wind direction variable and the relative frequencies, based on the Sandia methodology, in order to find the most characteristic wind speed and direction in Hermosillo, Sonora.

DEDICATORIA

Para mi hermosa madre.

*“A mother’s love is the fuel that enables a normal human being to do the impossible” –
Marion C. Garretty.*

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|----------------------------------|------|
| RESUMEN | V |
| ABSTRACT | V |
| TABLA DE CONTENIDO..... | VII |
| LISTA DE FIGURAS..... | XI |
| LISTA DE TABLAS | XV |
| NOMENCLATURA | XVII |
| AGRADECIMIENTO | XIX |
| CAPÍTULO 1..... | 1 |
| INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS | 1 |
| 1.1. Introducción | 1 |
| 1.2. Justificación..... | 4 |
| 1.3. Objetivo General | 5 |
| 1.4. Objetivos Específicos..... | 5 |
| CAPÍTULO 2..... | 6 |
| ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS..... | 6 |

| | |
|--|-----------|
| 2.1. Año Meteorológico Típico..... | 6 |
| 2.1.1. Origen Año Meteorológico Típico (TMY)..... | 7 |
| 2.1.2. Año meteorológico típico (TMY) en México..... | 10 |
| 2.1.3. Ventajas y desventajas del uso de TMY's..... | 13 |
| 2.1.4. Fuentes de datos TMY..... | 15 |
| 2.1.5. Ponderación de los parámetros solares y meteorológicos..... | 17 |
| | |
| CAPÍTULO 3..... | 20 |
| | |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 20 |
| | |
| 3.1. Recopilación y procesamiento de los datos | 20 |
| 3.1.1. Indicadores de desempeño..... | 29 |
| 3.1.2. Datos meteorológicos..... | 30 |
| 3.1.3. Temperatura del aire ambiente..... | 30 |
| 3.1.4. Humedad Relativa..... | 31 |
| 3.1.5. Velocidad de Viento..... | 34 |
| 3.1.6. Dirección de Viento..... | 38 |
| 3.1.7. Irradiación Solar Global..... | 39 |
| 3.1.8. Conformación de la serie de datos..... | 47 |
| | |
| 3.2. Metodología | 49 |
| 3.2.1. Elaboración del TMY's..... | 49 |
| 3.2.2. Selección de los meses típicos..... | 50 |
| 3.2.3. Filtros de persistencia..... | 57 |
| 3.2.4. Unión de los Meses Meteorológicos Típicos (TMM)..... | 63 |
| 3.2.5. Elaboración del TMYDDV..... | 64 |
| 3.2.6. Construcción del TMY..... | 67 |

| | |
|---|------------|
| CAPÍTULO 4..... | 68 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 68 |
| 4.1. Resultados TMY'S..... | 68 |
| 4.1.1. Análisis de datos diarios promedio-anales | 71 |
| 4.1.2. Comparaciones mensuales en gráficas de barras entre TMY's y los datos base. | 83 |
| 4.1.3. Indicadores de desempeño y diferencias mensuales de los parámetros contra los datos base | 92 |
| 4.1.4. Comparaciones anuales y promedios mensuales de los distintos TMY's | 100 |
| 4.2. Resultados TMDDV..... | 108 |
| CAPÍTULO 5..... | 112 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 112 |
| 5.1. Conclusiones..... | 112 |
| 5.2. Recomendaciones y comentarios finales | 115 |
| CAPÍTULO 6..... | 117 |
| BIBLIOGRAFÍA | 117 |
| ANEXOS | 120 |
| Anexo A: Procedimiento y tablas utilizadas para los filtros de persistencia en la obtención del TMY..... | 120 |
| Anexo B: Comparación gráfica de los datos base de largo plazo y TMY's | 134 |

Anexo C: Distribución diaria de irradiación solar, temperatura, humedad relativa de los datos base y distribución mensual de velocidad de viento de los datos base 138

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Ubicación de la estación 1 y en la plataforma solar de Hermosillo, extraído en https://goo.gl/maps/af8np2RyVijpCR9L6 el día 15 de septiembre del 2020..... | 22 |
| Figura 2. Imagen de de la estación 1, ubicada en la PSH..... | 23 |
| Figura 3. Imagen de algunos equipos utilizados en la estación 2, que se encuentra en la torre central de la PSH | 23 |
| Figura 4. Equipos y sensores encargados de medir la Humedad y Temperatura del aire seco. a) sensor de Humedad relativa, b) sensor de Temperatura y c) Instrumento meteorológico para medir temperatura y Humedad..... | 34 |
| Figura 5. Histograma de Weibull utilizado para los datos de velocidad de viento de la estación 2..... | 37 |
| Figura 6. Instrumentos de medición utilizados para medir la velocidad y dirección de viento en la PSH. (Izq.) Anemómetro ultrasónico utilizado en la estación 2, (Der.) anemómetro utilizado en la estación | 39 |
| Figura 7. Sombras detectadas para los datos de irradiancia (W/m^2) de la PSH en la estación 1..... | 41 |
| Figura 8. Comparación de índice de claridad para los datos de la PSH en la estación 1 antes (izq.) y después (Der.) de la corrección de los datos | 42 |
| Figura 9. Comparación de la irradiancia [W/m^2] para los datos de la PSH en la estación 1 antes (izq.) y después (Der.) de la corrección de los datos | 42 |
| Figura 10. Comparación de la irradiancia [W/m^2] para los datos de la PSH en la estación 1 antes (izq.) y después (Der.) de la corrección de los datos | 44 |
| Figura 11. Imagen del instrumento medida Piranómetro (Kipp & Zonen) para medir la irradiancia solar en la estación 1. | 44 |
| Figura 12. Gráfica de datos de radiación solar de estación 1 vs estación 2..... | 46 |
| Figura 13. Gráficas comparativas para cada uno de los parámetros: radiación, temperatura, humedad relativa y velocidad de viento, de CDF de largo plazo contra los CDF con el año con el valor más pequeño (el mejor), el año con el segundo valor más pequeño de CDF..... | 55 |
| Figura 14. Funciones de probabilidad acumulada de largo plazo para la variable de Temperatura de Enero, se muestran los percentiles de persistencia utilizados | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 15. Funciones de probabilidad acumulada de largo plazo para la variable de Irradiación global de enero, se muestran el percentil de persistencia utilizado. | 59 |
| Figura 16. Ejemplos de selecciones de los meses típicos para distintos TMY para los parámetros de irradiación diaria y temperatura promedio. Se encuentra graficado el mes seleccionado (TMM), junto con dos meses más atípicos (mayor valor de WFS) y el segundo mes mes seleccionado (TMM), junto con dos meses más atípicos (mayor valor de WFS) y el segundo mes más típico (WFS más bajo) en comparación con la CDF de largo plazo | 62 |
| Figura 17. Ejemplos de selecciones de los meses típicos para TMYE. Se encuentra graficado el mes seleccionado (TMM), junto con los meses de largo plazo..... | 70 |
| Figura 18. Irradiación Solar GHI horaria de TMYE, TMYs y datos base..... | 73 |
| Figura 19. Temperatura promedio diaria anual de TMYE, TMYT y datos base..... | 76 |
| Figura 20. Humedad relativa promedio diaria anual de TMYE, TMYT y datos base . | 79 |
| Figura 21. Humedad relativa y temperatura promedio diaria anual de TMYT | 79 |
| Figura 22. Velocidad de viento promedio diaria anual de TMYE, TMYV y datos base | 82 |
| Figura 23. Velocidad de viento y temperatura promedio diaria anual de TMYV | 82 |
| Figura 24. Gráfico de barras de comparación mensual de TMY's y datos base para irradiación solar..... | 83 |
| Figura 25. Gráfico de barras de diferencias de comparación de datos base con respecto al TMY para irradiación solar..... | 84 |
| Figura 26. Gráfico de barras de comparación mensual de TMY's y datos base para Temperatura..... | 85 |
| Figura 27. Gráfico de barras de diferencias de comparación de datos base con respecto al TMY para temperatura..... | 86 |
| Figura 28. Gráfico de barras de diferencias de comparación de datos base con respecto al TMY para temperatura..... | 87 |
| Figura 29. Gráfico de barras de diferencias de comparación de datos base con respecto al TMY para humedad relativa | 88 |
| Figura 30. Gráfico de barras de diferencias de comparación de datos base con respecto al TMY para velocidad de viento | 89 |
| Figura 31. Gráfico de barras de diferencias de comparación de datos base con respecto al TMY para velocidad de viento | 91 |

| | |
|--|-----|
| Figura 32. Comparaciones a escala mensuales de la variable de radiación solar de TMY contra las medidas de los datos base, en el eje x se encuentran las medias de los datos base y en el eje y las medias mensuales de los distintos TMY's (a-d)..... | 96 |
| Figura 33. Comparaciones a escala mensuales de la variable de temperatura promedio mensual de TMY contra las medidas de los datos base, en el eje x se encuentran las medias de los datos base y en el eje y las medias mensuales de los distintos TMYs (e-h)..... | 97 |
| Figura 34. Comparaciones a escala mensuales de la variable de humedad relativa promedio mensual de TMY contra las medidas de los datos base, en el eje x se encuentran las medias de los datos base y en el eje y las medias mensuales de los distintos TMYs (i-l)..... | 98 |
| Figura 35. Comparaciones a escala mensuales de la variable de velocidad de viento promedio mensual de TMY contra las medidas de los datos base, en el eje x se encuentran las medias de los datos base y en el eje y las medias mensuales de los distintos TMYs (m-p). | 99 |
| Figura 36. Rosa de los vientos para TMYDD..... | 110 |
| Figura 37. Rosa de los vientos para TMYDD..... | 111 |
| Figura 38. Gráfica TEMP mensual de TMYE; Figura 39. Gráfica HR mensual de TMYE | 134 |
| Figura 40. Gráfica VV mensual de TMYE; Figura 41. Gráfica GHI mensual de TMYE | 134 |
| Figura 42. Gráfica TEMP mensual de TMYS; Figura 43. Gráfica HR mensual de TMYS | 135 |
| Figura 44. Gráfica VV mensual de TMYS; Figura 45. Gráfica GHI mensual de TMYS | 135 |
| Figura 46. Gráfica TEMP mensual de TMYT; Figura 47. Gráfica HR mensual de TMYT | 136 |
| Figura 48. Gráfica VV mensual de TMYT; Figura 49. Gráfica GHI mensual de TMYT | 136 |
| Figura 50. Gráfica TEMP mensual de TMYV; Figura 51. Gráfica HR mensual de TMYV | 137 |
| Figura 52. Gráfica VV mensual de TMYV; Figura 53. Gráfica GHI mensual de TMYV | 137 |

| | |
|--|-----|
| Figura 54. Distribución diaria de la radiación solar global para el TMYS..... | 138 |
| Figura 55. Distribución de la temperatura promedio diaria con los datos base | 140 |
| Figura 56. Distribución de la Humedad promedio diaria para los datos base..... | 141 |
| Figura 57. Gráfica de caja de datos para la velocidad de viento de los datos base . | 142 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Valores de ponderación para los distintos parámetros utilizados en TMY | 18 |
| Tabla 2. Estadísticas de los datos de las estaciones en la PSH..... | 24 |
| Tabla 3. Estadísticas de los datos de Velocidad y Dirección de Viento para la estación 2 en la PSH..... | 27 |
| Tabla 4. Comparación de datos de radiación solar global diaria de la estación 2 contra la estación 1 de la PSH | 45 |
| Tabla 5. Variables y parámetros meteorológicos utilizados para la elaboración de los distintos TMY's..... | 51 |
| Tabla 6. Pesos utilizados en la elaboración de los TMY's..... | 54 |
| Tabla 7. Tabla de puntos cardinales y rangos de direcciones de viento..... | 66 |
| Tabla 8. Meses Meteorológicos Típicos del TMY | 69 |
| Tabla 9. Análisis de los datos promedios diarios de irradiación solar para TMYE y TMYs con los datos base | 72 |
| Tabla 10. Análisis de los datos promedios diarios de Temperatura para TMYE y TMYT con los datos base | 75 |
| Tabla 11. Análisis de los datos promedios diarios de Humedad Relativa para TMYE y TMYT con los datos base..... | 78 |
| Tabla 12. Análisis de los datos promedios diarios de Velocidad de viento para TMYE y TMYV con los datos base..... | 81 |
| Tabla 13. Comparación de los distintos TMYs para los valores mensuales de las variables de Temperatura del aire, Humedad relativa, velocidad de viento y de irradiación. | 94 |
| Tabla 14. Comparación de los valores anuales para radiación solar global para los distintos TMY's y los datos base. | 100 |
| Tabla 15. Comparación de los valores anuales y mensuales para temperatura para los distintos TMYs y los datos base. | 101 |
| Tabla 16. Comparación de los valores anuales y mensuales para humedad relativa promedio para los distintos TMYs y los datos base. | 102 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 17. Comparación de los valores anuales y mensuales para velocidad de viento promedio para los distintos TMY's y los datos base. | 103 |
| Tabla 18. Comparación de los distintos parámetros meteorológicos TMY's contra TMYE | 105 |
| Tabla 19. Promedio mensual de los distintos parámetros para cada mes del año, utilizando los TMY más representativo para estas variables. | 107 |
| Tabla 20. Meses Meteorológicos Típicos del TMYDD | 108 |
| Tabla 21. Valores de los percentiles de irradiación solar diaria (GHI) en MJ/m ² y de Temperatura promedio diaria (TEMP) en °C, utilizados para el filtro de persistencia de los meses candidatos. | 121 |
| Tabla 22. Valores de los factores de ponderación de los índices meteorológicos de TMYE para la estadística $\omega FSjy$ | 122 |
| Tabla 23. Valores más bajos de $\omega FSjy$, meses candidatos para formar parte del TMYE | 123 |
| Tabla 24. Valores de los factores de ponderación de los índices meteorológicos de TMYS para la estadística $\omega FSjy$ | 124 |
| Tabla 25. Valores más bajos de $\omega FSjy$, meses candidatos para formar parte del TMYS | 125 |
| Tabla 26. Valores de los factores de ponderación de los índices meteorológicos de TMYT para la estadística $\omega FSjy$ | 126 |
| Tabla 27. Valores más bajos de $\omega FSjy$, meses candidatos para formar parte del TMYT | 127 |
| Tabla 28. Valores de los factores de ponderación de los índices meteorológicos de TMYV para la estadística $\omega FSjy$ | 128 |
| Tabla 29. Valores más bajos de $\omega FSjy$, meses candidatos para formar parte del TMYV | 129 |
| Tabla 30. Filtrado de meses para la obtención del mes típico de TMYE | 130 |
| Tabla 31. Filtrado de meses para la obtención del mes típico de TMYS | 131 |
| Tabla 32. Filtrado de meses para la obtención del mes típico de TMYT | 132 |
| Tabla 33. Filtrado de meses para la obtención del mes típico de TMYV | 133 |

NOMENCLATURA

| | |
|--------|---|
| AC | Corriente Alterna |
| CDF | Función de Distribución Acumulada |
| CP | Corto plazo |
| CSP | Central Térmica Solar |
| DDV | Dirección de Viento |
| DNI | Radiación Directa Normal |
| FS | Estadístico de Finkelstein-Schafer |
| GHI | Radiación Global Horizontal |
| HR | Humedad Relativa |
| INIFAP | Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias |
| LP | Largo Plazo |
| MAD | Desviación Absoluta Media |
| MAPE | Porcentaje Medio del Error Absoluto |
| MBD | Desvío promedio |
| NREL | Laboratorio Nacional de Energía Renovable |
| PSH | Plataforma Solar de Hermosillo |
| RMSD | Raíz del error cuadrático medio |
| SENER | Secretaría de Energía |

| | |
|------|--|
| SMN | Servicio Meteorológico Nacional |
| SNL | Laboratorios Nacionales de Sandia |
| SSE | Meteorología de Superficie y Energía Solar |
| TEMP | Temperatura de bulbo seco |
| TMM | Mes Meteorológico Típico |
| TMY | Año Meteorológico Típico |
| VV | Velocidad de Viento |
| WFS | Valor ponderado del estadístico Finkelstein-Schafer (FS) |
| WMO | Organización Meteorológica Mundial |

AGRADECIMIENTO

Primeramente, a mi Tía Cecy, mi Tía Anita María, Raquel, Paola Padilla, Cruz Delia y Ana Lucía por siempre creer en mí, les deseo siempre todo lo bueno.

Aunque suene extraño, a mi perrita Jazz por ser mi compañera fiel desde que entre a la Universidad, me ha enseñado lo bueno y simple que es la vida; ser más consciente con el medio ambiente, además de lo importante que son todos los animales. Quisiera que fuera eterna.

Gracias a Conacyt, por el apoyo que me dio para continuar con éxito mis dos años de estudio, incluso su apoyo para el intercambio en Arizona.

Al Dr. Cabanillas López, por no solo ser mi asesor de tesis, sino también un asesor de vida, gracias por siempre alentarme, darme consejos y enseñarme por medio de sus acciones a ser una persona de calidad. Curiosamente recordándome que no todo es la escuela.

Al Dr. Rodrigo Alonso, por ser una motivación enorme en mi tesis, además de ser una pieza clave para poder llevarla a cabo. A pesar de estar tan lejos siempre me dio las mejores asesorías, consejos e impulso para terminar esta tesis. Me quedo sin palabras.

Ustedes son una gran inspiración de lo que quiero lograr ser algún día como Doctora.

Claro, a mi jurado de tesis el Dr. David Riveros Rosas, por todos los consejos que dio a lo largo del seminario, que fueron de mucho valor.

Al Dr. Hinojosa, que fue la base para que se hiciera esta tesis; gracias también por ser un gran maestro tanto en licenciatura como en la maestría. Todos sus aportes fueron muy importantes para mí.

A las personas involucradas en la PSH, especialmente a M.C. Ramiro Calleja y el Dr. Pablo Sosa, que siempre tuvieron la mejor disposición y me asesoraron en todo momento.

Un especial agradecimiento al Dr. Eduardo Devora ya que, por medio de su ejemplo aprendí bastante, tanto a nivel personal como académico.

Por supuesto, gracias al Dr. Abraham Martín, por hacer la maestría e incluso la licenciatura mucho más sencilla y llevadera, siempre ha tenido la mejor disposición tanto conmigo como con mis compañeros, me siento muy afortunada de tenerlo como coordinador.

A mis amigos de la maestría, que son muchos por lo cual no podré mencionarlos a todos, también a los que he conocido en el intercambio en la Universidad de Arizona, siempre llevaré enormes experiencias y aprendizaje de todos ellos.

También muchas gracias a las personas que conforman el laboratorio de energía, como Noé y Aracely, por ser un excelente equipo de trabajo, del cual estoy muy orgullosa, espero que ellos vean en mí en alguien con quien también pueden contar.

No podía faltar: a mi papá y hermano Juan, mil gracias a Dios por ellos, por ser estos hombres excepcionales en mi vida, que con su ejemplo y sus acciones me han motivado a ser lo que soy hoy.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

En los últimos años, el monto de las inversiones en fuentes renovables fue considerablemente mayor que en periodos previos (SENER,2019). La secretaria de Energía (SENER) que es la encargada de la administración y regulación de los recursos energéticos de México, ha reportado que este, tiene un gran potencial para el desarrollo de centrales fotovoltaicas y generación distribuida, debido a que la mayoría del territorio nacional percibe más de 5 kWh/m²/día (Riveros-Rosas et al, 2015). Esto permitió incremento la producción de energía, a través del recurso solar en 2018, con un 58.2% respecto al año anterior (Secretaria de Energía, 2019). Especialmente la región de Sonora es de los estados que más energía solar perciben, junto con Baja California Sur, reportando aproximadamente 6.2 kWh/m²/día en promedio anual. Esto fue publicado por los mapas solares elaborados por la empresa SOLARGIS (SOLARGIS, 2019).

Es por esto se han llevado a cabo proyectos y estudios para instalación de plantas generadoras de electricidad o de calor en Hermosillo, Sonora (Roberto, 2019). Todo proyecto de aplicaciones de fuentes renovables, y específicamente de energía solar, requieren de información in situ de los principales parámetros climatológicos. De la calidad de estos datos depende en buena medida el óptimo desempeño de la planta y por ende de su productividad tanto energética como económica.

Para diseñar las plantas con la capacidad correspondiente de generación energética, es necesario realizar simulaciones horarias que predigan el comportamiento, diario-estacional- anual, a largo plazo, ya que la viabilidad técnica y económica del proyecto tiene que ser estudiado para el retorno económico de la planta(Chan, 2011).

Algunas aplicaciones que existen son utilizadas para el cálculo de plantas fotovoltaicas y de plantas térmicas solares estudios preliminares para aplicaciones eólicas, simulación de equipos de procesos industriales como torres de enfriamiento, hornos de secado, torres de destilación, etc. Uno de los mayores usos/aplicaciones es la realización de simulaciones térmicas y de edificios. Todas estas aplicaciones dependen fuertemente de las condiciones climatológicas (Bre F. et al., 2017).

Los parámetros climatológicos principales para estos estudios son: la radiación solar, la temperatura ambiente o de bulbo seco, la humedad relativa, la velocidad y dirección del viento, pero las variables utilizadas dependerán del tipo de proyecto.

Ante la necesidad de contar con información confiable, de calidad y con criterios de representatividad local, en 1978, Hall et al. desarrollaron para Estados Unidos una base de datos que buscaba construir una herramienta para el aprovechamiento de la radiación solar. Fue así como propusieron una estructura base de este conjunto de datos meteorológicos, y al conjunto de estos datos se le llamaron: "Año Meteorológico Típico" TMY, (Typical Meteorological Year, por sus siglas en inglés). Basados en el método estadístico de Finkelstein-Schafer (FS), el cual es un método estadístico utilizado para medir la cercanía del valor evaluado con las funciones de distribución acumulada (CDF), (Cumulative Distribution Function, por sus siglas en inglés). Al estadístico de FS también se le conoce como una medida de la "tipicidad" de los datos, ya que es una medida de similitud entre la CDF de corto plazo y la CDF de largo plazo (Coc & Ogoloma, 2011; Pissimanis et al., 1988). Este formato procedimiento fue reproducido en diferentes lugares y países del mundo y en pocos años se convirtió en una técnica de referencia a nivel mundial. (Chan A., 2011)

Un año Meteorológico Típico (TMY), reúne la información necesaria para simular emprendimientos humanos con condiciones meteorológicas típicas de una región en específico. Es necesario también contar con una estadística de datos de largo plazo para cada variable considerada. La metodología más utilizada y recomendada actualmente es la desarrollada por los Laboratorios Sandia (EEUU) y luego mejorada por el Laboratorios Nacional de Energía Renovable (NREL, por su siglas en inglés, National

renewable Energy Laboratories). Para la aplicación de la metodología se recomienda contar como mínimo con diez años de datos (Kambezidis H. et al., 2020; Sawaqed N. et al., 2005; Wilcox S. & Marion W., 2008). Sabemos que las condiciones climáticas varían año con año, y en cierta medida, de década a década debido a la variabilidad inherente del clima. El cambio climático a largo plazo provocado por causas humanas o naturales también puede introducir tendencias en las condiciones de diseño (Hubbard K. et al., 2004). Esto también depende del clima del lugar. En nuestro caso, según la clasificación climática de Köppen-Geiger, la región de Sonora corresponde a la categoría BWh, lo que es un clima árido y cálido, es decir, que tiene la característica de ser una zona desértica con un clima seco, lo cual indica poca variabilidad año con año, excepto para condiciones extremas que pudieran ocurrir.

La Plataforma Solar de Hermosillo (PSH), es una instalación de la Universidad de Sonora ubicada a 21 kilómetros de la Cd. De Hermosillo, donde empresas, académicos y dependencias gubernamentales se encuentran trabajando en conjunto para la innovación, desarrollo y evaluación de tecnología solar avanzada. En la PSH se registra en forma continua la radiación solar desde 2011, utilizando una estación climatológica y solarimétrica automatizada.

El presente trabajo tuvo como objetivo generar distintos TMY's para Hermosillo, Sonora, que pudieran ser utilizados para distintas aplicaciones. Los datos que conformaron la base de datos para la obtención del TMY fueron los obtenidos por las estaciones de medida de la PSH, a los cuales se tuvo que realizar un procesamiento y filtrado de calidad. También, se propuso una nueva metodología para el desarrollo de un TMY de viento, basada solamente en el parámetro de dirección de viento y así, adquirir un TMY que sea representativo para esta variable.

1.2. Justificación

En la industria para cualquier sitio de desarrollo de proyectos de energía solar planificado se necesita de la evaluación de desempeño de estos y por lo tanto datos de irradiación solar confiables. Datos complementarios como los de temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y dirección de viento, son importantes también, para la correcta estimación y evaluación de este tipo de proyectos. Debido a que el TMY reúne información meteorológica típica de una región en específico, de su utilización se puede obtener conclusiones de diseño para las aplicaciones, principalmente de energía solar, y así estimar el retorno económico. La incertidumbre en los datos como los de irradiación solar, son el principal factor que afecta el riesgo financiero de la inversión (Gueymard C., 2014) La disminución del riesgo se puede lograr al momento de caracterizar de forma adecuada la disponibilidad y variabilidad del recurso, como sucede en este caso con la metodología de Sandia. Es por eso, que el TMY utiliza la mayor cantidad de datos disponibles, para así reducir la incertidumbre en la elección de la serie anual típica.

Se puede lograr una disminución de la incertidumbre significativa cuando se obtienen datos medidos en el lugar y con instrumentos de buena calidad, en este caso se obtuvieron estos datos de la Plataforma Solar de Hermosillo (PSH), donde se cuenta con equipos de buena calidad y técnicos especializados que mantienen los esfuerzos para obtener valores de baja incertidumbre, haciendo evaluaciones periódicas y los mantenimientos adecuados. Esto sirve para generar una mayor confiabilidad para los usuarios que hagan uso de estos datos (González-Cabrera et al, 2018).

1.3. Objetivo General

Generar el Año Típico Meteorológico para la Plataforma Solar de Hermosillo basado en la metodología de los Laboratorios Nacionales de Sandia utilizando los datos medidos del lugar.

1.4. Objetivos Específicos

- Estudio del estado del arte de las aplicaciones de los años meteorológicos típicos
- Recopilación, ordenamiento y procesamiento de los datos
- Selección y construcción de la base de datos de donde se obtendrá el año típico
- Implementación de la metodología de Laboratorios Nacionales de Sandia en hojas electrónicas y MatLab
- Obtención del TMY para la PSH usando la radiación solar como parámetro principal
- Obtención de otros TMY's con ponderaciones distintas para aplicaciones específicas.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

2.1. Año Meteorológico Típico

Un año meteorológico típico (TMY) es un conjunto de variables meteorológicas con resolución 10-minutal u horaria para un año en una ubicación en particular. Los años típicos normalmente incluyen información de temperatura, humedad relativa, presión, viento y radiación solar, entre otras variables. Se trata de un conjunto de meses de datos reales que son seleccionados de años individuales, para después integrarse a un año completo. El TMY permite simular el desempeño y retorno económico de aplicaciones, principalmente de energía solar. Son una herramienta de uso frecuente para la simulación de emprendimientos, y son requeridos por los programas computacionales que realizan la simulación y por las normativas para la evaluación o etiquetado de bienes comerciales. El TMY refleja la información característica del clima de la locación analizada, incluyendo sus valores medios de largo plazo y la variabilidad intradiaria. La metodología utilizada para la elaboración del TMY es conocida como metodología de SANDIA, debido a que fue desarrollada por los SANDIA National Laboratories en Estados Unidos, en sus versiones TMY1, TMY2 y TMY3 (Wilcox & Marion, 2008). Existen otras metodologías comúnmente usadas para obtener series anuales típicas o representativas de un lugar, como por ejemplo Año de referencia de prueba o mejor conocido como TRY (Test Reference Year, por sus siglas en inglés), Año de Referencia de Diseño (DRY, por sus siglas en inglés, Design Reference Year), Año Meteorológico para cálculos de energía (WYEC, por sus siglas en inglés, weather year for energy calculations), entre otros, estos formatos fueron creados con el fin de obtener un conjunto de datos climáticos para representar patrones climáticos más típicos que solo un año

promedio, pero no representaban la viabilidad, solo medias de largo plazo por lo cual estas metodologías han sido muy poco utilizadas y reportadas (Kambezidis et al., 2020).

De todos estos diversos tipos de bases de datos de años típicos, los más utilizados son los TRY y TMY (Wong et al., 2012). Una de las principales desventajas que tiene el TRY es que elige un sólo año del conjunto de años posibles. Esto requiere que el año seleccionado sea típico en toda su extensión, lo que puede no ser cierto, y por tanto es mejor la granularidad mensual de la metodología SANDIA, es decir, el año seleccionado puede no considerarse lo suficientemente bueno para representar condiciones climáticas medias que son prevalecientes en un periodo de largo plazo (Ohunakin O. et al., 2013). En otro estudio las simulaciones de energía en edificios utilizando datos meteorológicos TRY fueron menos confiables para representar condiciones históricas o promedios de largo plazo que el TMY (Chan A. et al., 2006). Es por este motivo que ASHRAE recomendó que los datos en formato TRY de preferencia no sean usados para simulaciones de comportamiento térmico o energético de edificios, y por lo tanto simulaciones de aplicaciones solares ya que la principal variable para obtener el TRY es la temperatura. (Chan A. et al., 2006; Hall et al., 1978). Como resultado diversos investigadores recomiendan que la mejor representación de los datos meteorológicos típicos es el TMY, además de la simplicidad de su uso con respecto a otros métodos ya antes mencionados, es por eso que a nivel mundial su uso ha sido hasta hoy en día ampliamente utilizado, principalmente en simulaciones de energía (Huld T. et al., 2018; Kambezidis H. et al., 2020; Yilmaz S. & Ekmekci I., 2017).

2.1.1. Origen Año Meteorológico Típico (TMY)

La necesidad de contar con TMY's surgió en 1970 debido a las limitaciones de potencia informática y almacenamiento, que se requerían principalmente para simulaciones de energía de edificios y sistemas de calentamiento de agua. La primera edición de TMY se basó en los datos climatológicos de 229 ubicaciones en los Estados Unidos, recolectados entre 1948 y 1980. La segunda edición de TMY se llama "TMY2". Esta se basa en la recopilación de los datos de 239 estaciones entre los años 1961 y 1990. Los datos del TMY2 incluyen lecturas de "agua precipitable" que es importante para predecir el enfriamiento radiativo. La tercera, y última colección de TMY es el TMY3; basado en

1020 ubicaciones de Estados Unidos, incluyendo a Guam, Puerto Rico y las Islas Vírgenes, usa datos registrados del 1991 al 2005 para la mayoría de las localidades y algunas otras en periodos de 1976 al 2005 (Wilcox S. & Marion W., 2008).

La metodología que se utiliza principalmente en la obtención del TMY es la denominada Metodología de Sandia, se le da ese nombre debido a que fue creado en los Laboratorios Nacionales de Sandia en 1978 por Hall et al. Existen otras metodologías como lo son el método de Danish realizado por Anderson en 1977(Lund H., 1982) y el método de Festa-Ratto en 1993 (Festa R. et al., 1988). La diferencia principal entre estos tres métodos es que los últimos dos no utilizan factores de ponderación en los parámetros utilizados. Además, la metodología de Festa-Ratto requiere un tratamiento estadístico complicado de los datos. El método de Sandia es un procedimiento más sencillo, además de brindar la oportunidad de seleccionar los factores de ponderación para los parámetros involucrados, dependiendo de la aplicación a la que se destine, por esta razón la metodología Sandia es la que se utiliza habitualmente. (Argiriou A. et al., 1999; Bre F. & Fachinotti V., 2016; Kambezidis H. et al., 2020; Lhendup T. & Lhundup S., 2007; Skeiker K., 2007).

La metodología de Sandia tiene un enfoque básicamente empírico que selecciona meses individuales de diferentes años que ocurren en cierto período. Partimos del ejemplo que, si se tienen los diez años que se piden como mínimo en la metodología SANDIA, se examinan esos diez años y se selecciona el que se considere el más típico según el algoritmo de TMY. Los otros meses se tratan de manera similar, para después tener los doce meses típicos (TMM, Typical Meteorological Months, por sus siglas en inglés) y así formar el año completo. Debido a que estos meses provendrán de años diferentes, se tendrá que hacer una suavización de estos datos en las interfaces de unión. Habitualmente se utilizan cuatro horas al inicio y cuatro horas al final de cada mes concatenado, es decir un total de ocho horas de suavización de datos (Kambezidis H. et al., 2020).

La característica principal de esta metodología es que se utilizan las variables que son consideradas las más importantes para aplicación de simulaciones de energía, que son esencialmente: radiación global horizontal, temperatura de bulbo seco, humedad

relativa, velocidad de viento y dirección de viento. Todas estas variables tienen mayor o menor peso en el armado del TMY dependiendo del uso pretendido para el TMY (en qué tipo de simulaciones se utilizará), pero en general se utiliza un valor de ponderación más alto para Radiación Solar, después Temperatura, seguido de Humedad Relativa y por último Velocidad y/o Dirección de viento. La metodología se explicará más a detalle en el capítulo 4 (Sawaqed N. et al., 2005; Wilcox S. & Marion W., 2008). La decisión final en cuanto a la adecuación del TMY a cada aplicación particular quedará a criterio de los usuarios que lo utilicen Dependiendo de la importancia que se les dé a las variables, será su rango de aplicación. No obstante, en distintos estudios se ha encontrado que a pesar de que se le da una mayor ponderación, por ejemplo, a la radiación solar, también puede ser representativas para temperatura, humedad o inclusive viento, ya que todos estos parámetros son incluidos en la selección (Suárez A. et al., 2019; Sawaqed N. et al., 2005).

Por esta razón es que el TMY ha sido aceptado mundialmente, ha sido desarrollado en muchos países, por ejemplo: Estados Unidos de América, Turquía, Grecia, Bélgica, Italia, España, Canadá, Siria, Japón, China, Chipre, Arabia Saudita, Hong Kong, Macao, Nigeria, Uruguay y Argentina (Alonso-Suárez R. et al., 2019; Bre F. & Fachinotti V., 2014; Ohunakin O. et al., 2013; Ohunakin O. et al., 2018).

Por otro lado, es claro que, existen algunas aplicaciones donde el TMY no es utilizable, como, por ejemplo, para estudios de peores casos o comportamientos extremos, tampoco para simular el comportamiento de sistemas bajos fenómenos de tiempo severo.

También se han realizado algunos estudios comparando el TMY con diferentes tipos de clima como en el 2007 por Lhendup et al. y de nuevo en 2015 para lugares en Turquía (Pusat S. et al., 2015) donde se ha demostrado en ambos estudios que los TMM y por tanto los TMY, tienden a mostrar un acuerdo razonablemente bueno con los datos a largo plazo en términos de la distribución de función acumulada con respecto a las variables climatológicas seleccionadas. Los resultados también mostraron que la diferencia entre los TMY y los datos a largo plazo es pequeña para las ciudades de donde son provenientes los datos. Además, concluyeron que es muy necesario los datos

medidos del lugar, porque si estiman el TMY para ciudades cercanas, las diferencias entre el TMY y los datos a largo plazo aumentan, principalmente los errores aumentan para parámetros como humedad relativa y velocidad de viento, ellos estiman que puede deberse a la orografía del lugar, por lo cual consideran mejor limitarse a los utilizar el TMY para los lugares en donde fueron recopilados los datos meteorológicos.

2.1.2. Año meteorológico típico (TMY) en México

En México existen muy pocos trabajos sobre TMY. De los primeros trabajos que se tiene registro es en 1997 donde se realizó un TMY para Hermosillo, Sonora (Hinojosa F., 1997). En el trabajo del Dr. Hinojosa, se tenían datos de treinta años para humedad relativa, velocidad de viento y temperatura de bulbo seco proporcionados por Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. El problema consistió que no existían registros de otras variables climatológicas para periodos extensos de tiempo, por lo cual se analizó el generador de datos climatológicos TRNSYS® (programa de simulación transiente). Este generador está diseñado para generar datos horarios a partir de los medios mensuales de las variables climatológicas y además para obtener un año representativo de los valores de largo plazo (TMY). Este software utiliza una estructura modular, la cual es conformada por una variedad de “types”. Los types son el elemento que permite la integración de información. El type 54, que es el utilizado para la generación de datos horarios climáticos, utiliza un modelo estocástico basado en leyes de distribución para el promedio de largo plazo y un modelo auto regresivo de primer orden para la variación diaria (David M. et al., 2014). El generador de clima requiere un archivo de datos con promedios mensuales de radiación (MJ/m^2), humedad (Kg agua/Kg de aire seco) y temperatura ($^{\circ}C$) del sitio de interés. Esto nos brinda una ventaja para sitios donde solamente existe información climática de forma diaria, o en su defecto, datos mensuales, reportados de manera oficial.

Para el caso de radiación global, no se contaban con datos promedios mensuales de largo plazo para alimentar al simulador, por lo cual se realizaron estimaciones en base al número de horas de insolación, utilizando la ecuación de Angstrom-Prescott.

En este trabajo se realizó una comparación estadística de los datos generados y los medidos de la estación climatológica automatizada de la Universidad de Sonora que abarcaba un período de dos años (1993-1995) y se mostraron estos resultados: los valores horario promedio mensuales de temperatura de bulbo seco generados con TRNSYS tienen una desviación promedio anual (RMSE) de 7.0% y un error promedio anual (MBE) de -0.25%, así como una desviación promedio de 4.7% y un error promedio de 1.5% en los meses más cálidos que son: mayo, junio, julio, agosto y septiembre.

Los valores horarios promedios mensuales de radiación solar generados, tiene una desviación promedio anual de 13.2% y un error promedio anual de -.04%, así como una desviación promedio de 13.1% y un error promedio de -3.4% en los meses más cálidos que son: mayo, junio, julio, agosto y septiembre.

El segundo trabajo recuperado (Alberto J. et al., 2016) habla sobre realizar una simulación dinámica por el programa TRNSYS para colectores solares de placa plana de tubos evacuados, esto lo hacen con el fin de determinar la inclinación óptima de mayor rentabilidad para la ciudad de Durango. Para realizar una correcta simulación hablan de la importancia de los datos y de que por esa razón eligieron los datos de TMY. En este caso también hacen mención de que consiguieron los datos del generador de clima de TRNSYS, que es el modelo que tiene capacidad de leer datos de intervalos regulares de tiempo a partir de un archivo de datos climatológicos externo. Este modelo les ayudo a interpolar datos, inclusive para radiación solar para superficies inclinadas, pero en este trabajo no definen de donde se obtuvieron los datos o que cantidad de datos tenían, por lo cual no podemos conocer la incertidumbre de los datos obtenidos, y por tanto de la simulación, ya que no hacen comparaciones con datos de largo plazo del lugar.

También se tiene registro de otro trabajo en realizado en Baja California Sur (Armendariz-Lopez J. et al., 2016) sobre el costo del ciclo de vida de las tecnologías en edificios comerciales en Baja California. Utilizaron los archivos de TMY2 para la evaluación de los recursos solares que fue generado a través del software de METEONORM®. Este software procesa los archivos de latitud, longitud, zona horaria, altura sobre el nivel del mar y además de la clasificación territorial de la región. Luego, que ya se tenían estos datos se utilizó el programa TRNSYS para determinar el recurso

solar de Mexicali, basado en el modelo de irradiación difusa de Pérez para superficies inclinadas. Los datos que son proporcionados por METEONORM son de estaciones cercanas ya que, contiene información de más de 7700 estaciones meteorológicas distribuidas por todo el mundo, este programa permite ser utilizado también si el sitio de interés no aparece por defecto, el usuario puede ingresar una ubicación en el mapa y el software es capaz de obtener información de lugar más cercano que se busca analizar, y combinando datos satelitales que se encuentren disponibles (Botpaev R. et al.; Radhi H., 2009); se menciona también que si no hay datos de información meteorológica cercana al sitio que se encuentre en la base de datos de METEONORM, se tendrá que buscar la utilización de datos satelitales, y/o datos medidos de propiedad del usuario (González M. et al., 2017). Es importante mencionar que en dicho trabajo, no se hace referencia a cuáles son la totalidad de los datos que fueron proporcionados, no se menciona si fueron datos medidos en tierra o satelitales y la calidad de estos, cual fue el grado de interpolación, la incertidumbre o cualquier estadística que nos indique el grado de confianza de los datos obtenidos por este programa, por lo cual se necesita saber más a detalle sobre la calidad de estos datos y hacer una comparación de éstos, así por tanto tener un mayor nivel de confianza en los datos proporcionados en el simulador.

Por último, en 2017 en la XLI semana Nacional de Energías Solar en Guadalajara, México, se presentó el siguiente trabajo que habla sobre la comparación de datos climatológicos de sistemas térmicos de cuatro ciudades que se encuentran en Durango, México; los sitios son específicamente Canatlán, Durango, Nuevo ideal y Torreón (González et al., 2017). Se compararon los datos del TMY obtenidos por el software Meteororm v7.1® y los obtenidos mediante un generador de clima, de un programa de simulación dinámica (TRNSYS 17). Los datos fueron obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agrícolas (INIFAP), y se utilizaron datos de radiación solar satelitales obtenidos del sitio Meteorología de Superficie y Energía Solar (SSE, por sus siglas en inglés, Surface Meteorology and Solar Energy) de la NASA (NASA,2016). Los datos de la NASA de radiación fueron de periodos de 1983 a 2005, pero tenían ciertas desventajas porque no se contaba datos con la altitud de los sitios consultados, por lo cual se utilizaron de los sitios más cercanos con estas localidades.

Para Meteonorm, se ingresaron las ubicaciones de las estaciones consideradas, tanto del SMN como del INIFAP, para obtener el TMY de los sitios estudiados. Al final en este trabajo se concluye que los datos de TMY obtenidos por el programa TRNSYS comparados con METEONORM, tienen un valor cercano en las estaciones de Durango y Torreón debido a que las estaciones que toma el software METEONORM son de estaciones cercanas y cuando se presentan diferencias significativas es debido a que las estaciones tomadas por el simulador de METEONORM no cuenta con estaciones cercanas a la zona de interés (Canatlán y Nuevo Ideal). Pero, de igual manera, no se menciona la cantidad de datos que se tenían, cuantas interpolaciones fueron necesarias, no hubo una comparación con los datos de largo plazo, es importante destacar también que los datos de radiación de este trabajo contaban con un grado de incertidumbre no estudiado (González et al., 2017).

En conclusión, todos estos trabajos no cuentan con medición de calidad en el sitio, por lo que no es posible evaluar la incertidumbre de la información que ha sido previamente utilizada. Es por esto, que se necesita de información, sobre todo de radiación solar que nos asegure la baja incertidumbre por medio de estadística que sea suficiente

2.1.3. Ventajas y desventajas del uso de TMY's

Como hemos visto anteriormente el TMY es una herramienta muy útil porque contienen información meteorológica de un año completo que son representativos de clima de una región. Esto significa que puede ser usado en distintas aplicaciones, tantos estudios climatológicos, aplicaciones en energía solar, cálculos de eficiencia energética en edificios y en aplicaciones vinculadas al sector agropecuario. Una de sus más grandes ventajas es poder utilizar esta herramienta sin necesidad de incorporar grandes cantidades de datos en los modelos de simulación. Además, un TMY difiere de un año meteorológico promedio, por lo cual no elimina la variabilidad natural que existe en los parámetros. Si comparamos el año meteorológico promedio, que básicamente consiste en realizar el promedio de todos los años que se tenga, entonces tendremos algunas similitudes, como por ejemplo que ambos no usan condiciones extremas, y contienen el mismo número de parámetros, pero el significado entre ellos es diferente. Como mencionamos los valores suavizados alejan los comportamientos a la realidad.

Pero a pesar de las ventajas que tiene el TMY también se tienen algunas desventajas. Básicamente los conjuntos de datos de TMY se generan definiendo primero sus Meses Típicos Meteorológicos (TMM, Typical Meteorological Months, por sus siglas en inglés) a partir de un proceso de ponderación de varios parámetros meteorológicos y de radiación solar y luego juntándolos para formar lo que llamamos TMY. . Pero, los TMY no proporcionan información sobre los eventos extremos, además de no representar condiciones necesariamente reales en un momento dado debido a la forma en que se crearon. Este hecho hace que no sea posible a partir de un TMY realizar cálculos probabilísticos requeridos por las instituciones financieras que planean el flujo de dinero a largo plazo para un proyecto, donde se necesita información de los mejores y peores casos para análisis de riesgo. Es decir, el TMY nos proporcionará una idea general del comportamiento, pero no muy específica si se quiere realizar un análisis de inversión muy detallado. Esto pasa debido a que los datos incorporados en el TMY expresan esencialmente el percentil 50 de una expectativa de valor del parámetro. Es por lo que también al conjunto de datos del TMY se les nombra en algunos artículos como P50. Hoy en día existen metodologías que son capaces de acoplar los datos TMY para este tipo de situaciones, que son los TMY P90 y TMY PXX, creados por la empresa SOLARGIS (Cebecauer & Suri, 2015).

Otro inconveniente que hay en el conjunto de datos de TMY, es la fuente de estos datos. La recomendación de la metodología Sandia es utilizar datos medidos en tierra, para tener la menor incertidumbre posible. Hoy en día ya se pueden conseguir datos de información satelital confiable, acoplándola a modelos de datos medidos en tierra (Alonso-Suárez, 2017). En nuestro caso utilizamos datos medidos en tierra, lo cual nos da la menor incertidumbre posible, pero tenemos la desventaja de que, por ser datos medidos en tierra, con equipos que a pesar de tener una excelente calidad, requieren de mantenimiento y revisiones constantes para asegurarse de que el equipo este en su funcionamiento óptimo. Pero, aún que se realice las medidas adecuadas para tener la mayor cantidad de datos posibles, siempre existen huecos en los datos que deben ser rellenados, también conocidos como "Gaps". Las incorporaciones de estos datos deben asegurarse de mantener técnicas estadísticas adecuadas. Esto dependerá de la variable, del lugar, y de la cantidad de datos que hagan falta, por lo cual no es una tarea sencilla

y bastante laboriosa, que llega a tomar bastante tiempo. Para nuestro caso particular, tomo ocho meses incorporar los datos que hacían falta, porque buscamos tener la mejor calidad de datos como lo indica el TMY. Aparte de técnicas estadísticas, para el llenado de huecos de datos faltantes se pueden utilizar algoritmos de simulación, información satelital o también datos de estaciones cercanas. Para el caso de velocidad de viento, si se buscan estaciones cercanas, hay que asegurarse que las alturas sean parecidas o buscar algoritmos o fórmulas que puedan utilizarse para adecuar correctamente esta variable (Alonso-Suárez et al., 2019; Kambezidis et al., 2020).

La razón de que nos detuviéramos tanto tiempo en esta parte fue para asegurar la buena calidad en nuestra base de datos, es decir tener un set de datos de TMY con una incertidumbre baja, creando así, un conjunto de datos valioso y conciso para reflejar las características del clima de nuestra localidad, en este caso, Hermosillo, Sonora.

2.1.4. Fuentes de datos TMY

El conjunto de datos utilizados para formar el TMY pueden provenir de diversas fuentes; esta selección depende principalmente de la disponibilidad de datos, la cobertura temporal, calidad e integridad de estos datos. Las fuentes de donde provienen estos datos son principalmente:

- Datos solares y meteorológicos (conocidos también como variables complementarias, ejemplo: Temperatura, Humedad Relativa, Velocidad de viento, etc.). medidos en tierra
- Estimaciones solares de modelos satelitales y meteorológicas de modelos meteorológicos numéricos de atmósfera.

Se recomienda tener una combinación de ambos datos para obtener mejores resultados (Kleissl, 2013). Es preferible obtener los datos medidos en tierra, esto es porque los equipos son de alta precisión y con un correcto mantenimiento, la precisión de estos datos es mejor que los datos modelados, pero en algunos casos las mediciones a menudo se deterioran por el mantenimiento insuficiente de los sensores y la ausencia del control de calidad. Para el uso de los datos medidos en tierra tenemos que asegurarnos que éstos tengan una calidad controlada. Un factor que debemos

considerar en los datos medidos en tierra es que los equipos son costosos y su mantenimiento a veces no es posible, por eso los datos a veces son limitados, y pueden no tener datos de una cobertura de tiempo suficiente y continua. (Cebecauer & Suri, 2015).

La elección para los datos que se utilizan para construir el TMY es un poco limitada, pero deben considerarse estos cuatro criterios que se mencionan en el manual del TMY3(Wilcox & Marion, 2008):

La elección para los datos que se utilizan para construir el TMY es un poco limitada, pero deben considerarse estos cuatro criterios que se mencionan en el manual del TMY3(Wilcox & Marion, 2008):

- Representatividad geográfica: Estos datos deben ser representativos del clima o el tiempo de la región. Estos datos pueden ser medidos de la siguiente manera:
 - Datos medidos en tierra: Si la orografía del lugar no es muy cambiante y el terreno no tiene una altura muy elevada, el clima puede ser representativo en un radio de pocas decenas de kilómetros. En cambio, si hay montañas a los alrededores, cerca del mar o agua, centros industriales/urbanos, o en un paisaje que cambia rápidamente, esta representatividad puede ser buena a unos cuantos kilómetros.
 - Radiación Solar basada en información satelital: Esta puede ser representativa a un área de una celda de cuadrícula de un tamaño de 3 a 6 kilómetros. Abarcando hoy en día hasta 30 kilómetros de terreno.
 - Características meteorológicas: Como Temperatura, Humedad, Velocidad de viento, etc. que son derivados de los modelos meteorológicos numéricos que éstos pueden ser representativos en una celda de cuadrícula de un tamaño de 30 o más kilómetros y puede mejorarse con modelos aún más detallados.

- Representatividad temporal: Se recomienda que la representatividad temporal de datos sea de al menos 10 años. Esto es con el fin de reducir la incertidumbre de la variabilidad climática interanual. Sería lo óptimo tener alrededor de 15 a 20

años, o inclusive más (30 años son los que son recomendables para poder hablar de información meteorológica adecuada o clima según la WMO (World Meteorological Organization, por su siglas inglés, Organización Meteorológica Mundial); todos los parámetros meteorológicos, dependiendo del me, deben contar con las misma cantidad de datos.

- Paso de tiempo: Lo común es utilizar dato horario, pero el paso del tiempo recomendable es de 1 a 15 minutos, especialmente para el modelado de simulaciones de Central Térmica Solar (CSP, por sus siglas en inglés, Concentrated Solar Power).
- Importancia de la ponderación de los parámetros: Este es uno de los puntos más importantes de la metodología de Sandia, ya que se considera cual será el uso final de estos datos, lo que permite controlar que parámetros (GHI, HR TEMP, etc.) representen una pérdida mínima a costa de una menor representatividad de otros parámetros que sean considerados con menos afectación para la aplicación a la que se destine el uso de estos datos. En conclusión, TMY se puede ajustar para aplicaciones específicas.

2.1.5. Ponderación de los parámetros solares y meteorológicos

El uso del TMY es principalmente en la simulación de energía solar, es por esto que la mayoría de los trabajos tiene una ponderación más alta para irradiación solar en comparación con los otros parámetros. El parámetro más utilizado para la representación del desempeño de Paneles solares fotovoltaicos es una ponderación más alta para GHI y una ponderación más alta para DNI en el caso de CSP (Lee et al., 2016; Ohunakin et al., 2018).

Los valores de los factores de ponderación son otorgados principalmente de manera intuitiva y, pueden ser modificados de acuerdo con el impacto que consideremos en el rendimiento de una tecnología en específico, es decir dependiendo de la aplicación para la cual se desee utilizar el TMY(Ohunakin et al., 2013). También el valor del peso en las ponderaciones debe considerar las condiciones geográficas del lugar, es decir en lugares desérticos como en Hermosillo, donde existen en su mayoría días despejados,

la radiación debe tener un papel importante en el valor de la ponderación (Cebecauer & Suri, 2015).

En la Tabla 1 se muestran algunos ejemplos de valores de ponderación asignados para los distintos parámetros, estos artículos tienen diferentes enfoques para los que se utilizará el TMY.

Tabla 1. Valores de ponderación para los distintos parámetros utilizados en TMY

| Parámetros | TMY2 | TMY3 | SolarGis | Wong et al. | Yingni J. | AMT |
|--|------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|------------------|------------------------------|
| Meteorológicos | (Marion & Urban, 1995) | (Wilcox & Marion, 2008) | (Cebecauer & Suri, 2015) | (Wong & Ngan, 1993) | (Jiang, 2010) | (Alonso Suárez et al., 2019) |
| Max. Temperatura | 1/24 | 1/20 | - | 1/4 | 1/20 | 1/12 |
| Min. Temperatura | 1/24 | 1/20 | - | - | 1/20 | 1/12 |
| Temperatura Promedio | 1/24 | 2/20 | 0.04 | - | 3/20 | 2/12 |
| Max. Temperatura de punto de rocío | 1/24 | 1/20 | - | - | - | - |
| Min. Temperatura de punto de rocío | 1/24 | 1/20 | - | - | - | - |
| Temperatura de punto de rocío promedio | 2/24 | 2/20 | - | - | - | - |
| Max. RH | - | - | - | 1/4 | - | - |
| Min. RH | - | - | - | - | 1/20 | - |
| RH promedio | - | - | - | - | 2/20 | 1/12 |

| | | | | | | |
|------------------------------|-------|------|------|-----|------|------|
| Presión atmosférica | - | - | - | - | - | 1/12 |
| Máx. Velocidad de viento | 2/24 | 1/20 | - | 1/4 | 1/20 | - |
| Velocidad de viento promedio | 2/24 | 1/20 | - | - | 1/20 | - |
| Dirección de viento promedio | - | - | - | - | - | - |
| Irradiación Global | 12/24 | 5/20 | 0.23 | 1/4 | 5/20 | 6/12 |
| Irradiación Directa | - | 5/20 | 0.70 | - | 5/20 | - |
| Irradiación Difusa | - | - | 0.03 | - | - | - |

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Recopilación y procesamiento de los datos

Para generar el TMY se necesita primero información climatológica de largo plazo. Los datos utilizados para desarrollar el TMY, los llamamos conjunto de datos base, y en este trabajo fueron obtenidos de las redes de medida ubicadas en la Plataforma Solar de Hermosillo (PSH), localizado en la carretera de Hermosillo – Bahía de Kino en el km 21.5 (latitud de 29.02°, longitud de -114.14°). Estos datos fueron recopilados para un periodo de 10 años en total. En la PSH existen dos estaciones de medida, una a la que llamaremos estación 1, o también denominada estación de datos base, debido a que se recopiló la mayoría de los datos de allí, y la siguiente fue llamada estación 2, que es la estación que ha sido instalada recientemente. El clima de Hermosillo según el diagrama de Köppen-Geiger, se encuentra en la clasificación BWh, lo cual significa que su clima es Árido Cálido, donde la temperatura anual promedio se encuentra por arriba de los 18°C y la zona es principalmente desértica (González C. & Contrearras L., 2009; Herrera R., 1964).

En general, ninguna fuente de datos por separado tiene una estadística completa sin que existan datos faltantes que deban ser llenados. Es por esto, que se hizo un análisis de la cantidad de datos disponibles de cada estación, con la finalidad de complementar los datos e incorporarlos en la estadística de la base de datos principal para la elección del TMM.

Los datos obtenidos de ambas estaciones son provenientes de un adquisidor de datos al cual se le anexaron los equipos programables para la obtención de éstos. Existen diferencias en los equipos de ambas estaciones, el paso del tiempo y las alturas de mediciones, pero esto se explicará en la sección 2.2 con cada una de las variables

meteorológicas utilizadas en el TMY. Una diferencia importante entre ambos adquiredores es que la estación 1 tiene un paso de tiempo 10-minutal, mientras que los de la estación 2 su paso de tiempo es 1-minutal, por lo cual al agregar datos de la estación 2 a la estación 1, se realizó la integración temporal correspondientes. En la imagen mostrada a continuación se muestra la ubicación de las dos estaciones ubicadas en la PSH (figura 1) y en la figura 2 y 3 se muestra la imagen de la estación 1 y 2 respectivamente.



Figura 1. Ubicación de la estación 1 y en la plataforma solar de Hermosillo, extraído en <https://goo.gl/maps/af8np2RyVijpCR9L6> el día 15 de septiembre del 2020



Figura 2. Imagen de de la estación 1, ubicada en la PSH.



Figura 3. Imagen de algunos equipos utilizados en la estación 2, que se encuentra en la torre central de la PSH

En la tabla 2 se indica el periodo temporal para el cual hay datos disponibles y el porcentaje de huecos detectados en la serie temporal de las estaciones 1 y 2.

Tabla 2. Estadísticas de los datos de las estaciones en la PSH

| Estación PSH | Mes | Estadística | Datos faltantes | Comentarios |
|---------------------|------------|-----------------------|------------------------|--------------------|
| 1 | Enero | 01/01/2011-31/01/2020 | 7.92% | 8 meses completos |
| | Febrero | 01/02/2011-28/02/2019 | 0.34% | 8 meses completos |
| | Marzo | 01/03/2010-31/03/2019 | 11.17% | 7 meses completos |
| | Abril | 01/04/2010-30/04/2019 | 3.16% | 7 meses completos |
| | Mayo | 01/05/2011-31/05/2019 | 7.00% | 7 meses completos |
| | Junio | 01/06/2010-30/06/2019 | 19.37% | 6 meses completos |
| | Julio | 01/07/2010-31/07/2019 | 6.58% | 8 meses completos |
| | Agosto | 01/08/2010-31/08/2019 | 7.56% | 9 meses completos |
| | Septiembre | 01/09/2010-30/09/2019 | 0.03% | 6 meses completos |
| | Octubre | 01/10/2010-31/10/2019 | 0.01% | 9 meses completos |
| | Noviembre | 01/11/2010-30/11/2019 | 1.06% | 9 meses completos |

| | | | | |
|----|------------|-----------------------|--------|-------------------|
| | Diciembre | 01/12/2010-31/12/2019 | 6.87% | 6 meses completos |
| | Enero | 01/01/2019-31/01/2020 | 0.00% | 2 meses completos |
| | Febrero | 01/02/2019-28/02/2020 | 0.00% | 2 meses completos |
| | Marzo | 01/03/2019-31/03/2020 | 0.00% | 2 meses completos |
| | Abril | 01/04/2019-30/04/2020 | 0.00% | 2 meses completos |
| | Mayo | 01/05/2019 | 0.00% | 1 año completo |
| | Junio | 01/06/2019 | 0.00% | 1 mes completo |
| 2* | Julio | 01/07/2018-31/07/2019 | 2.39% | 1 mes completo |
| | Agosto | 01/08/2018-31/08/2019 | 23.49% | 1 mes completo |
| | Septiembre | 01/09/2018-30/09/2019 | 0.00% | 2 meses completos |
| | Octubre | 01/10/2018-31/10/2019 | 0.00% | 2 meses completos |
| | Noviembre | 01/11/2018-30/11/2019 | 0.00% | 2 meses completos |
| | Diciembre | 01/12/2018-31/12/2019 | 0.00% | 2 meses completos |

*para la estación 2 no se consideraron los parámetros de velocidad y dirección de viento

De la estación 1 consideramos las siguientes medidas:

- Irradiación global sobre plano Horizontal (GHI)
- Temperatura del Aire Ambiente (bulbo seco) (TEMP)
- Humedad Relativa (HR)
- Velocidad de viento (VV)
- Dirección de Viento (DDV)

Las variables que se consideraron para la estación 2 son los siguientes:

- Irradiación global sobre plano Horizontal (GHI)
- Temperatura del Aire Ambiente (bulbo seco) (TEMP)
- Humedad Relativa (HR)

No se consideró la velocidad y dirección de viento en la estación 2, debido a que hubo una falla con el anemómetro, el cual sólo funcionó en julio y agosto 2018, y después de la reparación del equipo en enero 2020. Debido a que hay que hacer un análisis de los datos antes de incorporarlos, solo se utilizó hasta mayo del 2020.

Por tanto, se realizó una tabla considerando las variables meteorológicas faltantes de la estación 2, la siguiente tabla (tabla 3), considera las siguientes variables meteorológicas:

- Velocidad de viento (VV)
- Dirección de Viento (DDV)

Tabla 3. Estadísticas de los datos de Velocidad y Dirección de Viento para la estación 2 en la PSH

| Estación PSH | Mes | Estadística | Datos faltantes | Comentarios |
|-------------------------|------------|-----------------------|----------------------------|---------------------|
| | Enero | 01/01/2020-31/01/2020 | 0.00% | 1 mes completo |
| | Febrero | 01/02/2020-28/02/2020 | 0.00% | 1 mes completo |
| | Marzo | 01/03/2020-31/03/2020 | 0.00% | 1 mes completo |
| | Abril | 01/04/2020-30/04/2020 | 0.00% | 1 mes completo |
| | Mayo | - | 100% | Sin datos |
| 2 | Junio | - | 100% | Sin datos |
| | Julio | 01/07/2018-31/07/2018 | 4.89% | No hay mes completo |
| | Agosto | 01/08/2018-31/08/2018 | 43.88% | No hay mes completo |
| | Septiembre | - | 100% | Sin datos |
| | Octubre | - | 100% | Sin datos |
| | Noviembre | - | 100% | Sin datos |
| | Diciembre | - | 100% | Sin datos |

Como podemos observar en la tabla 2, la mayor cantidad de datos proviene de la estación 1, es por esto por lo que la denominamos la estación de datos base, de la cual algunos datos pueden ser complementados por la estación 2, que es lo que se explicará en la siguiente sección.

En la tabla 2 tenemos algunos datos de la estación 1 y 2 que se solapan, lo cual fue útil para hacer comparaciones entre una variable y otra, y así asegurar la calidad de nuestros datos. También sirvió para incorporar en los siguientes meses datos de la estación 2, ya que la estación 1 ha tenido últimamente algunos problemas en su funcionamiento, pero la estación 2 sigue funcionando y con un correcto mantenimiento de los técnicos que la dirigen.

De la tabla 3, podemos observar que no existe gran cantidad de datos que puedan ser acoplados a la estadística para el TMY, pero fue suficiente para trabajar con ellos y acoplar algunos datos faltantes, esto se realizó también con el fin de seguir incorporando datos de Velocidad y Dirección de Viento y mejorar así la calidad de los datos para el TMY.

3.1.1. Indicadores de desempeño

Por la forma en que se construyen las series típicas, no es posible realizar una evaluación a escala horaria o diaria. Los análisis reportados en diversas literaturas sugieren que sean a escala mensual o anual (Alonso Suárez et al., 2019; Jiang, 2010; Kambezidis et al., 2020). En este trabajo la media mensual o anual es comparada con los datos base. Los indicadores de desempeño comúnmente usados son los siguientes:

$$MBD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} (y_i - y_i^{ref}) \quad (1)$$

$$MAD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} |y_i - y_i^{ref}| \quad (2)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} (y_i - y_i^{ref})^2} \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} \left| \frac{y_i - y_i^{ref}}{y_i^{ref}} \right| \times 100 \quad (4)$$

Estos se llaman desvío promedio MBD (Mean Bias Deviation, por sus siglas en inglés), desviación absoluta media MAD (Mean Absolute Deviation, por sus siglas en inglés), desvío cuadrático medio RMSD (Root Mean Square Deviation, por sus siglas en inglés) y el porcentaje medio de error absoluto MAPE (Mean Absolute Percentage Error, por sus siglas en inglés). En las ecuaciones de (1) a (4), la variable y representa el valor a evaluar, y^{ref} el valor de referencia, es decir los datos base. El orden que se realiza la resta tiene importancia para MBD, ya que, un valor positivo/negativo del indicador implica que el valor a evaluar está por encima/debajo del valor promedio de los datos base. El MAD es una manera de describir la variación en un conjunto de datos, ayuda a tener una

idea de qué tan "amplios" están los desvíos en un conjunto de datos, es decir, la amplitud de las diferencias promedio entre los valores estimados y los de largo plazo. El cálculo de RMSD da una medida de la dispersión de los datos. Por último MAPE mide el tamaño del error con respecto al valor en referencia, en términos porcentuales (Ohunakin et al., 2013; Rumbayan & Nagasaka, 2012).

3.1.2. Datos meteorológicos

En esta sección se describe la estadística de los datos meteorológicos utilizados. Se utilizaron datos de la estación 1 y 2 para obtener la mayor estadística posible para conformar el TMY, además de asegurarnos de la calidad de nuestros datos. Para cada estación, la señal de voltaje fue grabada por un datalogger (Campbell, model 21). Para la estación 1, la señal fue obtenida cada segundo y promediada por un tiempo de 10 minutos. Para la estación 2 los datos fueron registrados en promedio de cada minuto (a partir de datos tomados cada 4 segundos). Separamos cada una de las variables, debido a que cada variable tuvo un procesamiento distinto que debe ser analizado por separado.

3.1.3. Temperatura del aire ambiente

Los datos de Temperatura se obtuvieron del sensor de Temperatura y Humedad relativa (Campbell Scientific HMP45C-ET). Este es un sensor de Platino cuyo fundamento de operación es la propiedad de aumentar su resistencia eléctrica a medida que aumenta la Temperatura (Véase Fig. 4). Se utiliza el platino porque tiene una respuesta lineal y tiene mayor precisión que los termopares (Temperature & Manual, 2010). La diferencia de alturas de un sensor y otro es, para la estación 1 la altura es de 3 m y para el sensor 2 es de 32 m. Los datos que se obtienen de este equipo están en unidades de °C y son 10-minutales para la estación 1, y minutal para la estación 2.

Primeramente, para los datos de la estación 1 y 2, se hizo una inspección visual de los datos, seguido de histogramas mensuales y diarios, para cada uno de los años, buscando algún dato que no concordara. Se obtuvieron los datos máximos, mínimo y promedio en busca de analizar mejor nuestros datos, inspeccionando que no existieran

valores de temperatura $> 50^{\circ}\text{C}$ o encontrar grandes desviaciones estándar entre un dato y otro 10-minutal y 1-minutal.

Si recordamos la tabla 2, no existían datos completos, por lo cual los datos con menos de cuatro horas de datos faltantes fueron llenados por medio de interpolaciones lineales o por interpolación por splines cúbicos, dependiendo del comportamiento observado por la temperatura (Hoyer-Klick et al.). En los casos donde hizo falta un día completo, el manual del TMY3 recomienda usar el día anterior o posterior (Wilcox & Marion, 2008), pero en busca de conservar la estadística y no repetir días en el mismo mes, el día sustituto se elige del conjunto de días del mismo mes al que pertenece el día que se tiene que sustituir, pero de un año diferente, el que sea el más parecido a la media de los datos base. Después se realizó un suavizado por splines cúbicos con treinta minutos al inicio y treinta minutos al final, un total de una hora.

A partir de Julio del 2018 se recopilaron datos de la estación 2. Existían datos huecos (estación 1), en el año 2020 para los meses de febrero, marzo y abril.

Se analizaron los meses que se superponían con los datos base con la estación 2, después se analizó los días que fueran días despejados para hacer el ajuste de los datos de la estación 2 con los datos de la estación 1. Y así se incorporaron los nuevos datos a la estación base. El ajuste no fue muy diferente a los datos base, pero se hizo para tener los datos más apegados a la realidad posible. Las diferencias de temperatura entre una estación y otra se explican, debido al enfriamiento radiativo de la Tierra, ya que el suelo tiende a enfriarse y el sensor 1 que se encuentra a 3 m de altura se ve afectado por esos cambios. El sensor 2, se encuentra a 32 m, por lo cual no hay aparentes cambios con respecto a este fenómeno. Al final fue posible incorporar correctamente la serie de la estación 2 a los meses restantes de febrero, marzo y abril del 2020.

3.1.4. Humedad Relativa

Conocer el comportamiento de la Humedad Relativa es importante para la determinación del calor latente para sistemas de aires acondicionados y niveles de evaporación (Ohunakin et al., 2013). Para esta variable se utilizó el mismo equipo que para medir la Temperatura ambiente, por lo que ambos equipos se encuentran al mismo nivel de altura

de la estación 1 y 2. En la imagen de la figura 4, pueden observarse los equipos utilizados para medir la humedad en estas estaciones. La medición es indirecta y su principio de funcionamiento es la propiedad que tiene un condensador eléctrico de cambiar su capacitancia (Faradios) cuando se usa el aire como medio dieléctrico (Temperature & Manual, 2010). Se rige básicamente de la siguiente ecuación:

$$C = \varepsilon \left(\frac{A}{d} \right) \quad (5)$$

Donde:

C: valor de capacitancia

ε : constante dieléctrica

A: área de las placas del condensador

d: distancia entre las placas del condensador

Los datos reportados por el equipo son en % de Humedad Relativa. Para la estación 1 y 2 se realizó nuevamente una inspección visual de los datos, seguido de histogramas mensuales y diarios, para cada uno de los años. Se obtuvieron los datos máximos, mínimo y promedio, inspeccionando que no existieran valores de Humedad Relativa > 100% o desviaciones muy grandes en cada paso del tiempo.

Se revisaron los datos de todos los años, donde se encontró algunas irregularidades a partir de febrero del 2015. Al hacer el análisis visual, fue notorio que a bajas Temperaturas el equipo mostraba Humedades Relativas de saturación (100%).

Por ello se realizó una separación de los datos de Humedad, pre-febrero 2015, post-febrero 2015 y datos disponibles de la estación 2, buscando incorporar estos últimos, pero antes se tenían que hacer ciertos ajustes. Analizando las curvas se encontró similitud de los datos de la estación 2 con los valores pre-febrero 2015, pero no sucedió esto con valores post-febrero 2015: definitivamente hay un comportamiento del equipo diferente a partir de esa fecha, es por esto que estimamos el error que había pre y post febrero 2015 con respecto a los datos de la estación 2. Después, se utilizó la diferencia de los datos de estación 1 y 2 para encontrar un polinomio de ajuste, aquí se filtró los

datos con 100% de saturación de humedad y los valores donde el error era igual a 0. Una vez obtenida la curva de ajuste, se aplicó esta corrección a todos los valores de Humedad de la estación 1. Esto se hizo para cada uno de los meses, ya que el comportamiento de la HR varía significativamente mes con mes (sobre todo para los meses de junio, Julio Agosto y Septiembre), en particular, cada mes tiene ciertas variabilidades que se quisieron conservar para mantener la mejor estadística posible. En conclusión, utilizamos este ajuste para todos los datos que faltaban post-febrero 2015 y en cada uno de los meses. Es decir, se utilizó un factor de ajuste diferente a cada mes, por ejemplo, para diciembre 2018, correspondió a un factor de ajuste que será el mismo que se aplicó para diciembre 2016 a diciembre 2019 y así sucesivamente con los demás meses. Estos ajustes nos permitieron tener una variabilidad más real y correspondiente al comportamiento mostrado por la estación 2 y 1 pre-Feb2015. Nos permitieron no afectar los resultados obtenidos con la metodología del TMY, ya que, si utilizáramos los datos con esa saturación, automáticamente la metodología Sandia desecharía esos datos por su poca variabilidad (en la saturación), es por eso que se tomó la decisión de utilizar este análisis y procesamiento de datos.

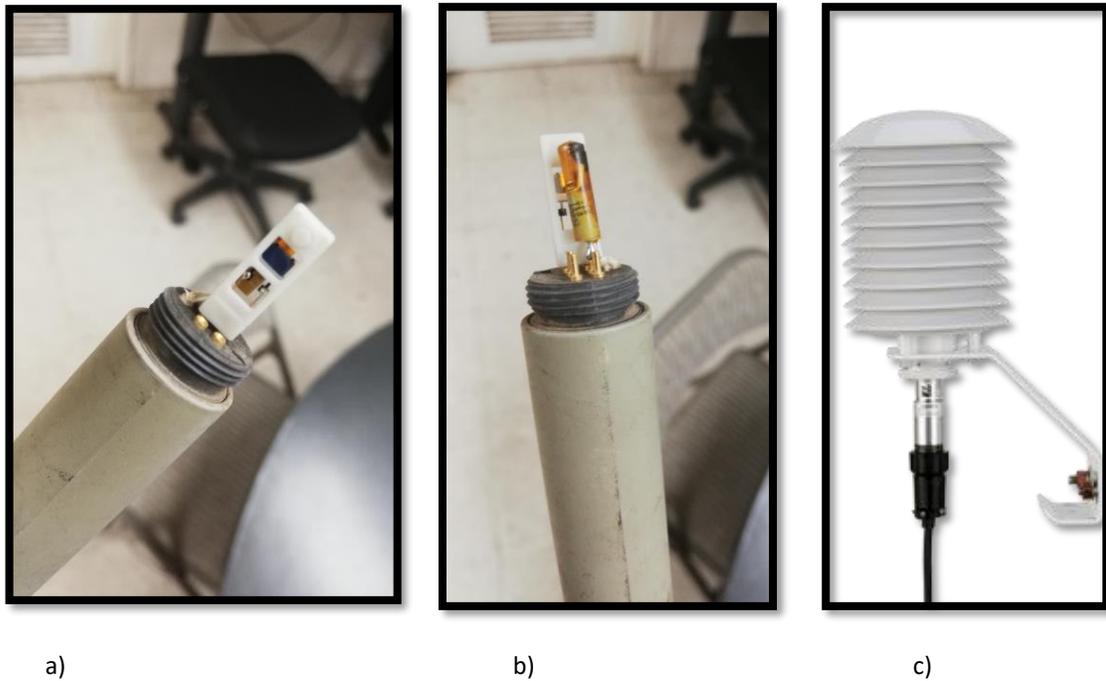


Figura 4. Equipos y sensores encargados de medir la Humedad y Temperatura del aire seco. a) sensor de Humedad relativa, b) sensor de Temperatura y c) Instrumento meteorológico para medir temperatura y Humedad

3.1.5. Velocidad de Viento

Las medidas de viento para la estación 1 se realizaron con un instrumento llamado anemómetro (R.M. Young 05103V-90), que consta de dos partes: copela para la medida de la velocidad de viento y de una veleta para indicar la dirección de viento. Ambas partes son móviles. Tanto la hélice como los ejes verticales utilizan rodamiento de bolas de precisión de acero inoxidable. La rotación de la hélice produce una señal de onda senoidal de corriente alterna (AC) (Hoyer-Klick et al.). Su registro confiable a lo largo del tiempo puede presentar dificultades si no tiene un correcto mantenimiento. La altura del equipo está localizada a 18 metros de altura. Los datos proporcionados por el instrumento de medición son en m/s. La figura 6 ilustra estos equipos.

Se realizó un análisis visual de los datos, se obtuvo el máximo y mínimo para asegurarnos de que no existieran datos que no fueran válidos. Una vez hecho esto, también se realizó un histograma de distribución de Weibull, que es el comúnmente utilizado para representar el comportamiento del viento (Tuller & Brett, 1984). En el caso de velocidad de viento, es un complicado hacer un análisis que nos asegure que los datos son de calidad, ya que, hemos visto que las variaciones de velocidad de viento pueden cambiar rápidamente en los pasos de tiempo aquí mostrados (10-minutos), esto nos hace difícil encontrar errores que existan en la serie de datos, así que, confiamos en que este equipo tiene un correcto mantenimiento con la ayuda de los técnicos especializados en la PSH.

Para la estación 2 el equipo utilizado es diferente que el de la estación 1. Este equipo es un anemómetro ultrasónico (Windmaster 1590-PK-020/W). El cual trabaja con el principio de tiempo de vuelo ultrasónico, esto significa que cada transmisor trasfiere constantemente sonido de alta frecuencia a su receptor respectivo. Los circuitos electrónicos en el interior miden el tiempo que tarda el sonido en viajar desde cada transmisor hasta el receptor correspondiente. Dependiendo de cómo sopla el viento, afectará a algunos de los haces de sonido más que a los demás, ralentizándolo o acelerándolo muy ligeramente. Los circuitos miden la diferencia en las velocidades de las vigas y las usan para determinar qué tan rápido sopla el viento. A diferencia de los instrumentos rotativos, los instrumentos ultrasónicos no tienen partes móviles, por lo que es menos probable que fallen mecánicamente, además de soportar rangos más altos de Temperatura, por ejemplo, es poco probable que estos equipos fallen con temperaturas de congelación; También dan mediciones más precisas en vientos muy fuertes. Es por ello, que su mantenimiento no necesita ser con tanta regularidad como lo es con el anemómetro de la estación 1, lo que genera mayor confiabilidad en esta serie de datos (Samer et al.). La altura de medición de este equipo se encuentra a 32 metros. Los datos proporcionados son en m/s.

Comparando ambos equipos, el equipo que nos proporciona menor incertidumbre en la serie de datos es el equipo de la estación 2, por esto, para tener un TMY en un futuro, con datos de mejor calidad, se investigó como incorporar estos datos para los meses de enero a mayo del 2020, con el fin de crear un ajuste que permita seguir incorporando

meses de esta estación, por esto se dejó abierto el programa de Matlab para conforme más datos se tengan, ir mejorando el algoritmo y así el ajuste de los datos irá mejorando conforme se vayan alimentando más datos.

Es común que los datos para medir Velocidad de viento se encuentren por encima de los 20 m de altura, debido a que el recurso eólico es mayor entre más lejos se encuentre de la superficie. Para alturas mayores a 20 metros (como en el caso de la estación 2), la relación entre velocidad de viento y altura se puede parametrizar con la siguiente ecuación:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^\alpha \quad (6)$$

Donde ω_1 y ω_2 son los módulos de velocidad a las alturas Z_1 y Z_2 respectivamente. Para estos datos Z_1 es igual a 32 m y Z_2 tiene el valor de 18 m. A esta ecuación también se le conoce como la ecuación perfil vertical de viento con altura. Esta relación permitió transformar la velocidad de viento a una altura dada, como en nuestro caso de 32 m a 18 m. El parámetro α (también llamado coeficiente de Von kármán) dependerá de la hora del día, la ubicación de la medida y la dirección de viento (An; Li et al., 2015).

Antes de comenzar con el ajuste nos aseguramos de que fuera posible agregar estos valores a la serie de datos de la estación 1. Por medio de una inspección visual, analizamos que los meses de la estación 2 que tenemos, es decir julio 2018, agosto 2018 y enero 2020, tengan un comportamiento similar y así que sea posible el ajuste. Al comparar ambas curvas observamos que tenían la misma forma, el mismo comportamiento, pero los datos de la estación 2 sus datos se encontraban por encima de los datos de la estación 1. Esto puede explicarse fácilmente por las diferencias de alturas entre una estación y otra. Es decir, a alturas más elevadas los vientos tenderán a ser más constantes y con mayor velocidad.

El segundo análisis que se hizo de los datos de la estación 2, fue un histograma de la distribución de los datos. Al igual que la estación 1, se realizó el histograma de Weibull

que es el que se muestra en la figura 5, la figura muestra que la serie de datos de la estación 2 se acoplan bien a esta distribución.

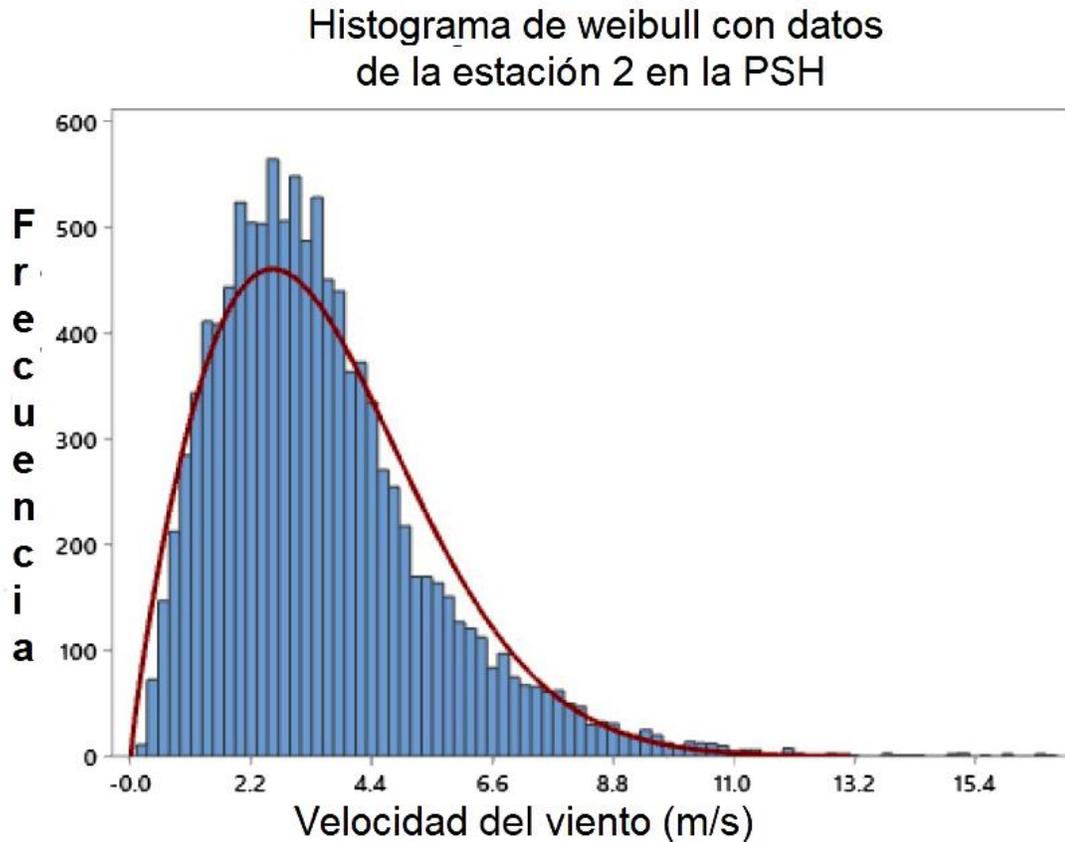


Figura 5. Histograma de Weibull utilizado para los datos de velocidad de viento de la estación 2.

Una vez que nos hemos asegurado de que es posible agregar los datos de la estación 2 en la estación 1, hacemos los cálculos correspondientes para obtener los valores de α .

Luego de obtener los valores de α , se realizó un programa en Matlab para encontrar los valores de este parámetro cada 10° de ángulo de la dirección de viento correspondiente a la velocidad de viento de la estación 2. Con estos valores de α procedemos a utilizar la Ec. (6) para calcular el módulo de velocidad a 18 m de altura. El límite de altura aproximado se explica debido a que hay afectaciones de la rugosidad del

terreno, por lo que usualmente se requieren modelos de transposición de altura más sofisticados. En nuestro caso, el terreno donde se encuentran estos equipos es casi completamente llano, por lo tanto, consideramos que el modelo de la ecuación (6) es aplicable.

Es importante mencionar que es recomendable tener un año completo de datos, debido a la variabilidad que existe en un año completo con respecto a la velocidad y dirección de viento. Esto permitirá tener una mejor estimación del valor de α , por ende, mayor exactitud en la obtención del TMY, es por esto que se seguirán alimentando datos al programa en busca de tener la menor incertidumbre posible (Alonso Suárez et al., 2019).

3.1.6. Dirección de Viento

Los equipos utilizados para dirección de viento son los mismos utilizados para velocidad de viento en las dos estaciones meteorológicas en la PSH, en la figura 6 se pueden observar los equipos utilizados en estas estaciones. Los datos obtenidos por estos equipos son en grados (deg) de 0° a 359°, con respecto al punto de referencia, que es normalmente alineado al norte. Los equipos fueron monitoreados constantemente para asegurar la calidad de los datos. Se les dio mantenimiento en caso de surgir una falla encontrada en la recopilación mensual de los datos.



Figura 6. Instrumentos de medición utilizados para medir la velocidad y dirección de viento en la PSH. (Izq.) Anemómetro ultrasónico utilizado en la estación 2, (Der.) anemómetro utilizado en la estación

3.1.7. Irradiación Solar Global

La radiación global se midió a través del equipo llamado piranómetro (kipp & Zonen CMP11). Se registraron datos 10-minutales para la estación 1 y para la estación 2, a partir de promediar medidas minutales en W/m^2 . La altura de medición de la estación 1 es de aproximadamente 5 m y de la estación 2 es de aproximadamente 32 m.

Un piranómetro es un instrumento que mide la radiación en un rango espectral de $0.3 \mu m$ y $3.0 \mu m$. La base de este instrumento es una termopila que genera un voltaje de $10 \mu V$ por cada W/m^2 incidente, la cual es proporcional a la diferencia de Temperatura entre una superficie absorbadora negra que es la que tiene el instrumento con respecto a la cubierta del equipo que está bloqueada del Sol. El piranómetro utilizado (el CMP11) se encuentra dentro del estándar Secundario marcada por la clasificación de ISO 9060:1990. Estándar secundario se refiere a una de las tres categorías de los

instrumentos según lo marcado por esta certificación. Las tres categorías son: Estándar Secundario, Primera Clase y Segunda Clase. Estándar secundario es aquel equipo capaz de medir con una incertidumbre diaria menor al 2%, el cual también puede actuar como un patrón nacional si se calibra cada cinco años con respecto a la referencia radiométrica mundial en el WRC (International Organization for, 1990).

Se analizó la información de radiación recopilada en la estación 1. Se realizó una inspección de los datos para descartar valores que no fueran físicamente posibles, como por ejemplo valores de radiación positivos en las noches y valores negativos durante el día. Se analizó la distribución de estos valores, la desviación, máximos, mínimos y promedios. Una vez descartados valores que no superaran este filtro se procedieron a analizar los días despejados, es decir sin nubes, para encontrar si existía algún sombreado que afectará a nuestros datos. En este filtrado se encontró cuatro sombras que afectaban el equipo. Esto ocurrió en todos los años, que fue probablemente porque en la estación donde se localizan estos datos hay estructuras que con ciertas posiciones del Sol ocurre sombras provocadas por ellas (figura 7), es por esto que se procedió a realizar las correcciones correspondientes

La corrección fue realizada con ayuda del Dr. Rodrigo Alonso-Suárez de la Universidad de la República de Uruguay, con el programa Python, donde lo primero que hizo fue detectar lo mejor posible las muestras con sombra como se muestra en la figura 7.

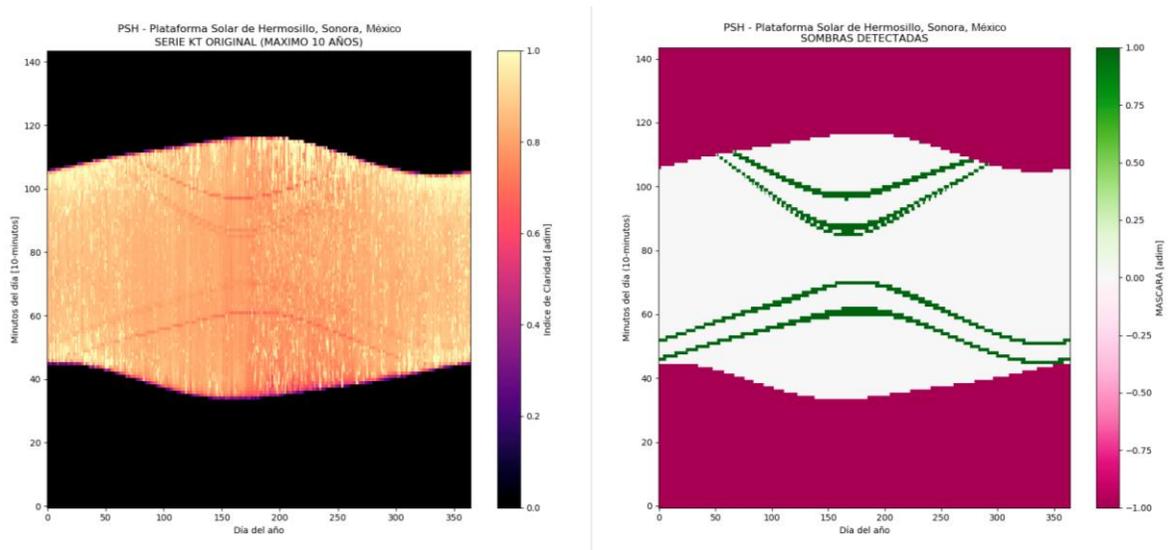


Figura 7. Sombras detectadas para los datos de irradiancia (W/m^2) de la PSH en la estación 1.

Una vez detectadas estas sombras se interpolaron linealmente esas muestras, sobre un k_T modificado, llamado comúnmente k_T de Perez (Perez et al., 1990) (índice de claridad horario), donde k_T es igual a:

$$k_T = \frac{I_h}{I_{oh}} \quad (7)$$

$$k'_T = \frac{k_T}{1.031 \exp\left(-\frac{1.4}{0.9 + \frac{9.4}{am}}\right)} + 0.1 \quad (8)$$

k_T es una magnitud adimensional que da una indicación indirecta de la nubosidad, donde I_h es la irradiación horaria, I_{oh} es la irradiación solar extraterrestre en un plano horizontal al tope de la atmosfera y am es la masa de aire óptico. Esta variable representa principalmente el estado de la atmosfera (la nubosidad, humedad, aerosoles). Después se reconstruyo el GHI o I_h devolviendo su variación geométrica. Esto es mejor que interpolar directamente sobre GHI porque preserva mejor las propiedades geométricas

de esta variable. Esto se pudo realizar con éxito debido a que las muestras provienen de una zona desértica, donde hay cielo despejado en la mayoría de los casos. La figura 8 muestra el antes y después de haber realizado las correcciones.

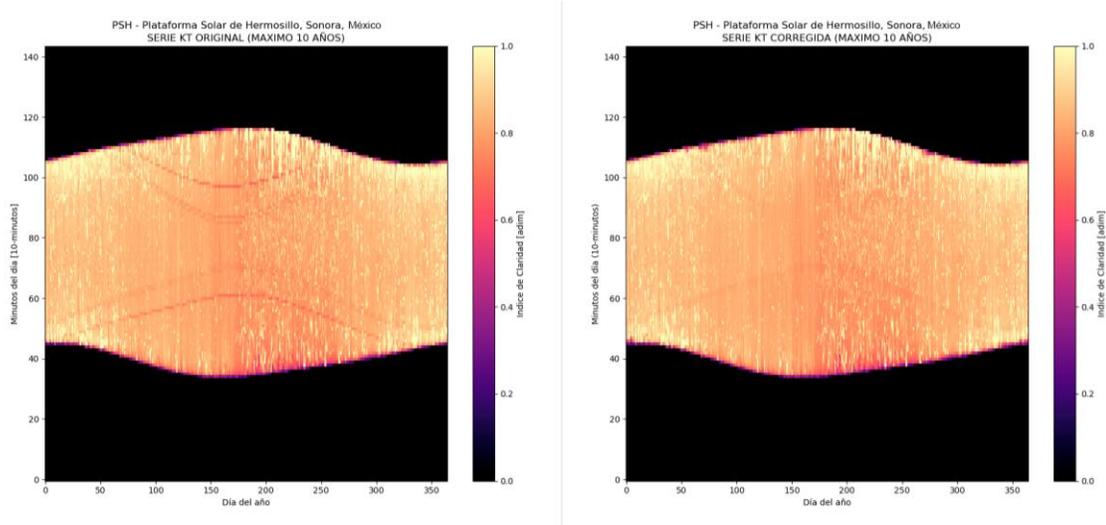


Figura 8. Comparación de índice de claridad para los datos de la PSH en la estación 1 antes (izq.) y después (Der.) de la corrección de los datos

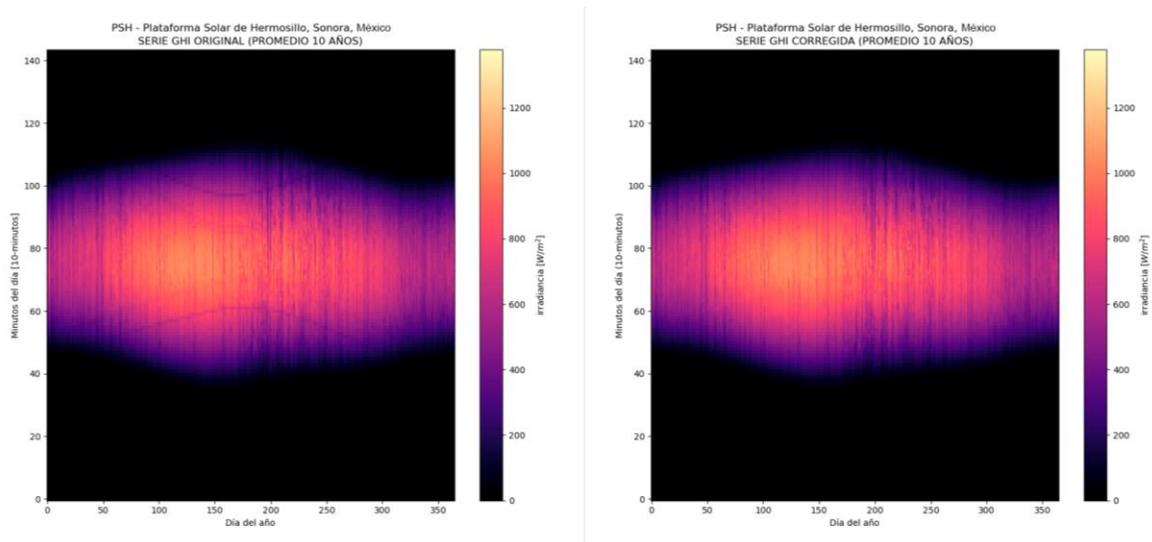


Figura 9. Comparación de la irradiancia [W/m²] para los datos de la PSH en la estación 1 antes (izq.) y después (Der.) de la corrección de los datos

Como se puede observar en la figura 9 aún quedan unas pequeñas sombras visibles, pero estas sombras no supondrán un problema al momento de realizar el procedimiento para obtener los meses típicos, los valores no son significativos para afectar en la estadística. Las correcciones realizadas en esos puntos fueron de un máximo de 20 minutos.

La estación 2 como ya hemos mencionado tiene el mismo equipo que la estación 1 para medir la radiación solar, la diferencia es la altura entre ambos equipos, con una diferencia de 27 m, de la estación 2 con respecto a la estación 1.

En la figura 10, se muestra una imagen de la estación 2. Estos equipos tienen un mantenimiento diario, donde se limpian las cúpulas de los piranómetros, aparte del monitoreo constante de los datos, ya que sus valores de medida están conectados directamente a la red, y estos datos se transfieren a una página web, propiedad de la plataforma solar, que es de libre acceso, por lo cual, es fácil detectar cualquier fallo que exista en alguno de los equipos.

La figura 11, se muestra la imagen del piranómetro ubicado en la estación 1, donde el mantenimiento no es tan frecuente como en el caso de la estación 2, pero aun así no hubo afectaciones significantes que no permitan el acoplamiento de estos datos, esto se analizó en las siguientes páginas utilizando indicadores de desempeño y gráficas de dispersión, que confirmaron que es factible utilizar estos datos.

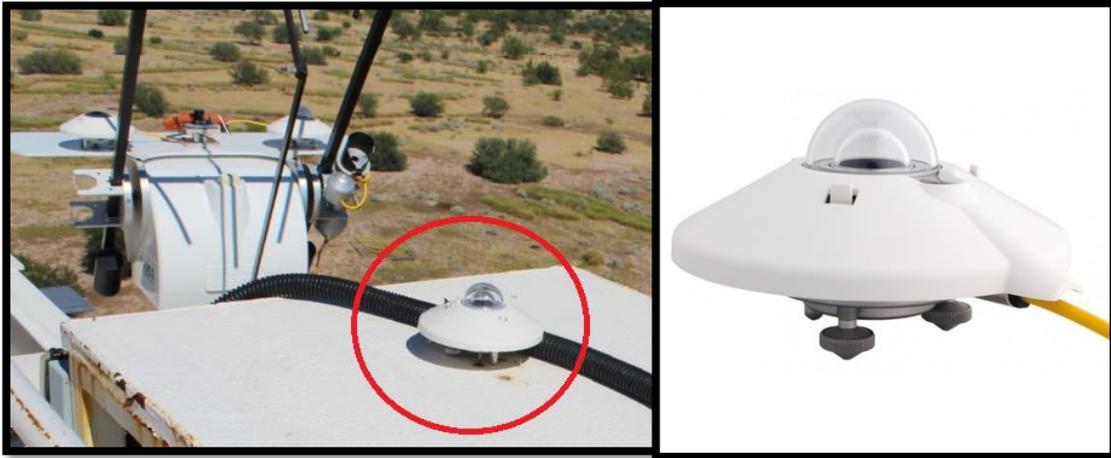


Figura 10. Comparación de la irradiancia [W/m^2] para los datos de la PSH en la estación 1 antes (izq.) y después (Der.) de la corrección de los datos



Figura 11. Imagen del instrumento medida Piranómetro (Kipp & Zonen) para medir la irradiancia solar en la estación 1.

Para realizar el acoplamiento de los datos de la estación 2 en la estación 1, se realizó una revisión de los datos que se traslapaban, para así, corroborar si es posible unir estos datos. Primeramente, se hizo el análisis con un año de datos (que fue la información que se pudo recuperar donde se traslapen datos de la estación 1 y 2) para los datos diarios, ya que esto es lo que se establece según la WMO (Reverdin et al., 2016), donde se utilizaron los indicadores de desempeño para corroborar que fuera posible utilizar estos datos. Esto se puede observar a continuación, en la tabla 4; por ejemplo, los valores tanto de rMBD, rMAD y MAPE son aceptables, ya que se encuentran por debajo del 3.15%. Se utilizó también la comparación gráfica, es decir de dispersión de datos donde $x = y$, (véase fig.12) de los valores de radiación solar para la estación 1 y la estación 2, donde se obtuvo una R^2 de .99, lo cual indica que existe una buena correlación entre los datos de la estación 1 vs la estación 2, ya que al estar más cercano se encuentre el valor del coeficiente de correlación (R^2) a uno, significa que existe mayor similitud de los datos, por lo tanto es correcto realizar el ajuste y acoplamiento de estos a los datos base.

Tabla 4. Comparación de datos de radiación solar global diaria de la estación 2 contra la estación 1 de la PSH

| Indicadores de desempeño | GHI | Unidades |
|--------------------------|------|-------------------|
| MBD | 0.34 | MJ/m ² |
| MAD | 0.40 | MJ/m ² |
| RMSD | 0.47 | MJ/m ² |
| rMBD | 2.67 | % |
| rMAD | 3.15 | % |
| rRMSD | 3.73 | % |
| MAPE | 2.01 | % |

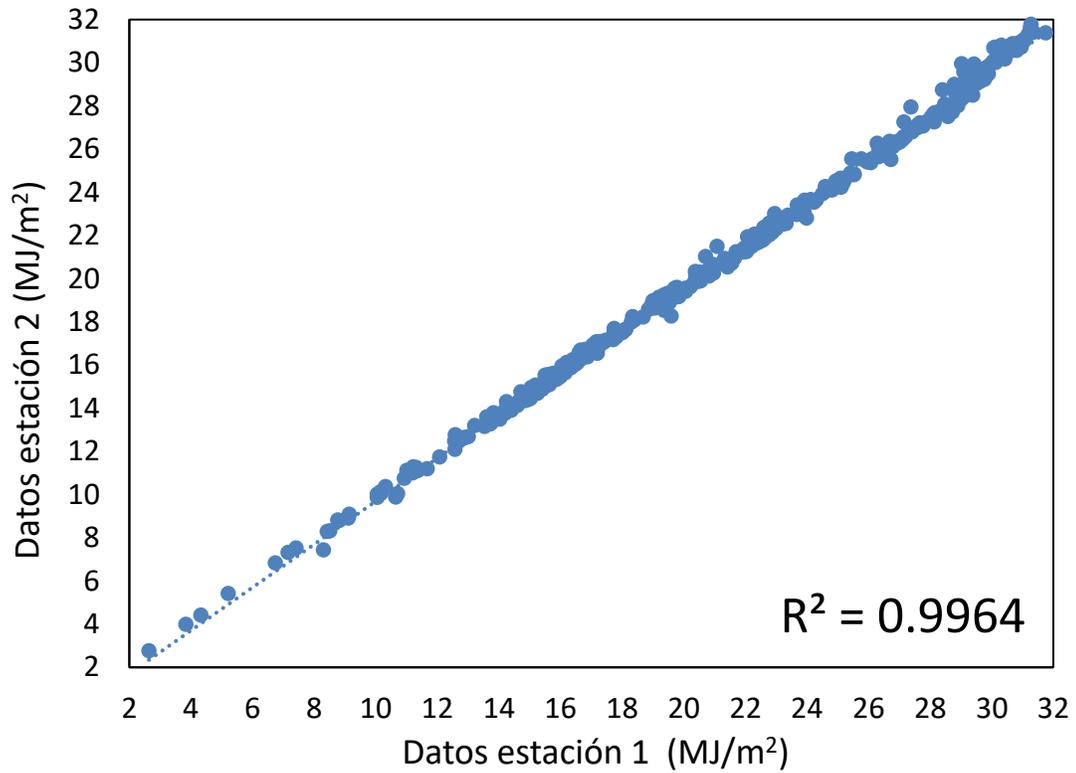


Figura 12. Gráfica de datos de radiación solar de estación 1 vs estación 2

3.1.8. Conformación de la serie de datos

Para elaborar los conjuntos de datos base que se utilizará en la elaboración del TMY se necesita generar un único conjunto de datos con la menor cantidad de huecos y la mayor estadística posible. Por ello, se buscó conseguir la mayor cantidad de datos utilizando métodos estadísticos que cumplieran con esta función.

Primero definimos que los meses que tuvieran menos de 90% de datos no serían utilizados para el método de obtención del año típico, ya que, al analizar estos meses, tenían 2 ó hasta 4 días seguidos sin datos, por lo cual hacer una interpolación o llenado de datos con algún otro método estadístico, no representaría un comportamiento real de la magnitud de las variables, que es una de las principales características de este método.

En el caso de temperatura y humedad Relativa, se realizaron interpolaciones lineales para datos menores a dos horas e interpolaciones por splines cúbicos para datos que fueran menores que ocho horas. En caso de ser mayores de ocho horas, para no repetir días, lo que se hizo es buscar días con valores parecidos a la media de todos los años de datos, debido a que será un año diferente al año que estamos analizando, se hace un suavizado de estos datos con dos horas al inicio y dos horas al final. En algunos casos los días eran muy parecidos y no era necesaria la suavización o tan solo se necesitaban treinta minutos. En caso de faltar un día completo, el manual de TMY3 (Wilcox & Marion, 2008) propone, colocar el día anterior o posterior, pero para mantener la estadística se buscó de todos los años ese mismo día y escoger el día de todos los años que tuviera variabilidad parecida comparada con los días posteriores y anteriores del día faltante, con el fin de mantener la mejor estadística posible. Esto ocurrió en muy pocas ocasiones, pero todas estas interpolaciones fueron anotadas para no elegir un mes para el TMY donde existieran muchos datos interpolados, aunque la metodología está hecha para no escoger este tipo de meses, nos aseguramos de igual manera de no tener ninguno de esos meses en alguno de los TMY's, pero no fue necesario, porque al final ninguno de los meses que fueron mayormente interpolados fue escogido por la metodología.

Para velocidad y dirección de viento utilizamos el mismo procedimiento para mantener coherencia en nuestra serie de datos, aunque el viento fue bastante impredecible, sobre

todos los meses de lluvia que son los meses de junio a septiembre, porque no podíamos estimar si ocurrió una ráfaga de viento, que esta puede durar menos de diez minutos, y nuestra serie de datos base tiene un paso de tiempo de diez minutos. Es por eso por lo que fue relevante para este estudio es no utilizar meses donde existan muchas interpolaciones de este estilo, es decir, mayor de cuatro horas, para mantener la mayor cantidad de datos que realmente representen la variabilidad del clima.

En el caso de radiación la interpolación fue menos que las otras variables, esto fue debido a que algunas de las fallas ocurrían cuando era de noche, por lo cual fue fácil rellenar esos datos, además el clima de esta zona tiene la característica de tener en su mayoría días despejados, por lo cual las interpolaciones cúbicas y/o lineales fueron suficiente para rellenar los huecos de muchos de estos datos.

3.2. Metodología

Como ya se ha mencionado antes el TMY debe conservar el comportamiento medio de cada variable que esté involucrada y también su variabilidad característica. Si estos factores son conservados puede entonces considerarse para la simulación de dispositivos bajo condiciones climáticas típicas. La forma de construir el TMY es uniendo serie de datos reales, de diferentes años, seleccionados por su carácter típico. Uno de los objetivos principales de TMY es conservar la variabilidad real de cada variable. También se conserva la concurrencia temporal entre variables debido a que cada sub-serie utilizada corresponde al mismo periodo de tiempo para todas las variables. Estos datos seleccionados para formar parte de la serie, no sufre un post-procesamiento de los datos, tampoco son datos generados sintéticamente, sino que son datos reales que son característicos de la localidad.

El método utilizado para elaborar el TMY en este trabajo será la metodología Sandia recopilada del manual de TMY3, recordando que es llamado así por ser la versión número tres del manual de TMY(Wilcox & Marion, 2008).

En los siguientes TMY's se utilizaron distintas ponderaciones para las variables correspondientes que son: Irradiación sobre plano horizontal, Temperatura del aire ambiente, Humedad Relativa, Velocidad y Dirección de Viento.

En la siguiente sección se explicará la metodología de la elaboración de las series que conforman los distintos TMY's.

3.2.1. Elaboración del TMY's

La metodología de Sandia utiliza la escala mensual, se encarga de escoger doce meses típicos (TMM, por sus siglas en inglés, Typical Meteorological Months) de diferentes años para completar un año completo. Esto quiere decir, que, por ejemplo, el enero escogido para alguno de nuestros TMY's será escogido de entre los diez años de datos base. Para conectar un mes con otro se utiliza un proceso de suavizado que es necesario para garantizar la continuidad de las variables entre el último día del mes y el primer día del

mes siguiente. Este suavizado solo será necesario para Temperatura y Humedad Relativa, debido a que las uniones de los meses en radiación ocurren durante la noche, y en el caso de velocidad y dirección de viento, no es necesario porque la variable puede variar rápidamente a escala 10-minutal.

3.2.2. Selección de los meses típicos

La unión final de los meses tiene una escala 10-minutal, pero en la decisión para escoger el mes típico (TMM) para cada mes del año se utiliza los valores diarios de cada variable implicada. Obtendremos la escala diaria de las siguientes variables y en las siguientes unidades:

Tabla 5. Variables y parámetros meteorológicos utilizados para la elaboración de los distintos TMY's

| Variable | Parámetro meteorológico | Unidades |
|-----------------|--|-------------------|
| GHI | Irradiación global diaria sobre plano horizontal | MJ/m ² |
| TEMP | Temperatura promedio diario del aire ambiente | °C |
| HR | Humedad relativa promedio diaria | % |
| VV | Velocidad de viento promedio diaria | m/s |
| DDV | Dirección de Viento promedio diaria | ° |

El primer paso es determinar la función de distribución acumulada (CDF) para cada parámetro (véase la Tabla 5) de la base de datos para cada mes/año de todo el periodo. Para estimar el valor de CDF de cada parámetro, los datos fueron separados en grupos distintos, luego las CDF fueron estimadas contando el número de probabilidades que existen para que cada uno de los casos ocurra.

Como ya hemos mencionado los datos de este trabajo están compuestos por cinco variables (Tabla 5), por tanto, llamaremos X al conjunto de estas cinco variables, de modo que $X = (GHI, TEMP, HR, VV, DDV)$. Por tanto X_i sería la serie temporal diaria completa de la i -ésima variable $i \in (1, \dots, 5)$). Los meses del año se indican con el índice j . Los años se indican con el índice y , ($y \in (2010, \dots, 2020)$). Entonces, el grupo X_i^j son los datos diarios de la variable i para el mes j y X_i^{jy} es el conjunto de valores de la variable i para el mes j del año y .

Según lo acordado por la metodología de Sandia se compara estadísticamente para cada variable i y mes j , con sus respectivo mes-año (jy) contra la estadística de largo plazo del mes j . Esta comparación se realiza con la función de distribución acumulada (CDF) de los distintos conjuntos de datos. Se calcula la CDF de largo plazo para cada variable i y cada mes j , para esto se utilizan todos los datos diarios del mes j para todos los años que se tengan. Se establece el dominio de la función como u , entonces para cada valor de u , la función queda de la siguiente forma:

$$F_i^j(u) = Prob(u \leq X_i^j) = \frac{1}{N_i^j} \sum_{l=1}^{N_i^j} \theta(u - X_i^j(l)) \quad (9)$$

De la ec. (9) se tiene N_i^j que es la cantidad de elementos del conjunto X_i^j y $\theta(u)$ es la función escalón de Heavyside, a la cual se le da el valor de "0" si $u < 0$ y "1" si $u \geq 0$. Semejante a lo que se hizo anteriormente con la Ec. (9), se puede hacer lo mismo para encontrar la CDF para cada variable, mes y año

$$F_i^{jy}(u) = Prob(u \leq X_i^{jy}) = \frac{1}{N_i^j} \sum_{l=1}^{N_i^{jy}} \theta(u - X_i^{jy}(l)) \quad (10)$$

Donde N_i^{jy} es la cantidad de elementos del conjunto X_i^{jy} . Una vez obtenidas las CDF tanto para cada mes (Ec. 9) y cada mes-año (Ec. 10) se realiza una comparación entre estas dos y se calcula la distancia entre ellas. Entre menor es la distancia que existe entre los CDF mes-año y CDF de largo plazo, se le considera a este mes como el mes más “típico”, es decir, que la distancia que exista entre los CDF se puede considerar una medida de la “tipicidad”. Esta distancia es también conocida como la distancia de Finkelstein-Schafer (FS) (Finkelstein & Schafer, 1971). El FS en la metodología SANDIA es mejor conocida como la diferencia absoluta entre el CDF largo plazo y el CDF mes-año (corto plazo).

El estadístico de FS se calcula de la siguiente manera:

$$FS_i^{jy} = \frac{1}{N_i^{jy}} \sum_{u \in X_i^{jy}} |F_i^j(u) - F_i^{jy}(u)| \quad (11)$$

Donde $F_i^j(u)$ es la CDF a largo plazo de los valores diarios de un parámetro i en el mes j , calculado para todos los meses en el período de 2010-2020 y FS_i^{jy} también se le llama comúnmente CDF de corto plazo, que se refiere al CDF de los valores diarios del parámetro i , para el mes j de un año en específico. FS_i^{jy} indica que tan típica es una instancia de mes-año para cada variable, entre menor sea este valor, significa que la tipicidad jy es más típica para la variable i . Como ejemplo se encuentra la figura 13 donde se muestra ejemplos de las CDF de largo plazo junto con las CDF de corto plazo, en este caso las de menor distancia (mejor), el segundo con menor distancia (el segundo mejor) y el CDF con mayor distancia (peor) de las variables de irradiación solar diaria, Temperatura de Bulbo seco, Humedad Relativa y velocidad de viento.

Los siguientes pasos en la metodología de Sandia es obtener un único estadístico para cada instancia mes-año y esto se hace mediante la ponderación de los valores obtenidos

para cada variable. Se aplican factores de ponderación ω_i a los valores estadísticos de FS, uno para cada uno de los parámetros meteorológicos considerados correspondientes a cada mes específico en el periodo de estudio. Estos se hacen comúnmente a la finalidad prevista del TMY, pero en este caso se realizaron varios TMY's para distintas aplicaciones. Por tanto, se obtendrá un único indicador de la tipicidad para cada mes-año jy .

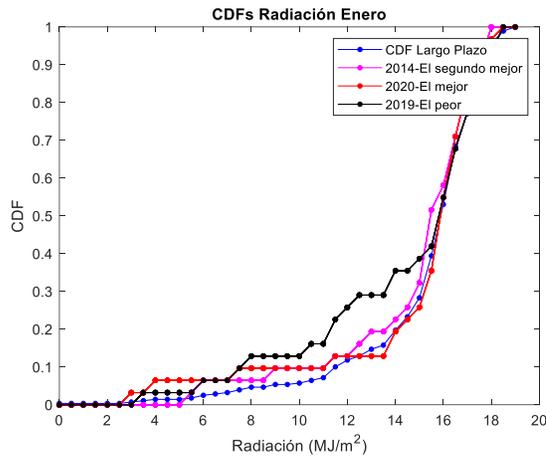
$$\omega_{FS^{jy}} = \sum_1^5 \omega_i \cdot FS_i^{jy} \quad (12)$$

Al utilizar el valor ponderado de los parámetros ω_i , se limita el espectro de las aplicaciones. Por términos de practicidad $\omega_{FS^{jy}}$ también es llamada WFS, ya que, es el nombre común que se le suele dar en distintos artículos y en el manual TMY (Huld et al., 2018; Wilcox & Marion, 2008).

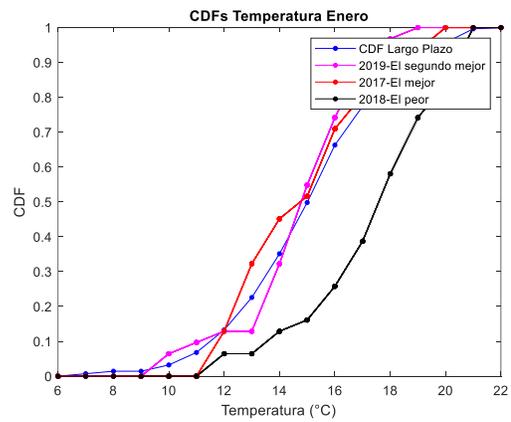
A continuación, en la tabla 6 se muestran los pesos ω_i , utilizados para este estudio. Estos pesos fueron elegidos en base a los distintos estudios, como los mostrados en la tabla 1.

Tabla 6. Pesos utilizados en la elaboración de los TMY's

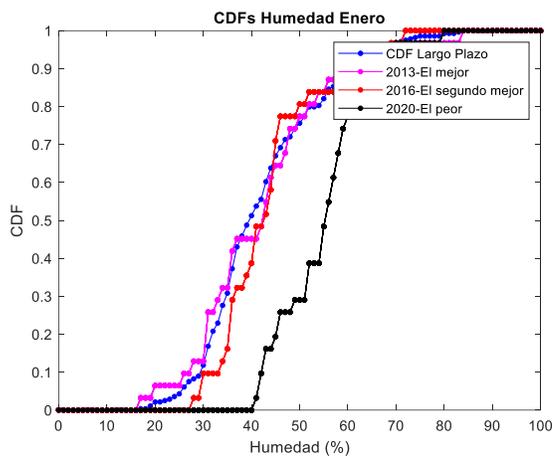
| Parámetro meteorológico | TMYE | TMYS | TMYT | TMYV |
|-------------------------|------|------|------|------|
| GHI | 1/2 | 1/2 | 1/4 | 1/6 |
| TEMP | 1/2 | 1/4 | 1/2 | 1/6 |
| HR | 1/2 | 3/20 | 3/20 | 1/6 |
| VV | 1/2 | 1/10 | 1/10 | 1/4 |
| DDV | - | - | - | 1/4 |



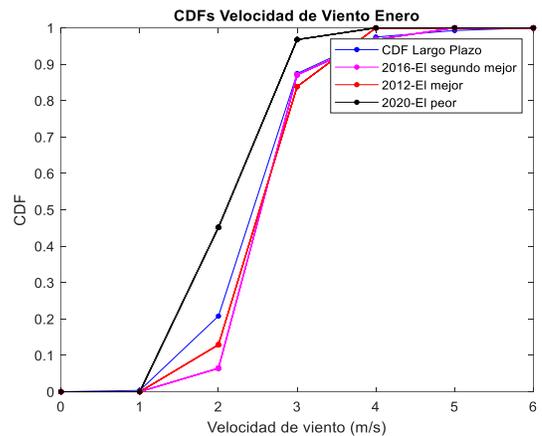
a) CDFs de irradiación diaria



b) CDFs de temperatura promedio diaria



c) CDFs de humedad relativa promedio diaria



d) CDFs de velocidad de viento promedio diaria

Figura 13. Gráficas comparativas para cada uno de los parámetros: radiación, temperatura, humedad relativa y velocidad de viento, de CDF de largo plazo contra los CDF con el año con el valor más pequeño (el mejor), el año con el segundo valor más pequeño de CDF

Una vez obtenidos los valores de ω_i para cada mes j , se separaron los cuatro meses con el ω_{FS}^{jy} más bajo, pero se dejaron fuera meses donde hubo una interpolación de 8% de los datos faltantes. Los ordenamos de manera creciente, de menor a mayor ω_{FS}^{jy} . Después a estos meses seleccionados se les aplica los siguientes filtros de persistencia, el cual se explicará en la sección 3.2.3. Pero, en algunos casos después de aplicar los filtros de persistencia fue necesario aplicar otro filtro para la elección de los meses. Este se utiliza sólo en la elección final de los meses candidatos, al procedimiento utilizado para este filtrado de meses, también se le conoce como método Pissimanis (Gazela & Mathioulakis, 2001; Pissimanis et al., 1988). Ha sido recomendado utilizarse últimamente en diversos artículos, esto es porque se abrevia el número de métodos estadísticos, además de que ha tenido buenos resultados; resultando así, en una manera más simple y rápida de escoger los meses conformados para el TMY (Jiang, 2010; Kambezidis et al., 2020).

En este caso particular, solo se utilizó cuando se eliminaban todos los meses candidatos con los filtros de persistencia propuestos originalmente por la metodología de Sandia o también cuando este filtrado variaba por solamente un día.

Al analizar visualmente las gráficas, y también los índices de desempeño, se demostró que en algunos casos el uso del método de Pissimanis, comparado con el filtro de persistencia de Sandia, mostraba mejores resultados al compararse con los datos de Largo Plazo, especialmente para ciertas variables como radiación solar y temperatura.

El proceso de filtrado de datos por Pissimanis consiste en utilizar la raíz del error cuadrático medio (RMSD, por sus siglas en inglés, root mean square difference) sólo para la variable de radiación solar:

$$RMSD = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N_i^{jy}} (GHI_i^{jy} - \overline{GHI}_i^j)}{N_i^{jy}} \right]^{1/2} \quad (13)$$

Donde N_i^{jy} es el número de lecturas diarias del mes-año jy , GHI_i^{jy} son los valores de radiación solar global de cada mes-año jy y el día i . \overline{GHI}_i^j es el promedio de la radiación

solar global diaria a largo plazo, es decir el promedio diario de todos los años para ese mes j . Por consiguiente, el valor con *RMSD* más bajo será el seleccionado para formar parte del TMM.

3.2.3. Filtros de persistencia

Los filtros de persistencia son utilizados para eliminar situaciones atípicas, como puede ser que se repitan días nublados por arriba del promedio que se tiene estimado como días nublados para ese mes. También días con bajas o altas temperaturas. La metodología de Sandia hace poco probable que esto ocurra, pero este paso eliminará situaciones anómalas que pudieran existir. Estadísticamente lo que se busca es conservar la autocorrelación de la instancia mes-año que se seleccione finalmente sea lo más típica posible para el lugar seleccionado

Los filtros de persistencia que se han escogido fueron tomados del manual de TMY3 (Wilcox & Marion, 2008) y del libro “Año Meteorológico Típico para aplicaciones de Energía Solar” (Alonso Suárez et al., 2019). Estos filtros no descartan precisamente tres años para dejar el año a elegir, sino que varios filtros pueden descartar a un mismo año. Tampoco descartará siempre al mejor mes candidato. Los criterios aquí utilizados están basados en los días consecutivos con “baja irradiancia” (días nublados), o los días que son muy “fríos” o “cálidos”. Pero primero explicaremos que son los considerados días fríos, cálidos o de baja irradiancia según la metodología de SANDIA.

- Baja irradiación solar se refiere a que se encuentre por debajo del percentil de 33% (1/3) de la CDF de Largo plazo.
- Un día frío, se dice a los días donde la temperatura promedio diaria se encuentra por debajo del percentil de 33% (1/3) de la CDF de Largo Plazo.
- Un día cálido es considerado a los días donde la temperatura promedio diaria se encuentre por arriba del percentil de 67% (2/3) de la CDF de Largo Plazo.

En la siguiente figura (fig. 14) se ilustra como se obtiene los percentiles 1/3 y 2/3 para el mes de enero y la variable de Temperatura.

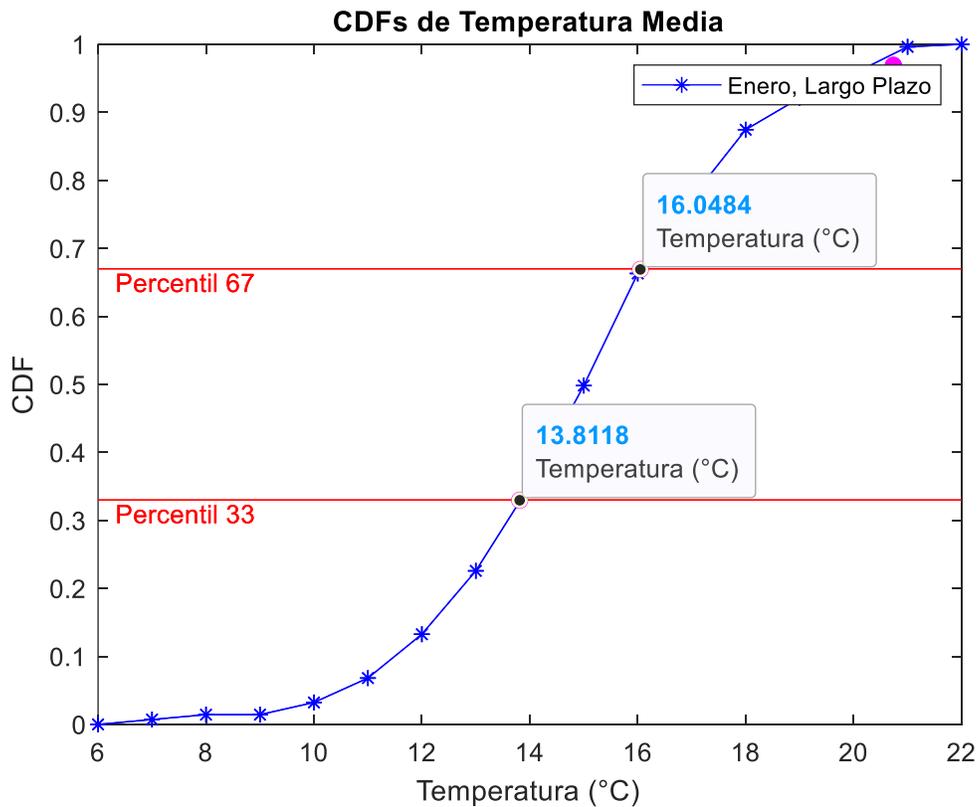


Figura 14. Funciones de probabilidad acumulada de largo plazo para la variable de Temperatura de Enero, se muestran los percentiles de persistencia utilizados

En la figura 15 se muestra como ejemplo el valor de percentil usado para enero con la variable de irradiación global diaria, estos ejemplos se colocaron para que el usuario pudiera tener una mejor visualización del paso de percentiles utilizado en la metodología de sandia.

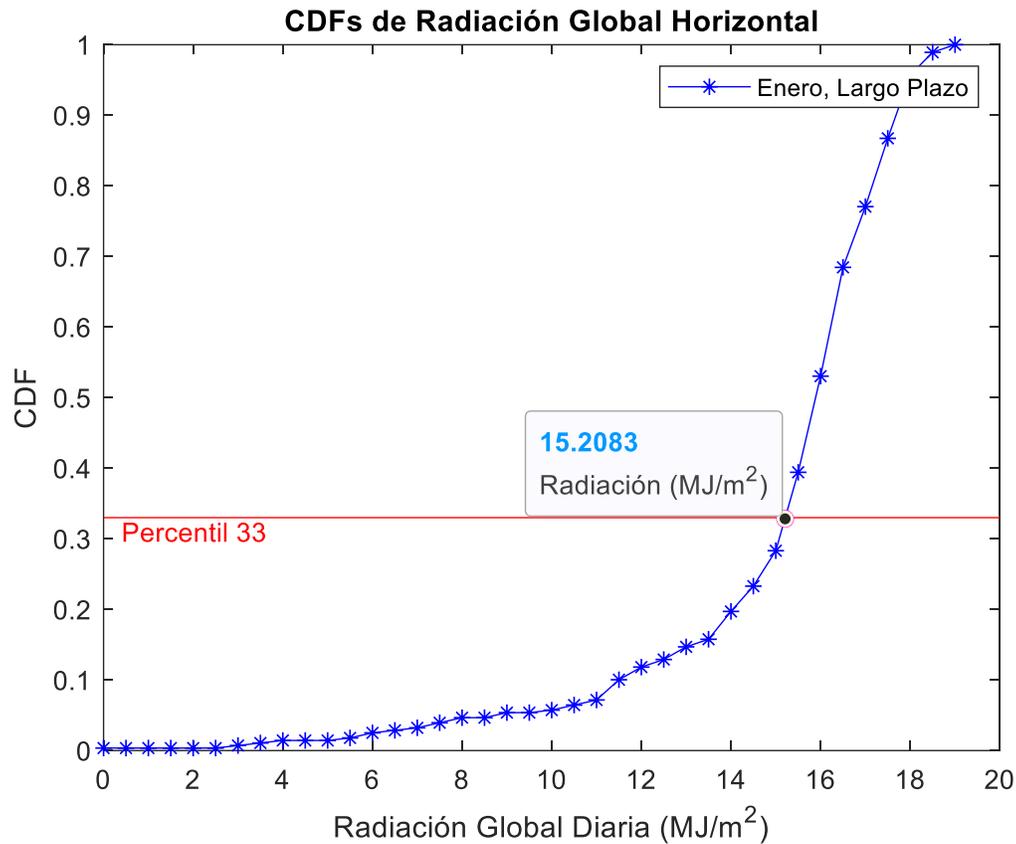


Figura 15. Funciones de probabilidad acumulada de largo plazo para la variable de Irradiación global de enero, se muestran el percentil de persistencia utilizado.

Es común en la metodología de Sandía, encontrar un término llamado “racha” (*runs* en inglés) que se refiere simplemente a dos o más días consecutivos que cumplan algunos de los criterios mencionados anteriormente.

En base a los indicadores mencionados aplicamos cuatro filtros que se listan a continuación:

F₁: descarta que el mes del año seleccionado que se está analizando contenga el máximo número de rachas que cumplan con alguna de las tres condiciones previamente mencionadas

F_2 : descarta el mes del año seleccionado que no existan rachas, es decir que no ocurra ninguna racha para ese mes que se está inspeccionando

F_3 : descarta el mes del año seleccionado donde se tenga la longitud de la racha más larga por debajo del percentil 33 de radiación solar

F_4 : descarta el mes del año seleccionado donde la suma de las longitudes de rachas de Temperatura por arriba del percentil 33 y 67 respectivamente sea la más larga

Los filtros F_1 y F_2 , que eliminan el mes candidato con mayor número de rachas y cero rachas, respectivamente. Esto, con el fin de no encontrarse con un mes candidato extremadamente anómalo, que quede considerado después de aplicar la metodología, pero la probabilidad de que este filtro elimine algún mes es poco probable. F_3 eliminará la racha más grande que exista con días nublados consecutivos. Por último, F_4 eliminará valores extremos de Temperatura.

Al final el mes escogido para ser parte del TMY, será aquel que después de pasar los filtros sea el valor más pequeño de ωFS^{jy} con respecto a los otros meses candidatos. Este procedimiento se utilizó en cada uno de los TMY's de forma independiente.

En caso de ocurrir que se eliminen todos los meses con el filtro de los percentiles, o la variación entre ellos sea de tan solo un día, se procedió a utilizar el método de Pissimanis, mencionado en la sección anterior.

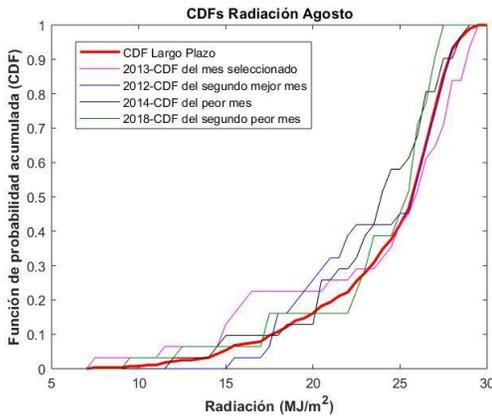
Que los años hayan sido eliminados no quiere decir que tiene un mal comportamiento para todas las variables, se ha reportado que en algunos casos hace falta que tenga un comportamiento atípico para una sola variable para ser descartado (Alonso Suárez et al., 2019).

Para la obtención de los TMM, también se puede observar gráficamente el proceso de selección. En la siguiente figura (fig.15) se tomaron los años donde el año más típico (menor WFS) no fue eliminado por el filtro de percentiles o Pissimanis para los distintos TMY. En estas figuras, se obtuvo esto para Irradiación global diaria y temperatura, donde en los años que hemos escogido para graficar podemos observar la cercanía de las CDF de largo plazo con respecto al TMM y al segundo mejor mes. En cambio, podemos notar

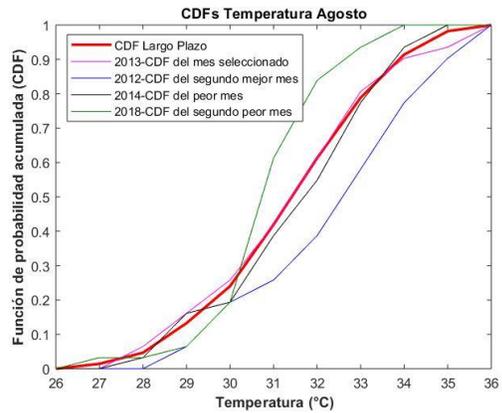
que existe mayor distancia entre el CDF de largo plazo, el peor mes y el segundo peor mes (Valor mayor de WFS). Esto es lo que se esperaría de la metodología de Sandia, que para el mes más representativo (TMM), su CDF estuviera más cercano a la CDF de largo plazo, por consiguiente, el peor mes, su cercanía a la CDF de largo plazo no será tan buena comparada a los otros años. Pero, debido a que se ponderan varias variables, (algunas variables serán más importantes que otras debido al peso que le demos a esa variable); pues, esto implica en que el mejor mes puede no ser precisamente el mejor mes para todas las variables por separado. Entonces, también un mes que haya sido rechazado no significa que tiene un comportamiento anómalo para todas las variables, de hecho, puede pasar que solo se comporte mal con una sola variable, pero debido a que es una sumatoria de valores, todos los demás valores se verán afectados para la selección. Es por eso la importancia de tener una buena calidad de nuestros datos, ya que valores erróneos podrían eliminar meses representativos.

En los ejemplos mostrados en la figura 16 podemos notar que en la figura a) que el mes seleccionado para irradiación diaria no se encuentra tan semejante como en la figura b) para Temperatura, es decir si muestra un comportamiento similar a la CDF de largo plazo, pero el comportamiento es más similar en la figura b) para Temperatura. En el caso de TMYS (figura c), la irradiación diaria muestra un comportamiento similar que en el caso de temperatura promedio (figura d). Esto nos ilustra un poco el carácter del compromiso que debe tener el mes seleccionado para la serie típica.

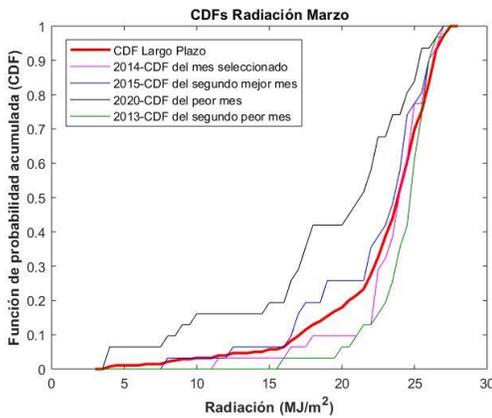
Debido a que se intenta generar un TMY donde cada mes seleccionado es óptimo para cada variable se obtienen en algunos casos distintos resultados. En otros casos, los resultados son muy similares, algunos meses-año parecen cercanos entre sí, por ejemplo, la irradiación solar en algunos meses es bastante similar, tenemos como ejemplo junio, la variable WFS tiene poca diferencia entre sí, por esto el TMY para todas las configuraciones fue el mismo mes, es decir, la ponderación, no afectó significativamente a la toma final de decisión para el mes típico.



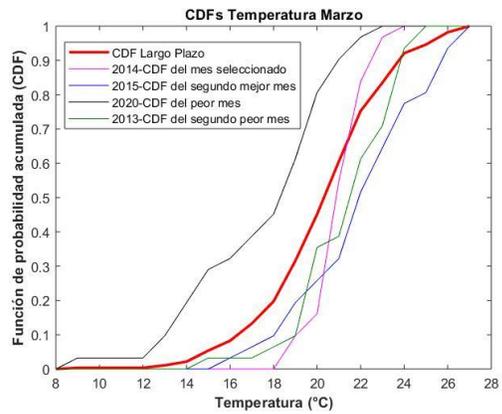
a) Agosto TMYE: irradiación diaria



b) Agosto TMYE Temperatura promedio



c) Marzo TMYS: irradiación diaria



d) Marzo TMYS: Temperatura Promedio

Figura 16. Ejemplos de selecciones de los meses típicos para distintos TMY para los parámetros de irradiación diaria y temperatura promedio. Se encuentra graficado el mes seleccionado (TMM), junto con dos meses más atípicos (mayor valor de WFS) y el segundo mes seleccionado (TMM), junto con dos meses más atípicos (mayor valor de WFS) y el segundo mes más típico (WFS más bajo) en comparación con la CDF de largo plazo

3.2.4. Unión de los Meses Meteorológicos Típicos (TMM)

Al momento de unir los meses típicos que conforman el TMY, se generan discontinuidades, por el hecho de provenir de distintos años. Estas discontinuidades son generadas entre las 0 y 23 horas del primer día del mes y el último del mes anterior. Sucede esto es para los datos de temperatura, humedad y en algunos casos la velocidad de viento, aunque no es necesario su post procesamiento debido a su alta variabilidad temporal. Por consiguiente, tampoco es necesario para la dirección de viento. En el caso de irradiación solar, es un hecho que no es necesario ya que estas interfaces suceden durante la noche, donde la irradiación tiene un valor de 0 W/m^2 . Para suavizar o unir estos meses, se utilizó la interpolación por splines cúbicos, para un máximo de cuatro horas al inicio de la interfaz y cuatro horas después de la interfaz, es decir un máximo de 8 horas en total. En algunos casos no fue necesario las interpolaciones, o fueron de tan solo veinte minutos en total, ya sea porque provienen del mismo año, o porque el comportamiento de las interfaces de los meses a concatenar era bastante similar. Es importante denotar que fueron muy pocos los meses donde fue necesario utilizar la cantidad total ocho horas.

3.2.5. Elaboración del TMYDDV

No hay muchos estudios que consideren como un factor relevante la dirección de viento para estudios de investigación en simulaciones, lo cual es algo sorprendente, considerando que la estadística de dirección de viento juega un papel importante para algunos estudios, como, por ejemplo, en el modelado de la difusión de contaminantes. Incluso puede utilizarse en simulaciones de energía, ya que podríamos conocer de donde proviene el viento que podría afectar en la transferencia de calor o humedad en la superficie (van Doorn et al., 2000).

La dirección de viento no puede analizarse igual que otras variables. Esto se debe a que la dirección de viento (bidimensional) es una variable circular que se puede representar como un punto en la circunferencia de un círculo. Por lo tanto, al tratar con datos circulares como las direcciones de viento, no podemos usar métodos lineales estándar como la media aritmética y la desviación estándar. Alguno de los métodos que se proponen para el análisis de dirección de viento son las probabilidades de frecuencias (Carta et al., 2008).

Tomando esto en cuenta y basados en la metodología denominada por el manual TMY3 (Wilcox & Marion, 2008), se propone una opción para obtener un mes típico utilizado sólo la variable dirección de viento. El procedimiento consiste en lo siguiente: Se tomaron los valores de dirección de viento para cada mes-año y se calcularon las frecuencias de estos valores, estableciendo los rangos mostrados en la tabla 6. En esta parte se eliminaron valores de dirección de viento cuyo módulo fuese menor a 1 m/s, debido a que puede ser que la veleta se encuentre estancada. Lo dividimos en 8 secciones como se muestra en la tabla 7, es decir cada 45°. Con estos rangos establecidos, en base a todos los datos correspondientes del mes-año, se obtienen las frecuencias de estos datos, para después obtener la frecuencia relativa de cada mes-año, también la llamamos frecuencia relativa de corto plazo, como lo muestra la ecuación siguiente:

$$FR_i^{jy} = \frac{f_i^{jy}}{N_i^{jy}} \quad (14)$$

Siendo f_i^{jy} las frecuencias del conjunto de valores de la variable i para el mes j del año y , y N_i^{jy} sería cantidad de elementos del conjunto f_i^{jy} . Una vez obtenidas las frecuencias para cada mes-año. Después obtenemos las frecuencias relativas, que en este trabajo denominamos de largo plazo, es decir, que sería para el total de años observado para el respectivo mes, esto se puede resumir en la siguiente ecuación:

$$FR_i^j = \frac{f_i^j}{N_i^j} \quad (15)$$

Donde f_i^j corresponde al conjunto de valores de la variable i para el mes j y N_i^j sería la cantidad de elementos del conjunto f_i^j . Después restamos las frecuencias relativas de Largo plazo menos las frecuencias relativas de corto plazo:

$$DFR_i^{jy} = \frac{1}{N_i^j} \sum_{i=1}^{N_i^j} |FR_i^j - FR_i^{jy}| \quad (16)$$

Por consiguiente, el mes-año, o valor de DFR_i^{jy} más bajo será el elegido para formar parte de mes típico de dirección de viento. Al Igual que como en los otros análisis de la del mes típico para los otros TMY's, se cuidó que el porcentaje de datos rellenados obtención por interpolación no fuera mayor al 8%.

En comparación con la metodología de SANDIA, este proceso no utiliza valores de ponderación, sino que, en este caso, la única variable de interés sería la dirección de viento. Además, en lugar de utilizar las funciones de distribución acumulada, estamos utilizando histogramas de frecuencias para las direcciones de viento mostradas en la tabla 7. Una vez obtenidos los años correspondientes para formar parte del mes típico de dirección de viento, se utilizarán los mismos años para temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y radiación global. Por esto mismo, se tendrá que llevar el procedimiento habitual de suavizado de datos para unir variables como temperatura y humedad relativa.

Tabla 7. Tabla de puntos cardinales y rangos de direcciones de viento

| Variable | Punto Cardinal | Rango de Dirección de viento (°) |
|-----------------|-----------------------|---|
| N | Norte | 22.5 |
| NE | Noroeste | 67.5 |
| E | Este | 112.5 |
| SE | Sureste | 157.5 |
| S | Sur | 202.5 |
| SW | Suroeste | 247.5 |
| W | Oeste | 292.5 |
| NW | Noroeste | 337.5 |
| N | Norte | 360 |

3.2.6. Construcción del TMY

En la sección anterior se describió en detalle el procesamiento y análisis de datos que fue necesario para poder utilizar la metodología correspondiente para la obtención de los distintos TMY's, además de la nueva metodología del año típico de dirección de viento propuesto en este estudio. Este capítulo describe los procedimientos más relevantes y los resultados destacables obtenidos de la metodología; el análisis de la aplicación de estas metodologías se describe en el capítulo siguiente. Esperamos que, con estas explicaciones y pasos, el usuario pueda entender la metodología y así, utilizar el TMY que mejor le convenga, o sí necesitase armar un TMY para su localidad, que con este trabajo pueda hacerlo con éxito. Es decir, que, con estas herramientas adquiridas en esta tesis, el usuario pueda comprender cuando puede utilizar el TMY, para que aplicaciones y cuando sería no utilizable, que podría ser que necesitara de un análisis más profundo y detallado de lo que ofrece esta metodología. Finalmente, los TMY's estarán presentados en forma electrónica en formato Excel, estos estarán subidos de manera gratuita, disponible para cualquier usuario que necesite de estos datos.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados TMY'S

Las series 10-minutales típicas se elaboraron buscando preservar la media de largo plazo, la variabilidad característica y las correlaciones entre las variables. Al utilizar datos reales con concurrencia temporal aseguramos que sucedan las últimas dos, pero la primera depende del largo de la estadística de datos disponible. Para nuestro caso particular no tenemos la estadística suficiente para asegurar completamente este punto, ya que la metodología SANDIA sugiere mínimo tener diez años de datos, pero estos datos pueden ser fácilmente incorporados a medida que se obtengan.

Los meses típicos seleccionados, se muestra a continuación en la tabla 8. Recordando, estos TMY's se obtuvieron en base a la metodología de Sandia. En la figura 17, se realiza una comparación de los meses obtenidos por el TMYE y los meses de "Largo Plazo", para encontrar la comparación que existe entre ellos.

En el caso particular de TMYE, donde la ponderación de las variables utilizadas es igual para todas, podemos notar que las diferencias más grandes existen para velocidad de viento y humedad relativa, esto sugiere, que si se quiere una mejor representación de estas variables, se necesitaría por tanto, tener un valor ponderado más alto para estas variables. En el caso de las variables como radiación y temperatura, se obtienen valores promedio mensuales similares a los de largo plazo en la mayoría de los meses.

Tabla 8. Meses Meteorológicos Típicos del TMY

| Mes | TMYE | TMYS | TMYT | TMYV |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Enero | 2011 | 2011 | 2011 | 2011 |
| Febrero | 2017 | 2017 | 2017 | 2017 |
| Marzo | 2014 | 2014 | 2011 | 2011 |
| Abril | 2012 | 2012 | 2017 | 2017 |
| Mayo | 2016 | 2016 | 2013 | 2016 |
| Junio | 2013 | 2013 | 2013 | 2013 |
| Julio | 2014 | 2014 | 2014 | 2014 |
| Agosto | 2013 | 2013 | 2013 | 2013 |
| Septiembre | 2018 | 2012 | 2012 | 2016 |
| Octubre | 2019 | 2012 | 2012 | 2012 |
| Noviembre | 2013 | 2015 | 2013 | 2012 |
| Diciembre | 2012 | 2012 | 2012 | 2012 |

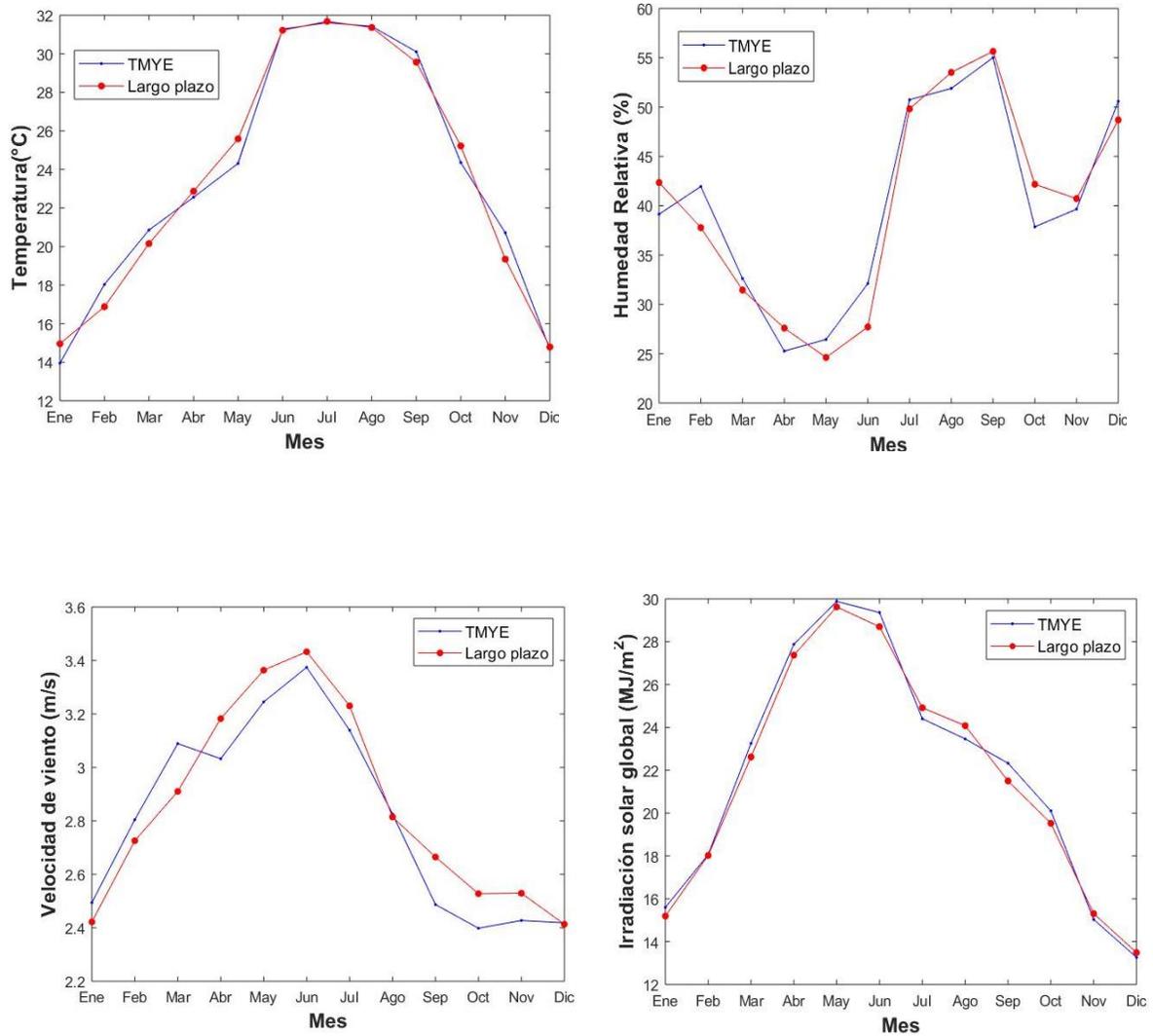


Figura 17. Ejemplos de selecciones de los meses típicos para TMYE. Se encuentra graficado el mes seleccionado (TMM), junto con los meses de largo plazo.

4.1.1. Análisis de datos diarios promedio-anales

Con el fin de tener una idea general del comportamiento de los datos obtenidos por TMY, se realizaron las comparaciones con los datos base.

En la tabla 9, se muestran algunos análisis diarios de los resultados obtenidos, como por ejemplo el máximo de irradiación solar diaria es de 8.90 y 9.01 kWh/m² para TMYE y TMYS respectivamente y la diferencia absoluta que existe contra los datos base es comparativamente pequeña, siendo de .08 kWh/m² y .03 kWh/m².

Para TMYE y TMYS, tenemos que la irradiación diaria promedio, es decir la energía promedio por día es de 6.12 kWh/m² y 6.08 kWh/m² respectivamente, si comparamos esto con los datos base, se tiene una diferencia absoluta de .17 kWh/m² y .13 kWh/m². Que no exista tanta diferencia podría ser, debido a que las FS de los parámetros de radiación solar son comparativamente pequeños, por lo tanto, la selección de TMM para la radiación solar no es muy sensible a la variación de los pesos de los parámetros. Esto se ha obtenido en otros estudios (Su et al.) donde se analizaron diversos rangos de ponderación de parámetros como la radiación solar, la velocidad de viento y la temperatura. Si comparamos con artículos previos realizados por la Universidad de Sonora, se obtuvo que el promedio diario fue de 5.88 kWh/m² para la ciudad de Hermosillo (Cabanillas L., 2005), y en los mapas solares de SOLARGIS han reportado valores de 6.20 kWh/m² (SOLARGIS, 2019), por lo cual nuestros valores se encuentran en el orden establecido por estos artículos. La desviación estándar fue de 1.74 kWh/m² y 1.79 kWh/m², para TMYE Y TMYS respectivamente, esta variación de la media es un indicador de que tanto varía los datos con respecto al valor promedio, el cual no es muy elevado.

En la figura 18 se muestra los datos del TMYE, TMYS y datos base para denotar de manera gráfica los datos diarios promedios anuales de irradiación global horizontal (W/m²). No existe diferencias significativas entre las gráficas, ya que en los tres casos se muestra un comportamiento bastante similar.

Tabla 9. Análisis de los datos promedios diarios de irradiación solar para TMYE y TMYS con los datos base

| Análisis diarios | TMYE | TMYS | Datos base |
|---|------|------|------------|
| GHI (kWh/m ²) | 6.05 | 6.08 | 5.95 |
| Máx. (kWh/m ²) | 8.90 | 9.01 | 8.98 |
| Min (kWh/m ²) | 1.23 | 1.23 | .37 |
| Media (kWh/m ²) | 6.12 | 6.08 | 5.95 |
| Desviación estándar (kWh/m ²) | 1.74 | 1.79 | 1.74 |

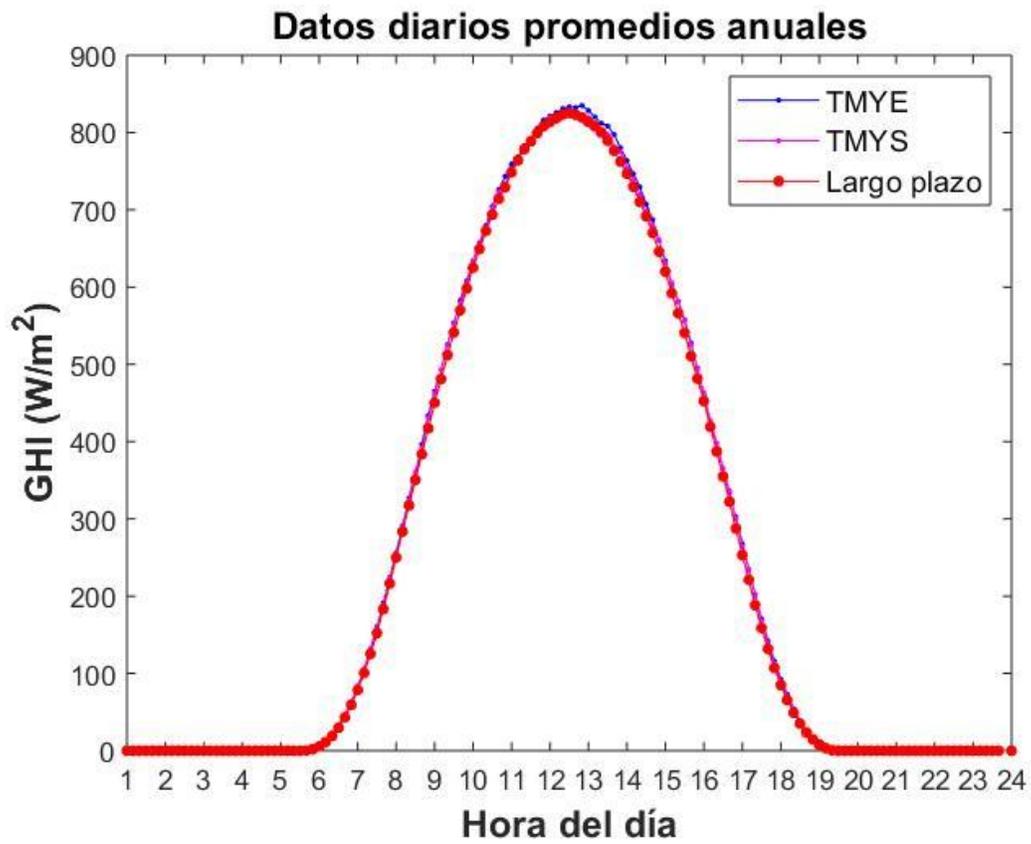


Figura 18. Irradiación Solar GHI horaria de TMYE, TMY5 y datos base

En Temperatura (véase tabla 10), se realizó la comparación de TMYE, TMYT y los datos base. Siendo la Temperatura máxima para TMYE y TMYT iguales con 35 °C y al compararla con los datos base hay sólo 3 ° de diferencia. La temperatura promedio para los tres casos fue exactamente el mismo valor que es 23 °C. La desviación estándar se obtuvo 6.52 y 6.54 °C para TMYE y TMYT respectivamente, lo cual nos dice que, si existe una variación de temperaturas a lo largo del año, esto es de esperarse por ser un clima desértico, es decir temperaturas muy altas durante el verano y bajas durante el invierno.

En la gráfica de la figura 19 se muestran los valores de los datos diarios promedios anuales para TMYE, TMYT y los datos base (Largo Plazo) de la variable de temperatura (°C), donde de nuevo se denota que las gráficas son bastante similares, para el TMYE y TMYT se denota un poco de sobreestimación para las horas de 11 a 17 horas aproximadamente con respecto a los datos base, pero la diferencia no es relevante, ya que no varía más de 2°C.

Se puede agregar de la figura 19 algunas características típicas del sitio, como que el máximo ocurre casi dos horas después de que sucede el máximo de radiación que se ve en la figura 18, es decir, aproximadamente a las 16 horas, esto ocurre debido a la inercia térmica de la región, debido a que se calienta la superficie de la tierra y comienza el lugar a calentarse, es por eso que tenemos las máximas temperaturas aproximadamente a esa hora del día, además que es en Hermosillo, es normal que existan en su mayoría días despejados.

Tabla 10. Análisis de los datos promedios diarios de Temperatura para TMYE y TMYT con los datos base

| Análisis diarios | TMYE | TMYT | Datos base |
|--|-------------|-------------|-------------------|
| Temperatura Máx. (°C) | 35 | 35 | 38 |
| Temperatura Mín. (°C) | 9 | 9 | 4 |
| Temperatura Promedio (°C) | 23 | 23 | 23 |
| Desviación estándar (kWh/m²) | 6.52 | 6.54 | 6.64 |

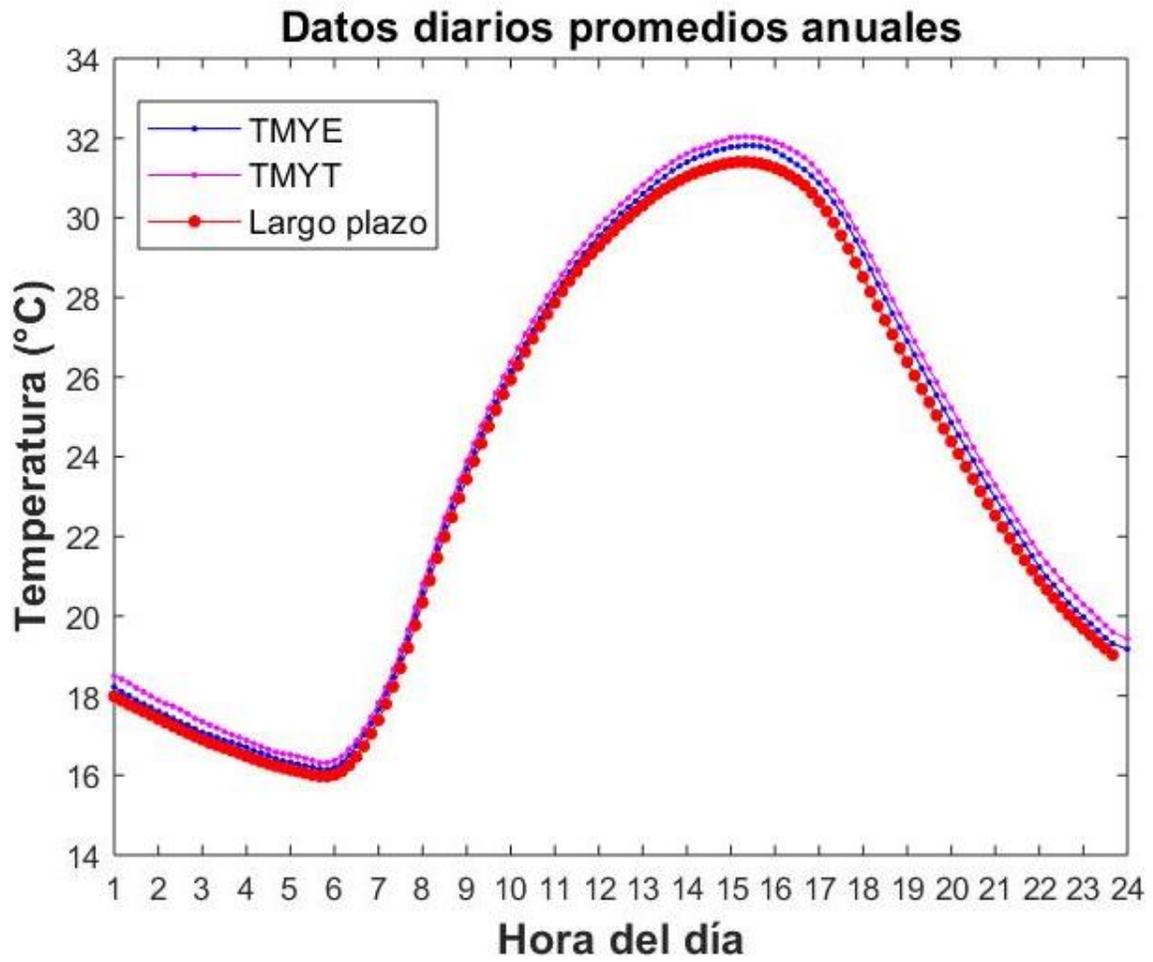


Figura 19. Temperatura promedio diaria anual de TMYE, TMYT y datos base

En el análisis de humedad relativa que se realizó en la tabla 11. No se denotan cambios grandes en las comparación de TMYE y TMYT para la humedad relativa máxima, la promedio y la desviación estándar; pero, comparando con los datos base existen diferencias de 2.19% y 1.34% para TMYE y TMYT respectivamente, las cuales son diferencias que son aceptables (Alonso Suárez et al., 2019). Podemos observar también los comportamientos característicos de la zona de Hermosillo, donde las HR promedio se encuentran en el rango de 40 %, con desviación estándar de 15.29%, lo cual nos indica que los valores de humedad para Hermosillo, Sonora, no suelen ser valores altos de humedad, es decir que en Hermosillo prevalece el clima seco.

En la figura 20 se encuentra grafica la humedad relativa promedio diaria de TMYE y TMYT contra los datos base, aquí es visible que la TMYE y TMYT tiende a sobreestimar los datos en la mayoría de las horas, podría, por ejemplo, darle un valor más alto de ponderación a la variable de humedad relativa, para que así tenga una mejor representación.

Otro punto importante que observamos es el que aparece en la figura 21 que la humedad es completamente dependiente de la temperatura, ya que la forma de la gráfica es un espejo de las gráficas de temperatura, esto nos podría dar un indicio de que nuestros datos se comportan de manera correcta, ya que es el comportamiento característico de estas variables.

Tabla 11. Análisis de los datos promedios diarios de Humedad Relativa para TMYE y TMYT con los datos base

| Análisis diarios | TMYE | TMYT | Datos base |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------------|
| HR Máx. (%) | 77.02 | 77.02 | 98.71 |
| HR Mín. (%) | 9.96 | 13.34 | 6.36 |
| HR Promedio (%) | 38.28 | 39.13 | 40.47 |
| Desviación estándar (%) | 13.31 | 13.90 | 15.29 |

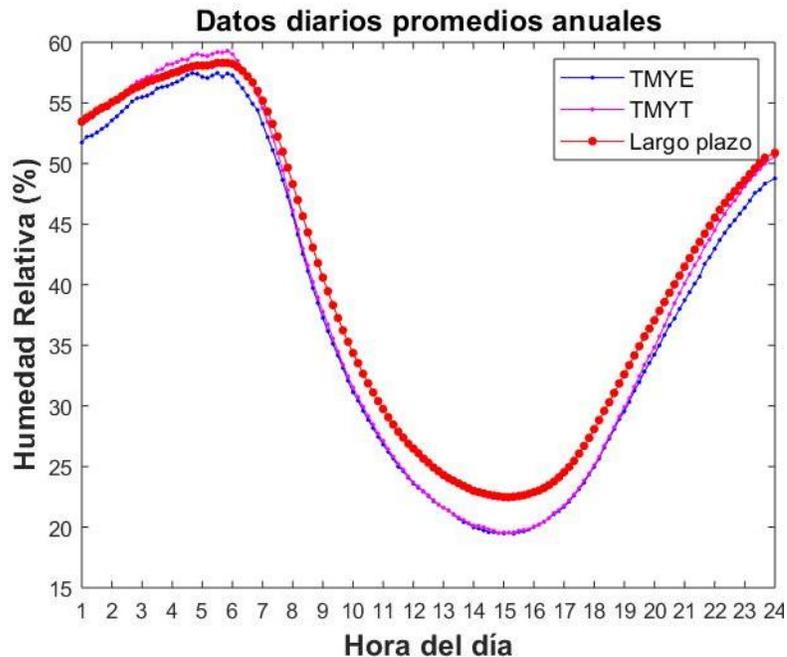


Figura 20. Humedad relativa promedio diaria anual de TMYE, TMYT y datos base

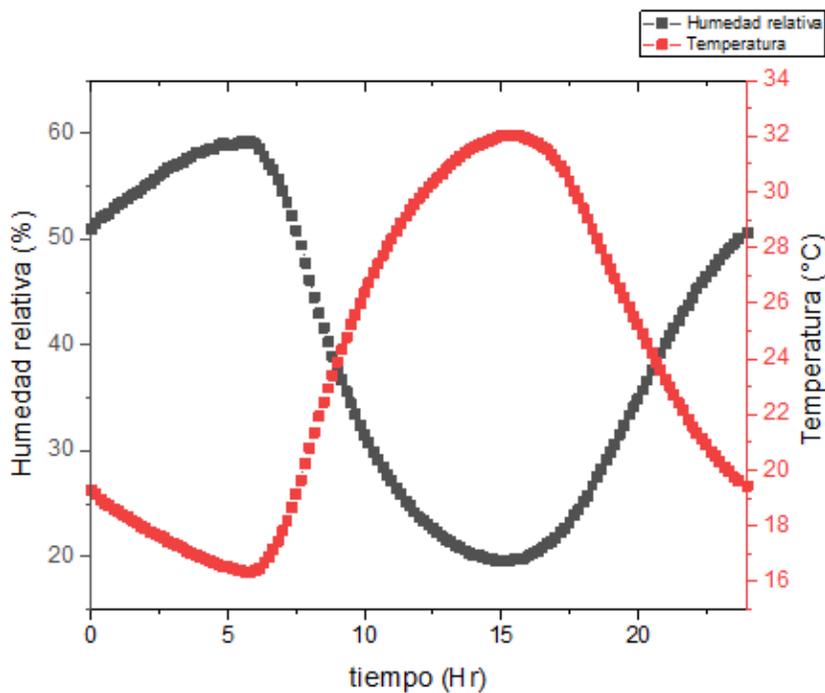


Figura 21. Humedad relativa y temperatura promedio diaria anual de TMYT

Para finalizar los análisis de datos diarios promedio, se analizó los datos de velocidad de viento, utilizando TMYE, TMYT contra los valores de los datos base, que es lo que se ve en la tabla 12; en la tabla podemos observar que los valores máximos de velocidad de viento promedio diario no llegan a ser mayores de 7 m/s para todos los casos. La velocidad de viento promedio fue muy similar con respecto a los datos base, encontrándose solamente una diferencia absoluta de .02 m/s y .03 m/s con respecto a los datos base, para TMYE y TMYV respectivamente.

La gráfica mostrada a continuación (véase figura 22), indica que no se observan diferencias visibles en la mayoría de las horas del día, excepto para las 16 a 19 horas del día donde TMYE y TMYV tienden a sobreestimar con respecto a los datos base por menos de .5 m/s. También, el máximo de velocidades de los datos base puede observarse que ocurre de 17 a 19 horas, que es cuando la temperatura comienza a descender. Esto es porque el comportamiento del viento en estas zonas es principalmente convectivo, es decir es afectado directamente por la temperatura y por consiguiente por la radiación; esto se analiza con la figura 23. Si se compara la temperatura y velocidad de viento utilizando TMYV, podemos encontrar que el comportamiento de velocidad de viento actúa conforme al comportamiento de la temperatura; Es decir, cuando la temperatura aumenta, también lo hace la velocidad de viento y viceversa, a grandes rasgos, ya que habría que hacer un análisis más exhaustivo de este fenómeno.

Tabla 12. Análisis de los datos promedios diarios de Velocidad de viento para TMYE y TMYV con los datos base

| Análisis diarios | TMYE | TMYV | Datos base |
|--------------------------------------|------|------|------------|
| VV Máx. (m/s) | 5.56 | 5.56 | 6.46 |
| VV Mín. (m/s) | 1.52 | 1.48 | 0.71 |
| VV Promedio (m/s) | 2.81 | 2.85 | 2.82 |
| Desviación estándar (m/s) | 0.65 | 0.63 | 0.73 |

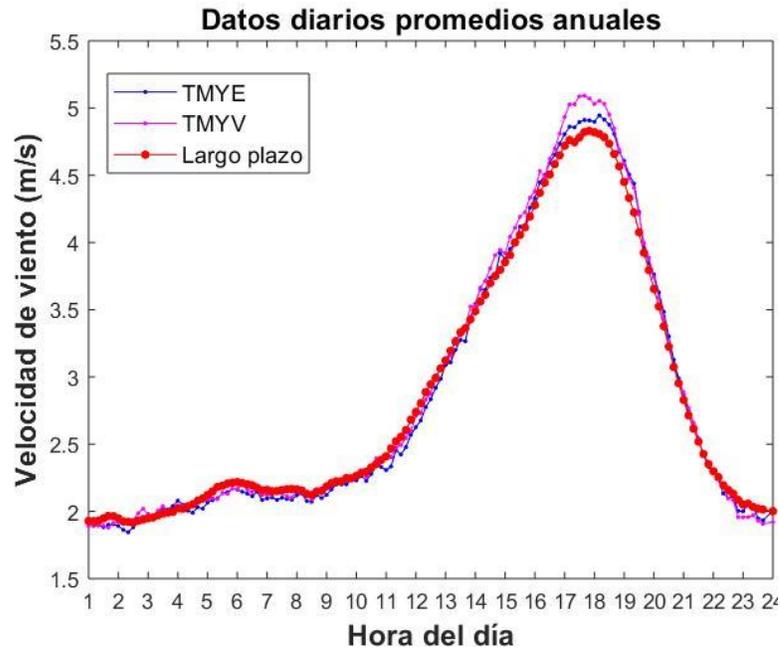


Figura 22. Velocidad de viento promedio diaria anual de TMYE, TMYV y datos base

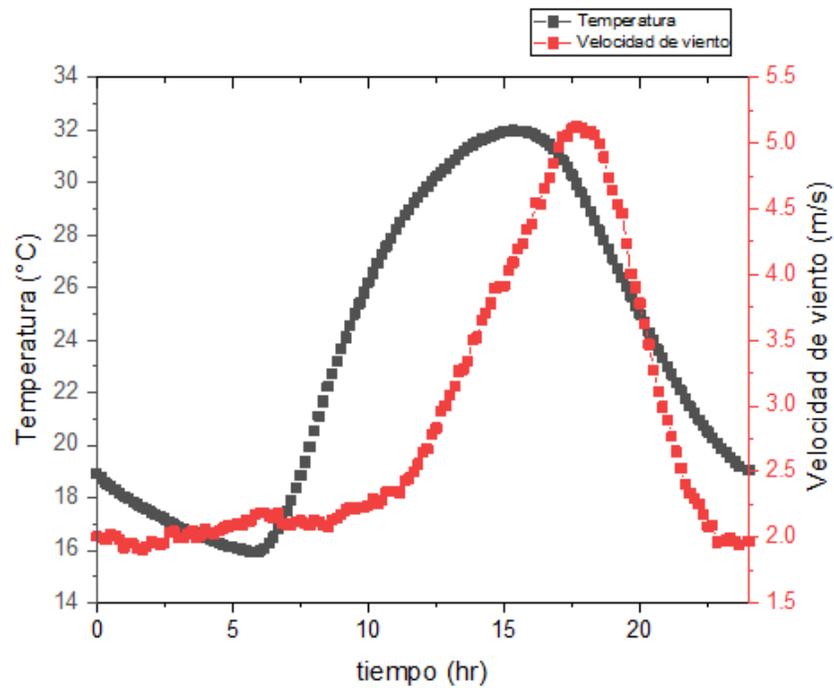


Figura 23. Velocidad de viento y temperatura promedio diaria anual de TMYV

4.1.2. Comparaciones mensuales en gráficas de barras entre TMY's y los datos base.

A continuación, se realiza la comparación de los valores mensuales promedio de los datos seleccionados con respecto a los datos base para cada uno de los TMY's. Se realizó para cada una de las variables por separado.

En el caso de irradiación solar, se muestra en la siguiente gráfica de barras (fig.24) se observa los valores de irradiación solar en MJ/m^2 para cada uno de los meses, donde de manera general se puede encontrar que los valores más altos de irradiación solar ocurren en los meses de mayo y junio, y los meses donde se tiene menor irradiación solar es en los meses de enero y Diciembre. La irradiación solar más alta es de 29 MJ/m^2 en el mes de mayo y la más baja es en diciembre con 13 MJ/m^2 . De manera general las diferencias observadas para los valores de radiación en los distintos TMY's parecen poco significativas, pero en la figura siguiente se observan con mejor detalle.

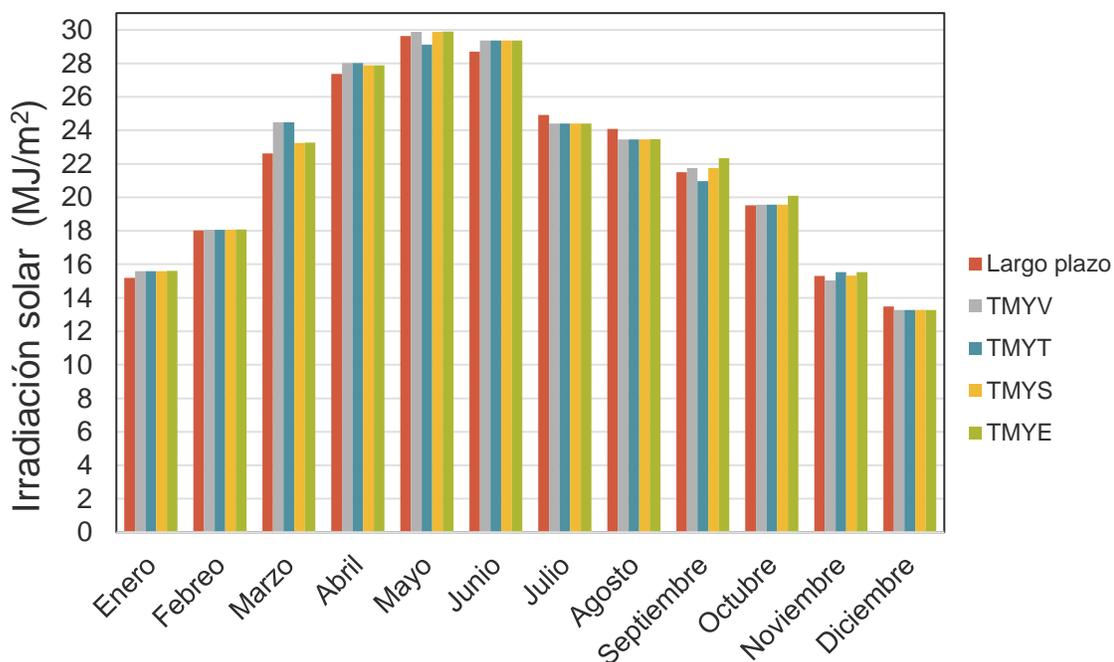


Figura 24. Gráfico de barras de comparación mensual de TMY's y datos base para irradiación solar

Para observar las diferencias con mejor detalle se realizó la gráfica mostrada en la figura 25, en esta gráfica se visualiza la diferencia de los valores de radiación solar mensual de cada uno de los meses para cada uno de los TMY con respecto a los valores de datos base.

En la gráfica se destaca que TMYs siempre fue el que tuvo las diferencias menores para cada uno de los meses. Las diferencias más altas encontradas fueron de TMYT y TMYV, pero recordando que estos TMY tienen valores de ponderación para radiación solar bajos, aun así, la diferencia no llega valores de 2 MJ/m². La gráfica también nos dice que para en este caso los TMY tienen a sobreestimar en la mayoría de los meses.

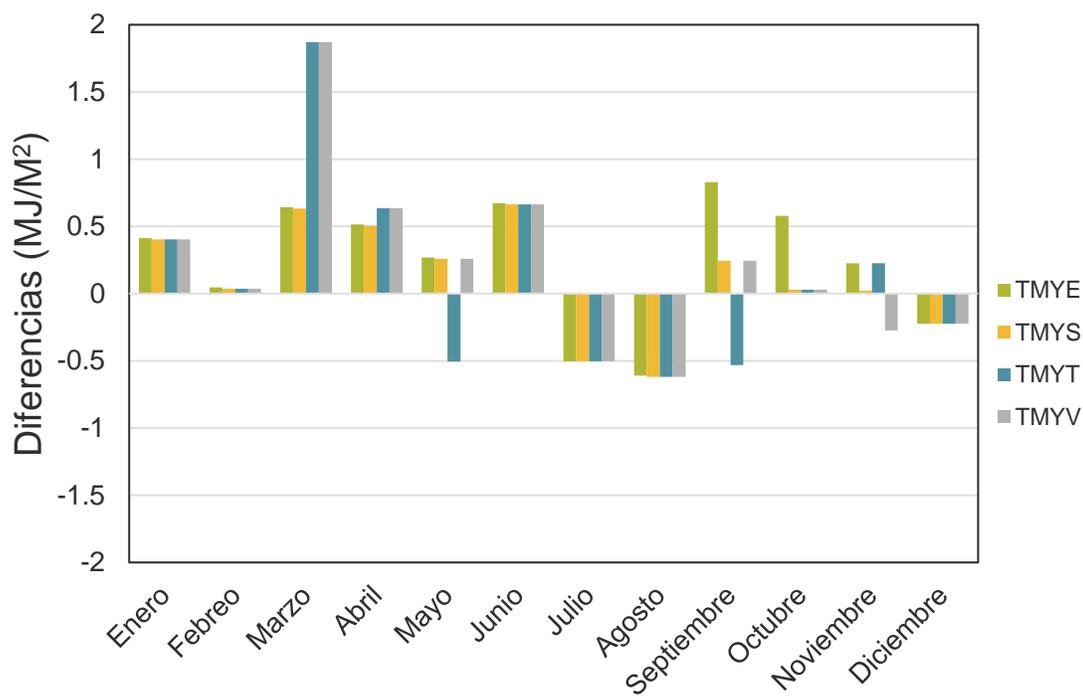


Figura 25. Gráfico de barras de diferencias de comparación de datos base con respecto al TMY para irradiación solar

Analizando la gráfica de barras de temperatura de la figura 26 se encontró que los meses de mayor temperatura corresponden a los meses de junio, julio y agosto con valores promedios mensuales de 31°C, estos meses son parte del verano en Hermosillo sonora. Los valores donde se obtuvo menor temperatura fueron en los meses de diciembre y enero, con temperaturas 14 y 13 °C respectivamente. En esta gráfica de barras las diferencias parecen, al igual que en la gráfica de barras de irradiación solar, no ser diferencias muy grandes, es decir en este caso no contribuye en gran manera el valor de ponderación en esta variable.

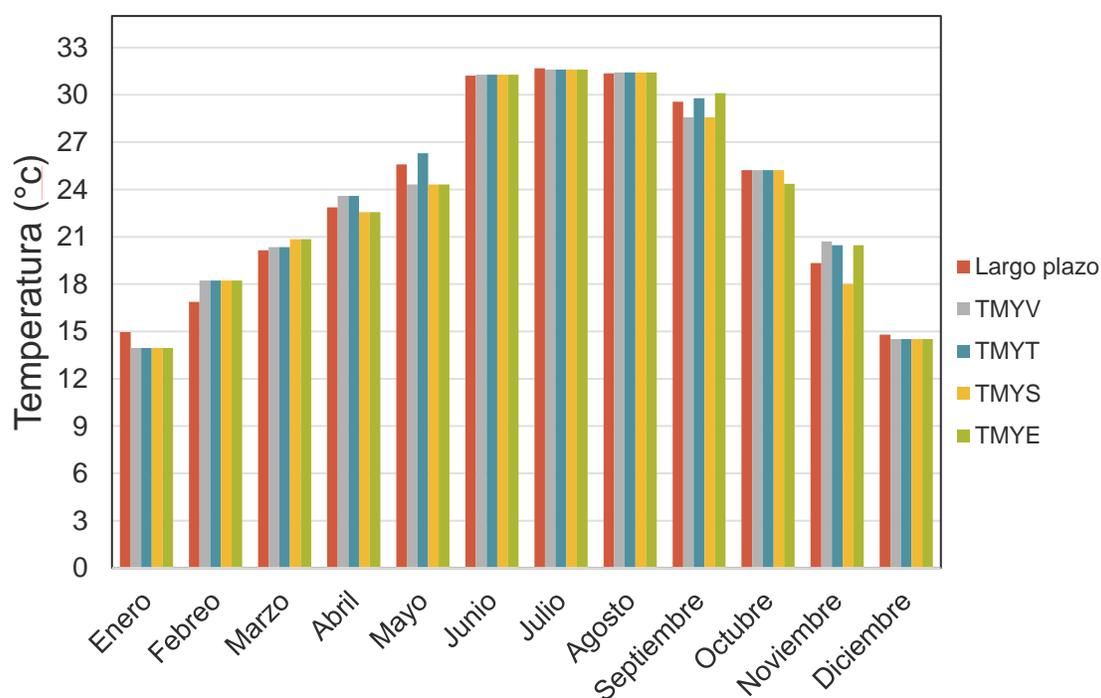


Figura 26. Gráfico de barras de comparación mensual de TMY's y datos base para Temperatura

Las diferencias de la figura 26 se observan a continuación en la figura 27, donde se tiene que TMYT fue en todos los casos el TMY con menor diferencias. Las diferencias no son mayores a 1.5°C lo cual indica que, a menos de que se necesite una precisión muy exacta para esta variable, el valor ponderado no afecta significativamente, como ejemplo el caso de TMYV con un valor de 1/6 para la variable Temperatura. Las menores diferencias de los meses con respecto a los datos base, fueron los meses que corresponden a TMYT; excepto el mes de abril. Analizando porque sucedió esto, se encontró que el filtro de percentiles de días cálidos eliminó el mes que tenía menor diferencia, por lo cual es importante analizar si este percentil es adecuado para Hermosillo, donde es común que días consecutivos con temperaturas altas ocurra.

En este caso, para los meses de junio, julio y agosto se tienen diferencias de .07 °C, esto debido a que estos meses de verano tienden a tener siempre las mismas temperaturas año con año, por lo cual puede considerarse esto al momento de elegir el valor ponderado.

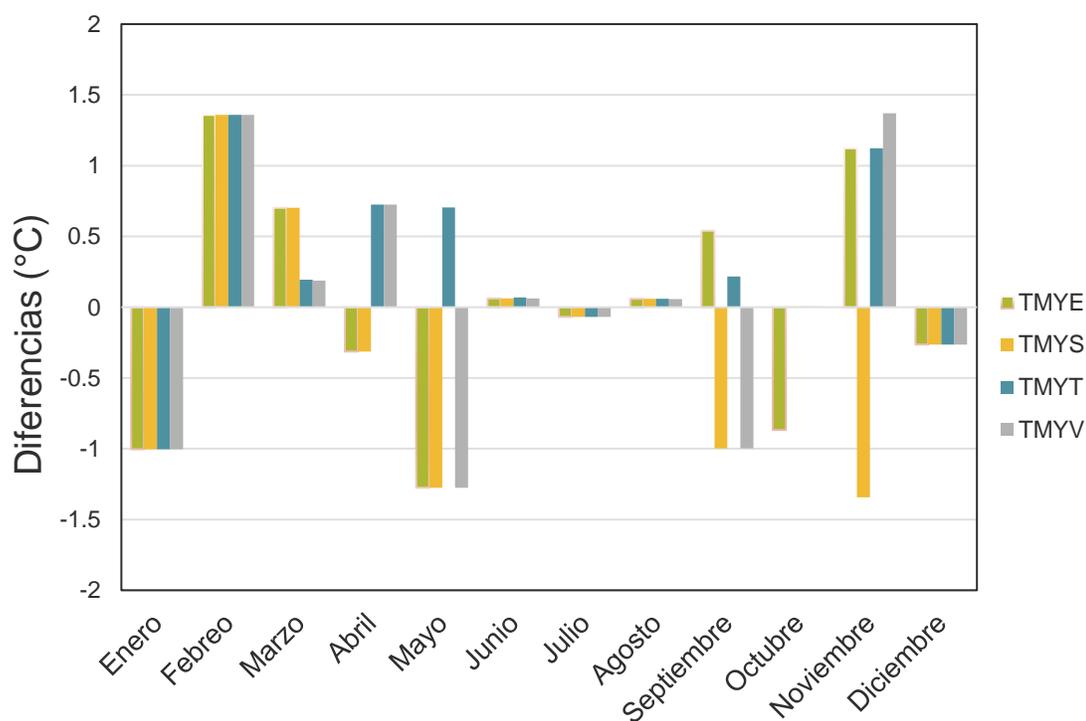


Figura 27. Gráfico de barras de diferencias de comparación de datos base con respecto al TMY para temperatura

En el caso de la humedad relativa, en la gráfica de la figura 28, las humedades relativas con valores promedios mensuales más altas, son los meses de julio, agosto y septiembre y diciembre, siendo los primeros tres, la época de lluvia en esta zona, y el último mes, es el mes donde se tienen las temperaturas más bajas del año. Las humedades relativas más bajas son los meses de abril y mayo. Las diferencias de manera general del TMY con respecto a los datos base, es un poco más perceptible que en los otros casos para alguno de los meses. Vemos también, como existe un decrecimiento en los meses de marzo, abril y mayo, para luego incrementar la humedad en junio e incrementar rápidamente en los meses de julio, agosto y septiembre, para luego decrecer en los siguientes meses hasta llegar a diciembre.

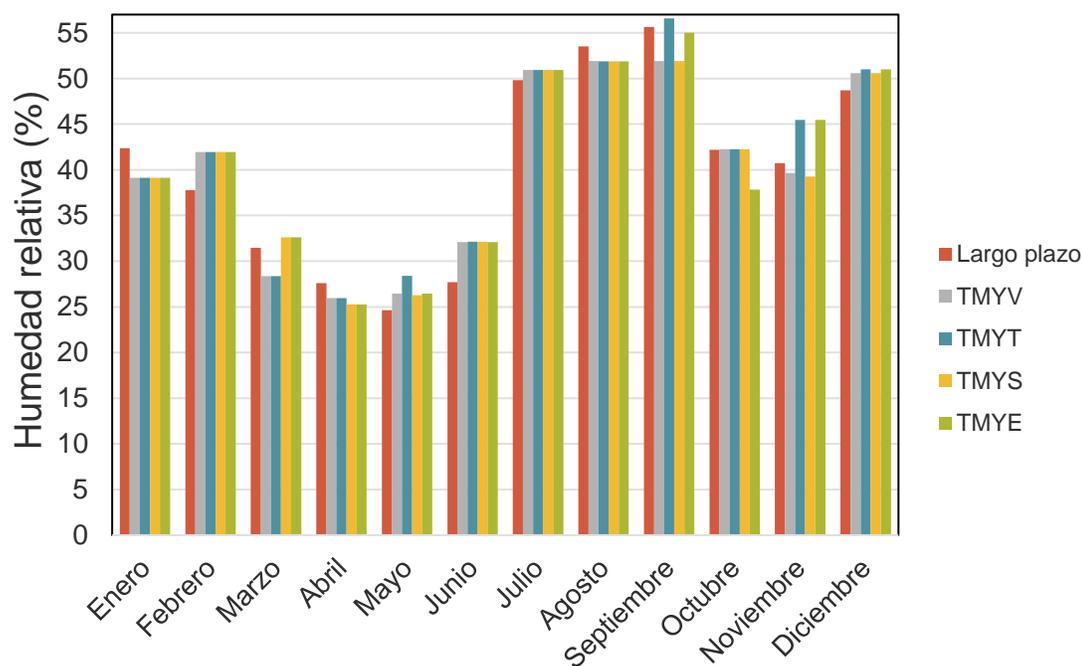


Figura 28. Gráfico de barras de diferencias de comparación de datos base con respecto al TMY para temperatura

En la figura 29, podemos ver que las diferencias promedio mensuales para cada uno de los TMY's. Las diferencias no sobrepasan el 5%. En este caso las diferencias positivas y negativas están dispersadas en cada uno de los meses, no es clara la tendencia que tienen, ya que son bastante variables. En este caso el TMY que tiene menor diferencia tampoco es del todo claro, esto es porque para ninguno de los TMY's se le dio un valor alto a la variable de humedad relativa, a pesar de que esta influye en la temperatura, está también varia con la irradiación e incluso con la velocidad de viento, por lo cual si se requiere mayor exactitud con esta variable es necesario otorgar un valor ponderado más alto para denotar menores diferencias, por eso es importante especificar a que aplicación estará destinada el TMY.

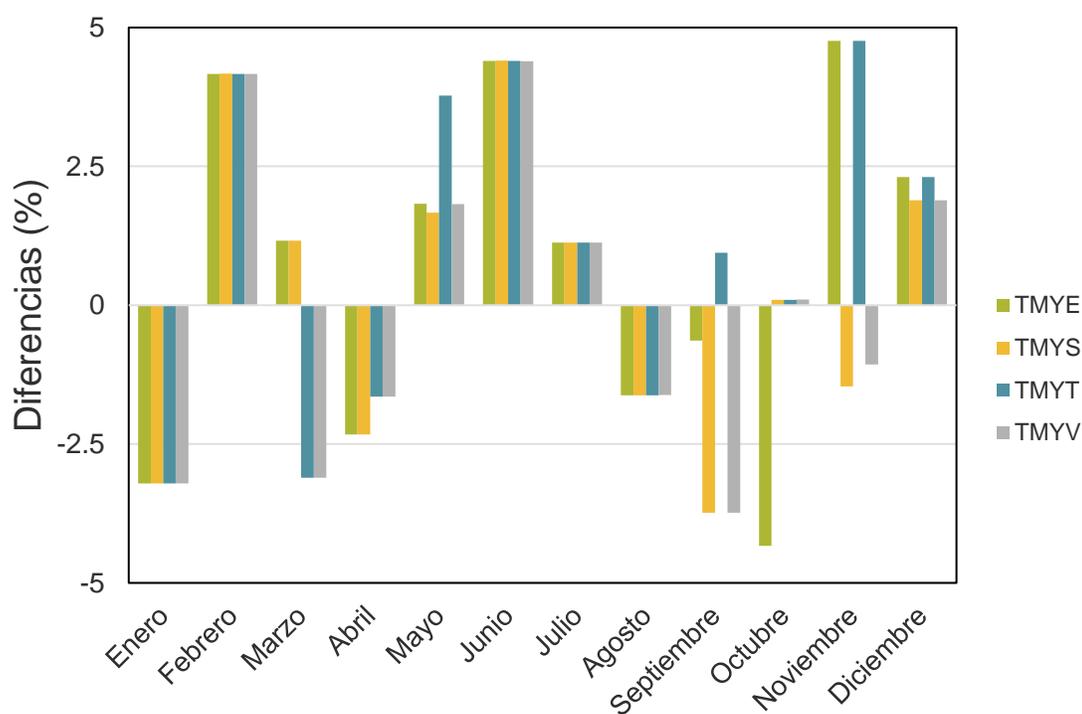


Figura 29. Gráfico de barras de diferencias de comparación de datos base con respecto al TMY para humedad relativa

Los promedios mensuales de velocidad de viento mostrados en la figura 30 nos indican que la velocidad de viento, de manera general, tiene un crecimiento de enero hasta junio, donde luego comienza a decrecer hasta el mes de diciembre. El mes con mayor velocidad de viento es el mes de junio, para después seguir mayo, que son los meses donde existen lluvias. En general Hermosillo, no es conocido por ser ventoso, y esto se comprueba en esta gráfica, donde excepto por TMYT en mayo, los vientos no son mayores a 3.4 m/s.

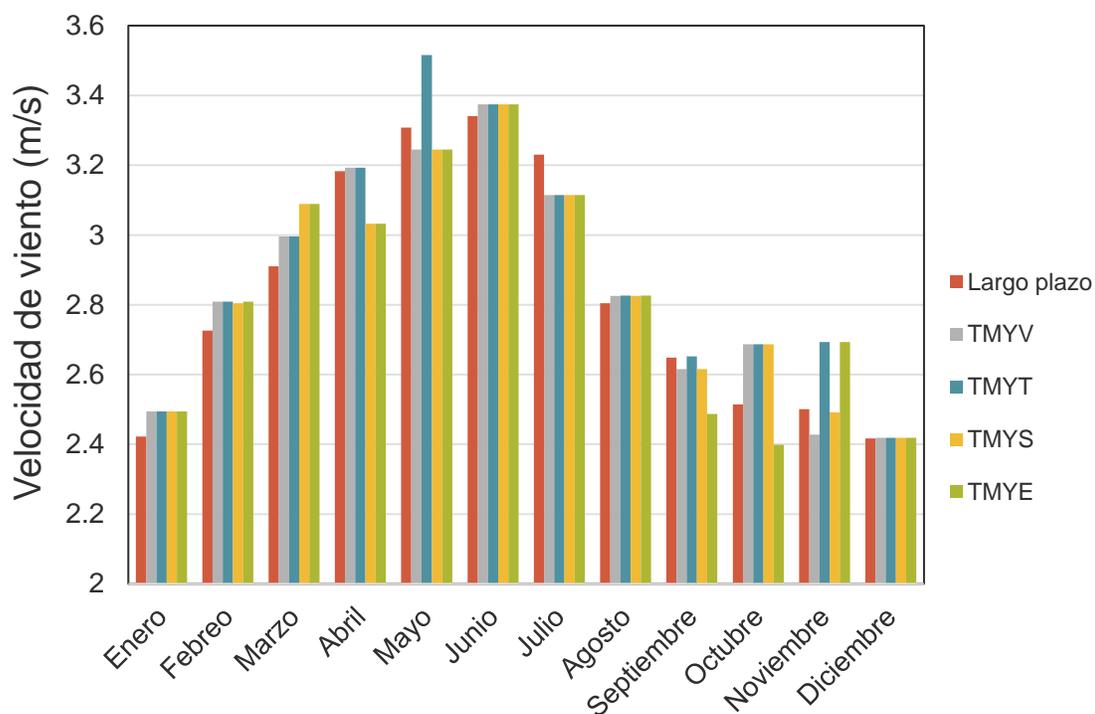


Figura 30. Gráfico de barras de diferencias de comparación de datos base con respecto al TMY para velocidad de viento

La figura 31 demuestra que TMYV tiene las menores diferencias para todos los meses excepto para octubre, esto, podría ser debido a que ocurrió algo similar que con la variable de temperatura (fig. 28). El percentil F_1 , que incluye eliminar los días con más rachas (sumatoria de días con temperaturas menores que percentil 33 y mayores que percentil 67), eliminó el mes con valor menor de ωFS , esto podría ser la posible causa de que ese mes no obtuvo la menor diferencia. Por lo cual, se propone analizar esta condición de la metodología de sandia para un lugar como Hermosillo; porque días calurosos consecutivos podrían ser algo “típico” que ocurre en esa zona. Con esto, se podría corroborar si este paso de la metodología es conveniente para obtener el TMM con menor diferencia con respecto a los datos base, para un tipo de clima como el de Hermosillo.

Las diferencias en todos los meses fueron menores a 0.2 m/s y en su mayoría sus diferencias son positivas. Se destaca también, que las diferencias del mes de diciembre son muy pequeñas, hablamos de diferencias de .002 m/s. Es decir, la variación para el mes de diciembre año con año, es muy pequeña.

Otro punto que destacar, es que, a pesar de que el valor ponderado si influye en la diferencia al compararse entre los distintos TMY's; éstas, aún con valores de ponderación de 1/10 para velocidad de viento, sigue siendo menor a .2 m/s, por lo cual, dependerá del usuario que tanta exactitud necesite con respecto a esta variable.

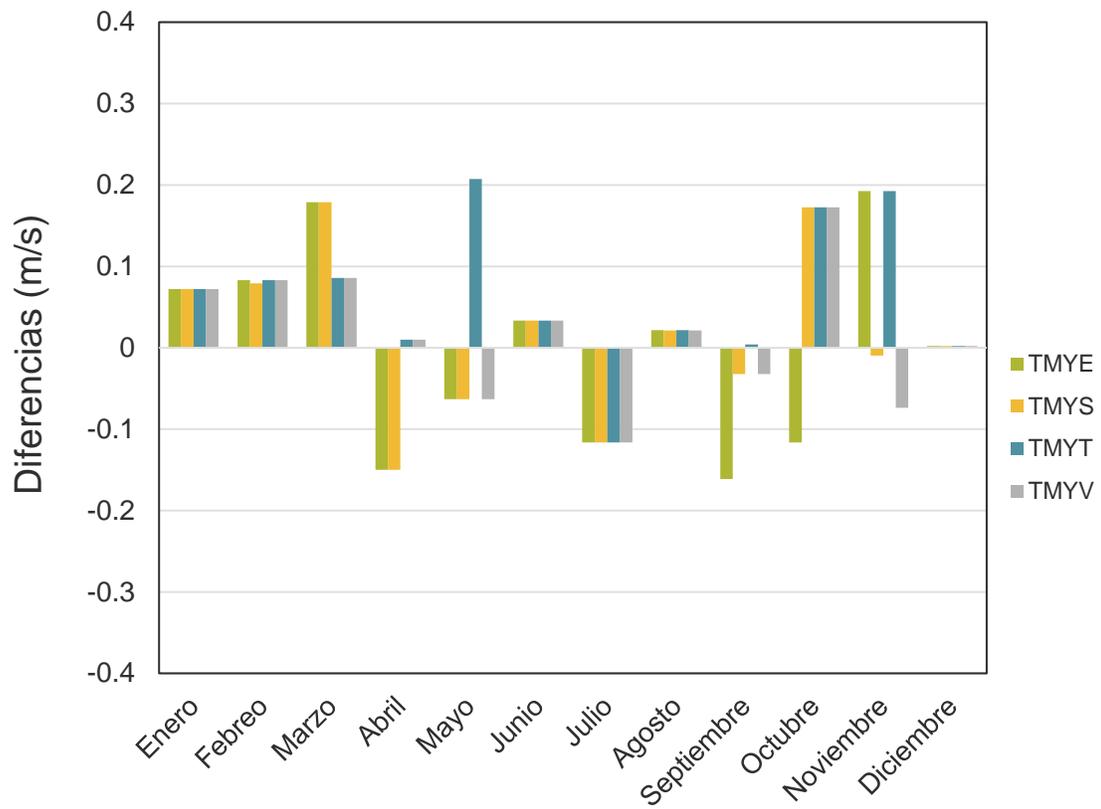


Figura 31. Gráfico de barras de diferencias de comparación de datos base con respecto al TMY para velocidad de viento

4.1.3. Indicadores de desempeño y diferencias mensuales de los parámetros contra los datos base

En la tabla 13 se establecen las diferencias mensuales de cada uno de los parámetros utilizados en los TMY's utilizando como referencia los valores de la serie de datos base. Para temperatura los valores de MAPE fueron de 2-3%, contra los reportados (Jiang, 2010; Ohunakin et al., 2013) con un valor de .04-4%, lo cual sugiere que son una buena representación con respecto a estos datos. Que el rango menor sea tan pequeño puede atribuirse a que en el caso del trabajo que se utilizó como referencia se cuenta con mayor número de datos, por lo tanto, el error disminuye. El valor de RMSD obtenido fue de .6-.8 °C, en otros trabajos se establece de .4-.9°C (Alonso Suárez et al., 2019) es decir que es coincidente con nuestros datos. Estableciendo que estamos dentro del rango, por lo cual esto sugiere que los valores de temperatura son una buena representación del comportamiento de esta a largo plazo.

Las diferencias menores para temperatura son en TMYT, excepto para RMBD, por tanto, que en su mayoría las diferencias sean pequeñas, nos indica que el TMYT sería el TMY más representativo para indicar el comportamiento característico de la temperatura.

Las diferencias reportadas (MAPE) en otros trabajos para humedad relativa van de 1-4% (Jiang, 2010; Ohunakin et al., 2013), contra este trabajo que es de 5-7%, por lo cual se podría establecer que la humedad es relativamente variable para la Hermosillo, que si lo es, pero comparando otros indicadores como es el rMBD y rRMSD, encontramos que por ejemplo para MBD se tiene de 0-.5% y de rRMSD de 2-2.3%, pero el valor promedio utilizado de este trabajo es de 75.2% de humedad relativa (Alonso Suárez et al., 2019), en nuestro caso la humedad relativa promedio de largo plazo es baja (40.2%) comparando con este trabajo, por lo cual nuestros valores de rMBD y rRMSD se ven altamente afectados y es entonces que las diferencias suben hasta valores como de 0.25-2.36% y de 5.90-7.34% para rMBD y rRMSD respectivamente. Puede contribuir también a estos valores que la humedad relativa nunca obtuvo un valor ponderado alto como sucedió con las otras variables, por lo cual, si se da un valor alto de ponderación a humedad relativa, tal vez podría encontrarse una disminución en las diferencias

plasmadas en la tabla 13. Esto podría ser objeto de estudio que podría realizarse en siguientes trabajos.

La velocidad de viento muestra las menores diferencias para el TMYV en su mayoría, y el valor de MAPE ronda de 2-3%, comparado con (Ohunakin et al., 2013) , estamos muy por debajo del rango, ya que ellos han reportado de 1-13%, por lo cual se puede establecer que la velocidad de viento representa un buen ajuste de los datos a largo plazo.

En el caso de la irradiación global horizontal (GHI), tenemos las menores diferencias para todos los indicadores en TMYs, en este artículos se ha reportado un MAPE que va del rango de .12 - 8% (Jiang, 2010; Ohunakin et al., 2013) contra los de este trabajo que son de a 1 a 2%. Encontrándose nuestros valores dentro de los rangos reportados en las literaturas. Pero es importante denotar que para algunos de estos trabajos el total de datos históricos eran de aproximadamente 34 años, por lo cual, si contamos con mayor cantidad de datos, podemos disminuir en gran medida este error. Los valores de rRMSD a escala diaria es del orden de 2- 3% de la media de GHI y para rMBD de .3-.8% este valor se considera despreciable; en trabajos previos se ha reportado valores de rMBD de .6% y de rRMSD de 6-7% (Alonso Suárez et al., 2019).

Otros valores reportados en el trabajo de Alonso-Suárez R. et al., es para MBD de .4-3 MJ/m² y RMSD de 0.5-0.9 MJ/m², en este trabajo se tiene valores de .07-.2 MJ/m² y 0.44-0.70 MJ/m² para MBD y RMSD. Según lo reportado en este trabajo, estar dentro de este rango indica que los datos no tienen una variabilidad importante contra los datos con respecto a los datos de largo plazo, además que RMSD sea menor a 1 MJ/m² sugiere que la dispersión de los datos no es significativa.

Las diferencias más bajas para todos los casos de GHI son en TMYs, por lo cual se puede establecer que es el TMY más representativo para esta variable.

En conclusión, basados en esta tabla 13 solamente, se puede deducir que no hay variaciones significativas, excepto para humedad, pero ya se desarrollará más adelante en la tabla 16 cuál puede ser la razón de estas diferencias, además del valor ponderado. Por tanto, los TMYs encontrados sugieren una representación confiable con respecto a los datos de largo plazo.

Tabla 13. Comparación de los distintos TMYs para los valores mensuales de las variables de Temperatura del aire, Humedad relativa, velocidad de viento y de irradiación.

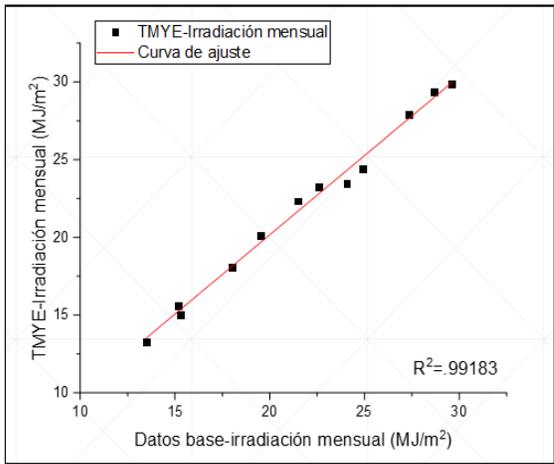
| TMY | MBD | MAD | RMSD | % | % | % | % |
|----------------------------------|-------|------|------|-------|------|-------|------|
| | | | | rMBD | rMAD | rRMSD | MAPE |
| Temperatura del aire (°C) | | | | | | | |
| TMYE | 0.02 | 0.63 | 0.79 | 0.09 | 2.66 | 3.35 | 3.10 |
| TMYS | 0.15 | 0.50 | 0.68 | 0.64 | 2.11 | 2.86 | 2.59 |
| TMYT | 0.27 | 0.47 | 0.66 | 1.15 | 1.99 | 2.80 | 2.47 |
| TMYV | 0.03 | 0.60 | 0.81 | 0.11 | 2.55 | 3.44 | 2.98 |
| Humedad relativa (%) | | | | | | | |
| TMYE | 0.10 | 2.30 | 2.65 | 0.25 | 5.72 | 6.60 | 6.40 |
| TMYS | 0.54 | 2.00 | 2.37 | 1.35 | 4.98 | 5.90 | 5.68 |
| TMYT | 0.95 | 2.55 | 2.95 | 2.36 | 6.34 | 7.34 | 7.34 |
| TMYV | -0.09 | 2.31 | 2.66 | -0.23 | 5.74 | 6.62 | 6.34 |
| Velocidad de Viento (m/s) | | | | | | | |
| TMYE | -0.04 | 0.10 | 0.11 | -1.41 | 3.43 | 3.93 | 3.44 |
| TMYS | 0.00 | 0.08 | 0.10 | 0.11 | 2.85 | 3.49 | 2.81 |
| TMYT | 0.06 | 0.08 | 0.10 | 1.95 | 2.89 | 3.66 | 2.93 |
| TMYV | 0.02 | 0.07 | 0.09 | 0.26 | 2.54 | 3.09 | 2.51 |
| GHI (MJ/m²) | | | | | | | |
| TMYE | 0.19 | 0.46 | 0.51 | 0.88 | 2.13 | 2.35 | 2.13 |
| TMYS | 0.07 | 0.36 | 0.44 | 0.32 | 1.66 | 2.01 | 1.58 |
| TMYT | 0.09 | 0.53 | 0.70 | 0.41 | 2.43 | 3.23 | 2.34 |
| TMYV | 0.17 | 0.51 | 0.69 | 0.80 | 2.35 | 3.18 | 2.35 |

Las gráficas de dispersión mensuales mostradas en las figuras de la 32-35 son gráficas comparativas para cada uno de los parámetros, y los distintos TMYs con respecto a los datos base a escala mensual. La gráfica $x = y$, y el valor de R^2 nos permite conocer la aproximación que se tiene para cada una de las variables con respecto a los datos base. Entre más cercano se encuentre el valor de R^2 a 1, mejor es el ajuste de los datos.

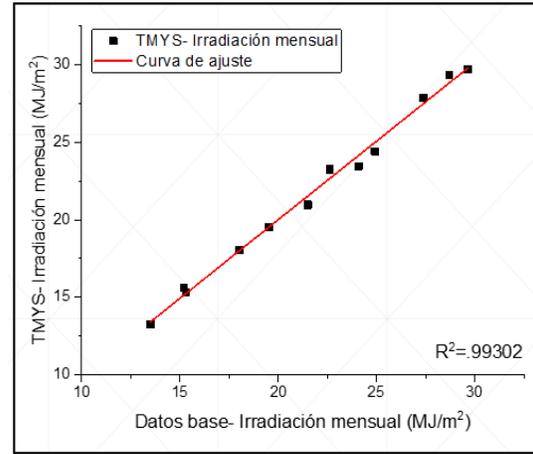
En todas las variables y para todos los TMYs los valores de R^2 son mayor a .9, lo que demuestra que los meses que se han elegido no cuentan con una variabilidad importante en comparación a los datos de largo plazo.

Enfocándonos principalmente en la variable de humedad relativa (fig. 35) en todos los TMYs el valor de R^2 es mayor a 0.92, lo cual puede servir como uno de los indicadores de que para el caso de la humedad relativa se tiene una buena representación para cada uno de los TMYs, contrastando los indicadores de desempeño que salieron más altos que en comparación con los trabajos mostrados, por lo cual, esto corrobora, que se tendría que hacer comparaciones de humedad relativa con climas similares a Hermosillo, es decir zonas secas para poder validar mejor estos indicadores.

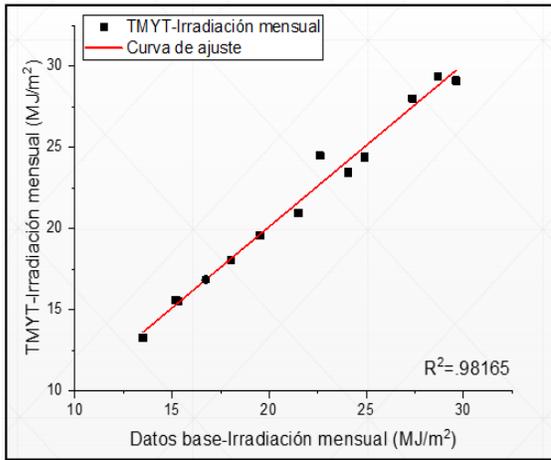
Las curvas de ajuste que muestran los mejores valores de R^2 son de irradiación solar y temperatura.



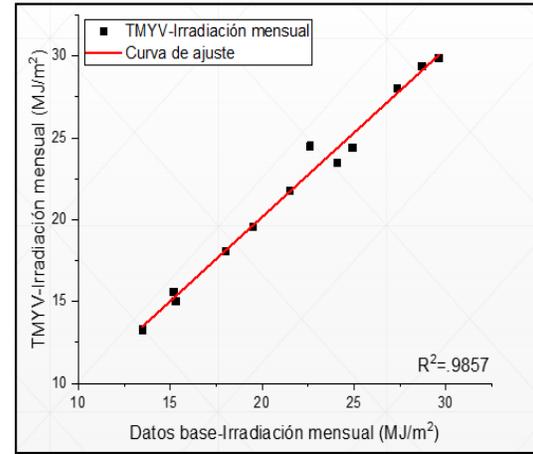
a) TMYE



b) TMYs

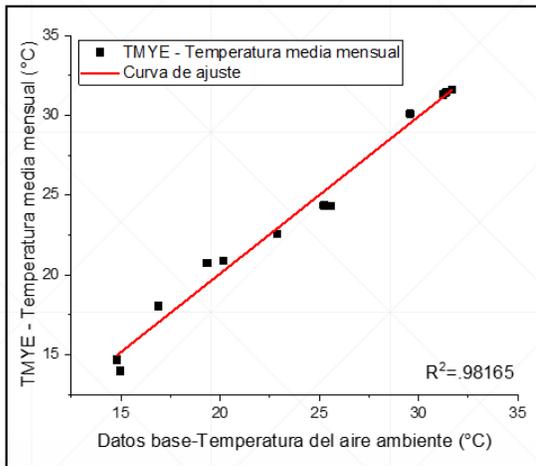


d) TMYT

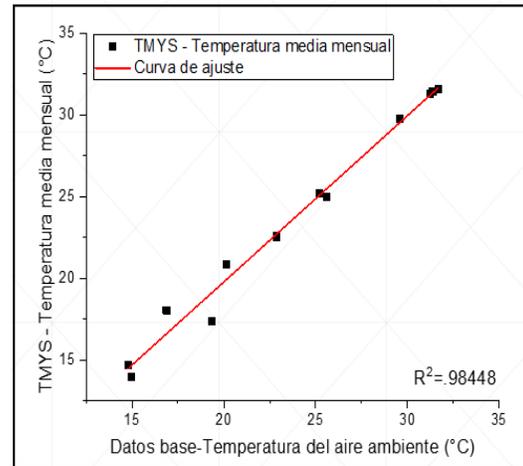


c) TMYV

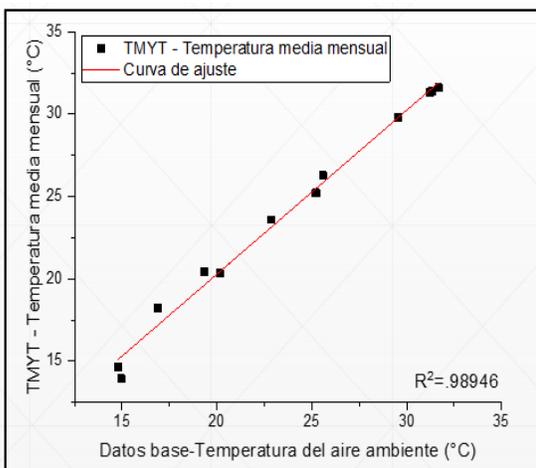
Figura 32. Comparaciones a escala mensual de la variable de radiación solar de TMY contra las medidas de los datos base, en el eje x se encuentran las medias de los datos base y en el eje y las medias mensuales de los distintos TMY's (a-d).



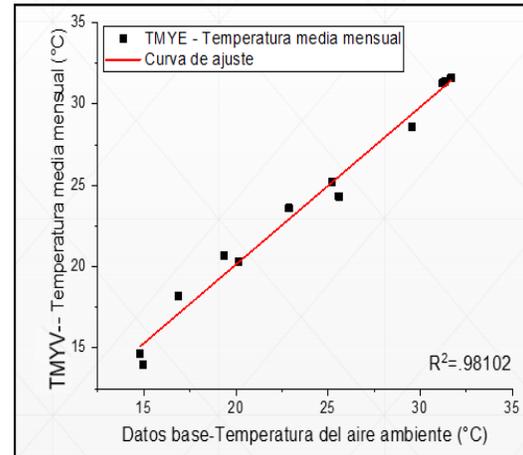
e) TMYE



f) TMYS

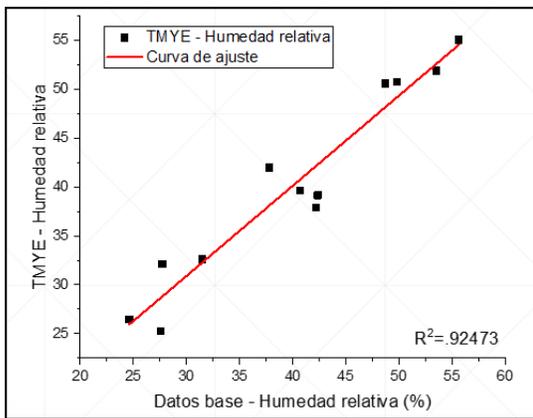


g) TMYT

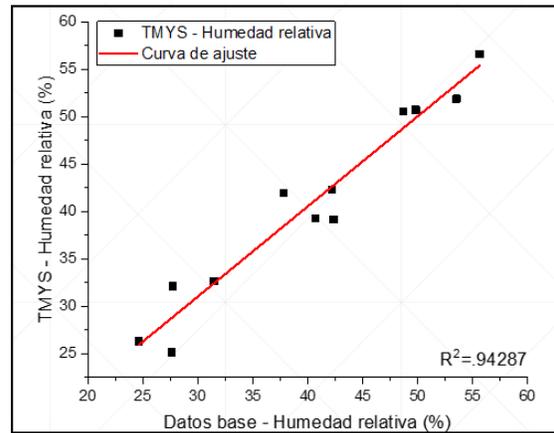


h) TMYV

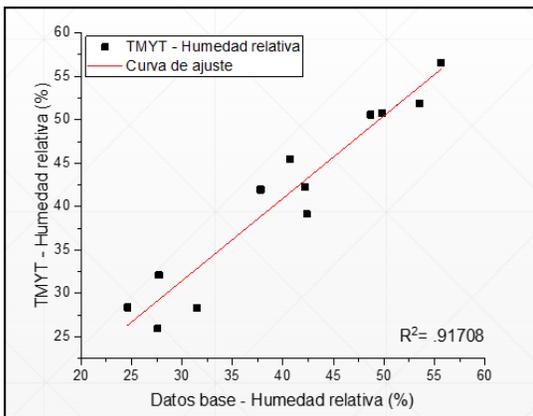
Figura 33. Comparaciones a escala mensual de la variable de temperatura promedio mensual de TMY contra las medidas de los datos base, en el eje x se encuentran las medias de los datos base y en el eje y las medias mensuales de los distintos TMYs (e-h).



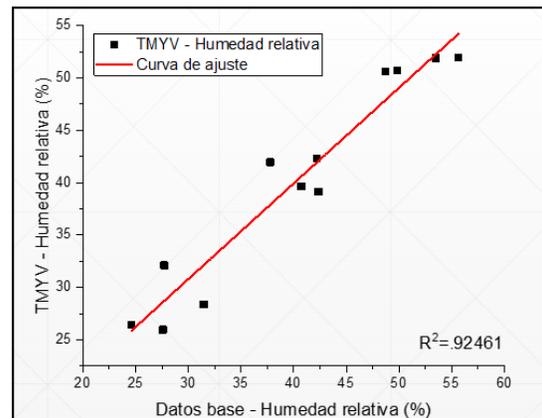
i) TMYE



j) TMYs

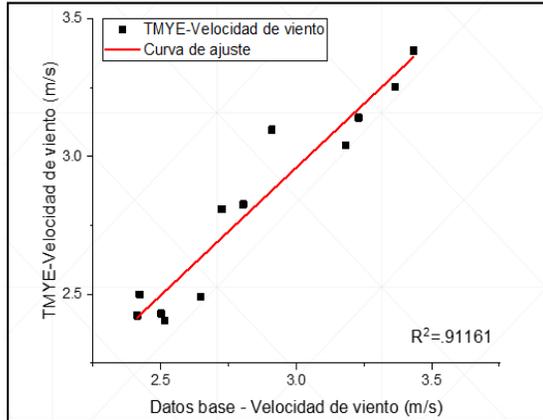


k) TMYT

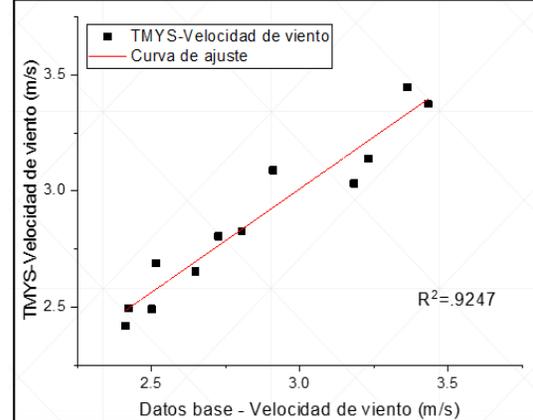


l) TMYV

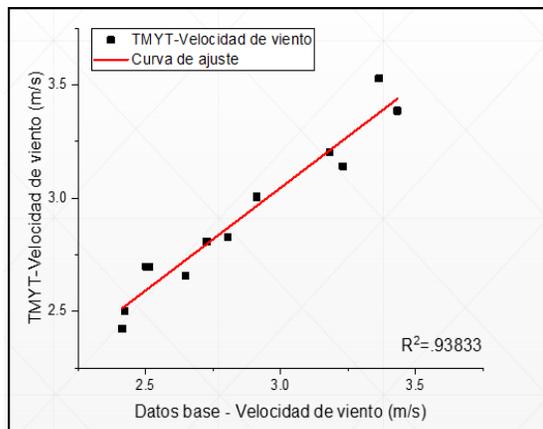
Figura 34. Comparaciones a escala mensual de la variable de humedad relativa promedio mensual de TMY contra las medidas de los datos base, en el eje x se encuentran las medias de los datos base y en el eje y las medias mensuales de los distintos TMYs (i-l).



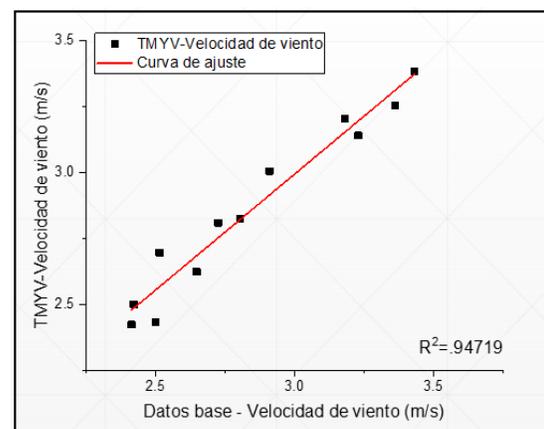
m) TMYE



n) TMYS



o) TMYT



p) TMYV

Figura 35. Comparaciones a escala mensual de la variable de velocidad de viento promedio mensual de TMY contra las medidas de los datos base, en el eje x se encuentran las medias de los datos base y en el eje y las medias mensuales de los distintos TMYs (m-p).

4.1.4. Comparaciones anuales y promedios mensuales de los distintos TMY's

A continuación, se realizaron las comparaciones anuales promedio de los valores de los diferentes TMYs con los datos base, para cada una de las variables. Se han separado las comparaciones por variables para realizar un análisis más detallado, en especial para la variable de humedad, para demostrar que los valores de humedad tan bajos contribuyen a que los indicadores de desempeño tengan estos valores.

Los indicadores mensuales mostrados en esta tabla (tabla 14) sugieren que las diferencias no son significativas, todas se encuentran por debajo de 1 MJ/m² y porcentualmente son menores a 2%. Que las diferencias sean negativas nos da una indicación de que los TMYs tenderán a subestimar, no representa una diferencia significativamente grande con respecto a los datos base, pero debe tenerse presente en los trabajos de simulación que utilicen estos datos. Es importante mencionar que los valores presentados en las tablas fueron redondeados a dos cifras, pero al momento de calcularlos no fueron redondeados ninguno de ellos.

Tabla 14. Comparación de los valores anuales para radiación solar global para los distintos TMY's y los datos base.

| Radiación Solar Global | | | | |
|------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------|
| Comparación anual | | | | |
| Base de datos | datos base (MJ/m ²) | Seleccionados (MJ/m ²) | Dif. anual (MJ/m ²) | Dif. Anual (%) |
| TMYE | 21.70 | 22.01 | -0.31 | -1.44 |
| TMYS | 21.70 | 21.86 | -0.16 | -0.75 |
| TMYT | 21.70 | 21.94 | -0.25 | -1.13 |
| TMYV | 21.70 | 22.03 | -0.33 | -1.53 |

Las diferencias de temperatura promedio anual mostradas en la tabla 15 no son mayor a 1°C, lo cual es referente a que no hay una diferencia significativa para ni uno de los casos. En el caso de las diferencias porcentuales, el valor más alto se supone para el TMYV pero este puede deberse a la ponderación utilizada que fue más chica para el valor de temperatura, pero aun así las diferencias representadas reflejan similitud con respecto a los valores de largo plazo, ya que no se observan diferencias anuales mayores al 5% para esta variable.

Tabla 15. Comparación de los valores anuales y mensuales para temperatura para los distintos TMYs y los datos base.

| Temperatura promedio | | | | |
|-----------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| Comparación anual | | | | |
| Base de datos | datos base | Seleccionados | Dif. anual | Dif. Anual |
| | (°C) | (°C) | (°C) | (%) |
| TMYE | 23.6 | 23.7 | 0.0 | -0.2 |
| TMYS | 23.6 | 23.5 | 0.1 | 0.6 |
| TMYT | 23.6 | 23.9 | -0.3 | -1.2 |
| TMYV | 23.6 | 22.6 | 1.0 | 4.2 |

En la tabla 16 tenemos diferencias no mayor al 2% de la comparación que resulta de los datos de largo plazo (datos base) y los datos seleccionados del TMY, pero debido a que nuestro valor promedio anual de los datos base es pequeño, es decir, como se mencionaba anteriormente, es común encontrar valores de humedad relativa de 60-70%, pero en nuestro caso y debido al tipo de clima que existe en Hermosillo, que es una zona árida, los valores de humedad relativa tiene valores relativamente pequeños, entonces estas diferencias resultan en valores porcentuales relativamente altos, pero si nos enfocamos en las diferencias no porcentuales podemos notar que la variación no es muy grande. Aun así, las diferencias porcentuales no resultan muy elevadas no alcanzando todavía diferencias que superen el 5%. Es así, que los datos de humedad siguen siendo una buena representación para reflejar el comportamiento de largo plazo de esta variable.

Tabla 16. Comparación de los valores anuales y mensuales para humedad relativa promedio para los distintos TMYs y los datos base.

| | Humedad relativa promedio | | | |
|---------------|---------------------------|---------------|-----------|-----------|
| | Comparación anual | | | |
| | datos base | Seleccionados | dif anual | dif anual |
| Base de datos | (%) | (%) | (%) | % |
| TMYE | 40.2 | 38.3 | 1.9 | 4.7 |
| TMYS | 40.2 | 40.7 | -0.6 | -1.4 |
| TMYT | 40.2 | 39.1 | 1.0 | 2.6 |
| TMYV | 40.2 | 40.1 | 0.1 | 0.2 |

En la tabla 17 se muestran los valores promedio anuales de velocidad de viento para los TMY's seleccionados y los datos base. En este caso, es notable que existe una buena representación de los datos de velocidad de viento con respecto a los datos de velocidad de viento promedio de largo plazo. Las diferencias anuales no superan ni siquiera el .1 m/s, y en su mayoría (excepto para TMYE) tienden a subestimar con respecto a los datos de largo plazo. Por último, las diferencias anuales porcentuales, no se supera en ningún caso mayor al 2%.

Todas estas comparaciones sirven para demostrar el desempeño del TMY con respecto a los datos de largo plazo, demostrando así la efectividad de la metodología, además de el análisis y procesamiento de los datos realizado en este trabajo. Por consiguiente, para disminuir el las diferencias mostradas en este trabajo, es necesario de obtener mayor estadística de los datos y mantener los esfuerzos de medición de buena y alta calidad de los valores medidos de la región.

Tabla 17. Comparación de los valores anuales y mensuales para velocidad de viento promedio para los distintos TMY's y los datos base.

| | Velocidad de viento promedio | | | |
|---------------|------------------------------|------------------------|--------------------|----------------|
| | Comparación anual | | | |
| | datos base (m/s) | Seleccionados (m/s) | dif anual (m/s) | dif anual % |
| Base de datos | | | | |
| TMYE | 2.85 | 2.81 | 0.03 | 1.21 |
| TMYS | 2.85 | 2.88 | -0.03 | -1.14 |
| TMYT | 2.85 | 2.90 | -0.05 | -1.89 |
| TMYV | 2.85 | 2.85 | -0.01 | -0.21 |

En la tabla 18 se muestran las diferencias entre el TMYE y los distintos TMY's para conocer cuanto varía utilizar un valor ponderado más alto para cierto parámetro meteorológico, contra un TMY que tiene el mismo valor de ponderación para todos los parámetros, siendo el TMYE el que cumple con estas características. Exceptuando el parámetro de humedad, las diferencias no sobrepasan el 3% para los otros parámetros. El resultado de que parámetros como radiación solar, temperatura y velocidad de viento no se hayan visto afectados puede deberse a que estos parámetros tienen valores bajos de FS, ya que, en artículos previos (Su et al.) se ha encontrado que si el valor de FS para un parámetro es comparablemente pequeño, entonces la selección de los meses no será sensible a la variación de los parámetros ponderados, de manera similar se observó este acontecimiento en este trabajo. Las diferencias más grandes se encuentran en el valor de humedad relativa para TMYS y TMYV, con diferencias de 6.04 y 4.75% respectivamente, pero estas diferencias no corresponden a diferencias altas que pudieran afectar significativamente entre escoger un TMY u otro, ya dependerá del usuario la exactitud que requiera, es decir, si necesita mayor exactitud para alguna variable como radiación solar, podría tomar el ejemplo de TMYS y obtener así diferencias menores al 1%.

Tabla 18. Comparación de los distintos parámetros meteorológicos TMY's contra TMYE

| TMY comparación | TEMP (°C) | GHI (kWh/m ²) | HR (%) | VV (m/s) |
|------------------------|--------------|------------------------------|--------------|--------------|
| TMYE | 23.67 | 6.12 | 38.28 | 2.81 |
| TMYT | 23.93 | 6.08 | 39.13 | 2.89 |
| % de diferencia | 1.10% | 0.65% | 2.22% | 2.85% |
| TMYE | 23.67 | 6.12 | 38.28 | 2.81 |
| TMYS | 23.50 | 6.10 | 40.74 | 2.88 |
| % de diferencia | 0.72% | 0.33% | 6.04% | 2.49% |
| TMYE | 23.67 | 6.12 | 38.28 | 2.81 |
| TMYV | 23.68 | 6.12 | 40.10 | 2.88 |
| % de diferencia | 0.04% | 0.00% | 4.75% | 2.49% |

En la tabla 19 se muestran los promedios mensuales de los distintos parámetros, utilizando el TMY correspondiente al valor ponderado más alto de esta variable. Es decir, como TMYT tiene un valor ponderado más alto para temperatura, entonces los datos que represente este TMY serán de temperatura. En el caso de humedad debido a que TMYE y TMYT tienen el mismo valor ponderado para esta variable, se decidió utilizar TMYE.

Los meses con mayor irradiación solar en el año, los cuales son los meses de mayo a junio, los valores promedios diarios mensuales para estos meses son de 8.25 kWh/m² y de 8.16 kWh/m² respectivamente. Los meses con menos irradiación son enero con 4.33 kWh/m², noviembre con 4.26 kWh/m² y diciembre con 3.69 kWh/m².

En el caso del TMYT se obtuvo que el valor promedio anual fue de 24°C, los meses con temperaturas más altas fueron los meses de junio hasta agosto, con valores promedio mensuales de 31°C. Los meses con menores temperaturas son enero y diciembre, con temperaturas de 14 °C y 15 °C respectivamente.

En TMYE obtuvimos los meses con mayor humedad relativa promedio a lo largo del mes, que fueron agosto y septiembre con valores de 52 y 56 % respectivamente. Los valores de humedad más bajo ocurrieron en de marzo, abril y mayo, con valores de 28, 25 y 26%.

Del TMYV se recopilaron los meses con mayor velocidad de viento, que fueron los meses de mayo con 3.24 m/s junio con 3.37 m/s y julio con 3.14 m/s, los meses de menor velocidad de viento son noviembre y diciembre 2.43 m/s y 2.42 m/s respectivamente. Esto nos sugiere que el factor de viento no proporciona relevancia para la ciudad de Hermosillo, ya que sus promedios (aún en los meses con mayor velocidad de viento) no son muy elevados. No significa que no haya ráfagas fuertes de viento, pero las que existen duran tan poco tiempo que no afectan al promedio de todo el año. Además, tiene un comportamiento convectivo, esto se refleja en las coincidencias de los meses con mayor temperatura contra los meses de mayor velocidad de viento, y viceversa. El usuario puede ir al anexo C si quisiera contar con más detalles del clima típico de la ciudad de Hermosillo, ya que se han realizado gráficas con los datos base del lugar.

Tabla 19. Promedio mensual de los distintos parámetros para cada mes del año, utilizando los TMY más representativo para estas variables.

| Mes | TMYT TEMP (°C) | TMYS GHI (kWh/m²) | TMYE HR (%) | TMYV VV (m/s) |
|-------------------|---------------------------|---|------------------------|--------------------------|
| Enero | 13.95 | 4.33 | 39.14 | 2.49 |
| Febrero | 18.23 | 5.02 | 41.95 | 2.80 |
| Marzo | 20.34 | 6.46 | 28.35 | 2.30 |
| Abril | 23.59 | 7.75 | 25.94 | 3.19 |
| Mayo | 26.29 | 8.25 | 28.39 | 3.24 |
| Junio | 31.29 | 8.16 | 32.11 | 3.37 |
| Julio | 31.61 | 6.78 | 50.74 | 3.14 |
| Agosto | 31.42 | 6.52 | 51.89 | 2.82 |
| Septiembre | 29.78 | 5.83 | 56.59 | 2.62 |
| Octubre | 25.22 | 5.44 | 42.28 | 2.69 |
| Noviembre | 20.47 | 4.26 | 45.48 | 2.43 |
| Diciembre | 14.67 | 3.69 | 50.58 | 2.42 |

4.2. Resultados TMDDV

En esta nueva metodología propuesta para obtener el TMYDDV, se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la tabla 20. Los años obtenidos para cada uno de los meses corresponden a los más representativos sólo para la variable de dirección de viento, esto quiere decir que no influyeron otro tipo de variables en este resultado.

Tabla 20. Meses Meteorológicos Típicos del TMYDD

| Mes | TMYDDV |
|------------|--------|
| Enero | 2020 |
| Febrero | 2011 |
| Marzo | 2011 |
| Abril | 2019 |
| Mayo | 2015 |
| Junio | 2012 |
| Julio | 2017 |
| Agosto | 2016 |
| Septiembre | 2014 |
| Octubre | 2012 |
| Noviembre | 2012 |
| Diciembre | 2018 |

La información sobre la distribución de las velocidades del viento y la frecuencia de las diferentes direcciones del viento en una forma combinada se puede presentar en las rosas de los vientos. La rosa de los vientos es un gráfico que indica la distribución del viento en diferentes direcciones.

La información que nos proporciona este gráfico (fig. 36) es el porcentaje de tiempo en el año típico en el que sopla el viento de una dirección en particular. Se obtuvo que alrededor del 24% de los vientos de 6-8 m/s y 16-18 m/s tienen una componente Suroeste. Los otros vientos que predominan son de 2-8 m/s que tienen una componente Este y son de alrededor de 17-18%. Los vientos de 12-14 m/s son poco probables que sucedan y que los vientos provengan del norte es también muy poco probable, menos del 5% de los datos son provenientes de este módulo.

En la siguiente gráfica (fig. 37) de rosa de los vientos se graficaron los valores promedios diarios de los valores de velocidad de viento tomados del TMYDDV, con respecto a los módulos de viento que se repitieran más veces para el día promedio. De esta manera se pudo obtener cuales eran las direcciones y velocidades de vientos más predominantes para un día promedio basados solamente en la variable de dirección de viento. Se encontró entonces que las velocidades de vientos para un día promedio son de 2-4 m/s y provienen principalmente de la dirección este con un porcentaje de 38.19%, pero las mayorías de los vientos son provenientes del suroeste con velocidades de 4-6 m/s y 40% de probabilidad, seguidas de las velocidades de 2-4 m/s con un 15% de probabilidad. Existen también alrededor del 18% de vientos con velocidad de 2-4 m/s provenientes del sur. Por lo cual, se puede establecer que los vientos para Hermosillo son provenientes principalmente del Suroeste y Este, con mayor tendencia al Suroeste donde también provienen las velocidades de viento más elevadas.

Rosa de los vientos TMYDDV

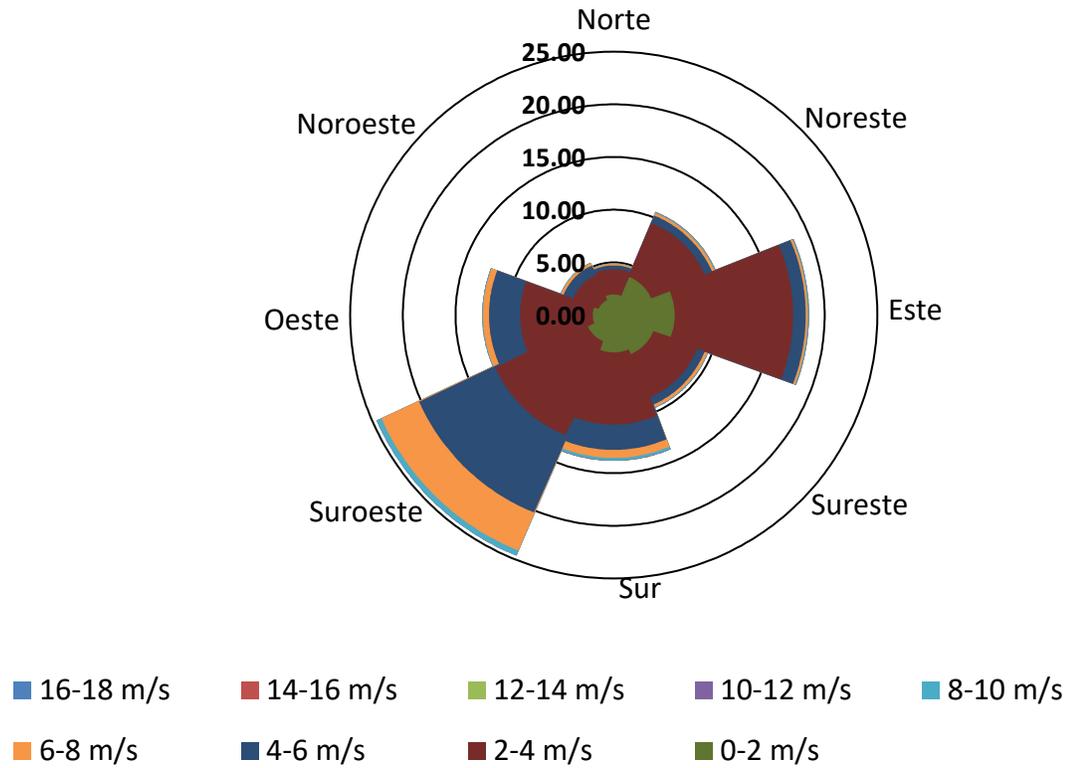


Figura 36. Rosa de los vientos para TMYDD

Rosa de vientos del día promedio del año de TMYDDV

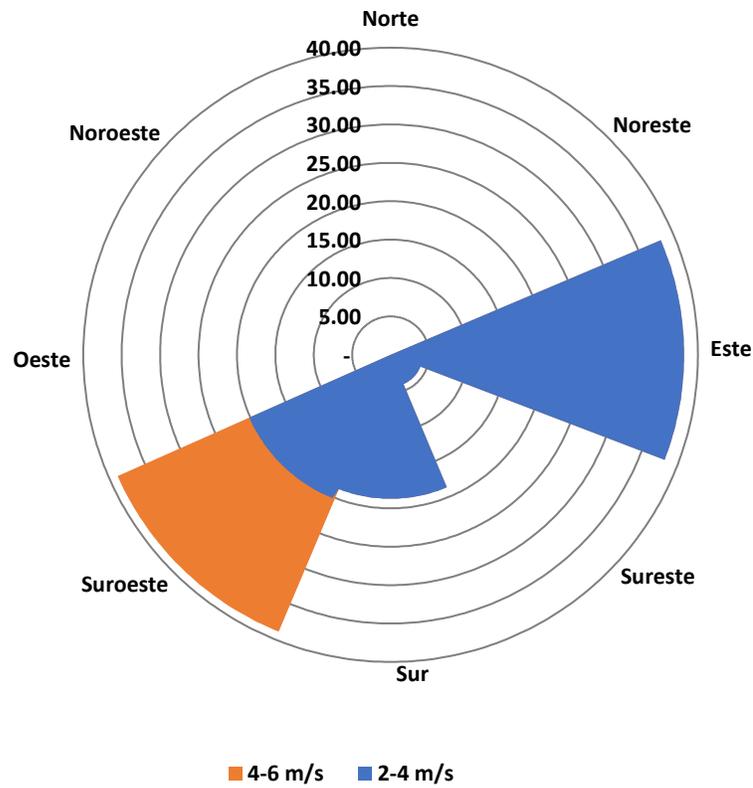


Figura 37. Rosa de los vientos para TMYDD

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

En este trabajo se realizó una investigación sobre el año meteorológico típico (TMY, por sus siglas en inglés), la metodología para su obtención, además de los TMYs utilizados en México.

Se obtuvieron los TMYs para la PSH con aproximadamente 10 años de datos, utilizando la metodología de Sandia modificada.

El estudio del estado del arte sobre los TMYs indica que esta herramienta ha estado convirtiéndose en recurso cada vez más utilizado en diferentes partes del mundo para caracterizar, en forma muy certera, el comportamiento climático de una determinada región, en especial, cuando se requiere evaluar a largo plazo la viabilidad de un proyecto energético, ya sea de aplicaciones de energías renovables, o inversiones en mejoras de eficiencia energética en viviendas y edificios.

Se realizó un procesamiento y filtrado exhaustivo de los datos meteorológicos con el fin de obtener los datos de mejor calidad posibles y recuperar la mayor cantidad de éstos. La base de datos meteorológicos en los que se desarrolló el TMY para la PSH se obtuvo de la recopilación de aproximadamente diez años de datos provenientes de dos estaciones ubicadas en la PSH, estos fueron analizados, procesados y filtrados para formar parte de la información utilizada para la elaboración del TMY, cuidando que los datos tuvieran la mejor calidad posible. Se implementó con éxito la metodología

modificada de los Laboratorios Nacionales de Sandia para la obtención de los distintos TMYs.

El programa que se utilizó para el filtrado y el procesamiento de los datos inicialmente fue a través de hojas electrónicas en el programa Excel, pero, debido a que se contaba con una gran cantidad de datos, luego se trasladó el procesamiento de los datos al programa de Matlab, porque nos proporcionaba ventajas de programación y ahorro de tiempo. Esto también ocurrió con la implementación de la metodología Sandia para la obtención de los distintos TMY. Por último, se volvió nuevamente a las hojas electrónicas para el análisis de los datos obtenidos, debido a su sencillez y visualización más rápida de los resultados (gráficas).

Los distintos TMYs -TMYE, TMYS, TMYT y TMYV-, equilibrado (E), solar (S), temperatura (T) y de viento (V), respectivamente, fueron obtenidos con la finalidad de utilizarse en aplicaciones específicas. Por ejemplo, el equilibrado (TMYE) para estudios de clima en general, el solar (TMYS) para aplicaciones en simulaciones de sistemas solares, el de temperatura (TMYT) para estudios de climatización en viviendas y edificios, y el de velocidad de viento para posibles usos en ventilación y/o diseños bioclimáticos de edificaciones. Todos los TMYs fueron valorados para estudiar su consistencia con tres técnicas, la de rRMSD, rMBD y la MAPE, además se evaluó la diferencia que existía entre el TMYE contra los demás TMY's para encontrar las diferencias que pueden resultar de cambiar la ponderación de cierto parámetro.

Para la variable de radiación solar (GHI) se encontró que el MAPE es de 1-2%, comparado con la literatura que van de .12-8%, lo cual nos indica que estamos dentro de los rangos normales reportados en trabajos previos, pero es importante denotar que este sesgo puede disminuirse si contamos con mayor cantidad de años, que es lo que ocurre en estos trabajos. El valor de rMBD indica la desviación promedio de las diferencias y rRMSD es una manera de calcular la dispersión de los datos. Para radiación solar los valores de rMBD a escala diario fueron de .30-.88% de la media de GHI, que son valores despreciables (debajo del 1%) y para rRMSD de 2-3% los cuales son valores bajos comparados a otros trabajos que van de 6-7%.

Para la variable de Temperatura (Temp) los errores variaron de 2-3% para MAPE, contra los reportados en la literatura que van del .04-4%, para rMBD va de .09-1% este valor no sugiere que no existen diferencias significativas, y para RMSD se tiene de .6-.8°C, comparado con el valor de RMSD reportado en otros trabajos va de .4-.9 °C, estableciendo que estamos dentro del rango, por lo cual esto sugiere que los valores de temperatura son una buena representación de su comportamiento a largo plazo.

Los TMY's obtenidos en el presente trabajo indican que se tiene una buena representatividad de los datos a largo plazo debido a que las métricas de desempeño MBD y RMSD para radiación tiene valores por debajo de 1 MJ/m² y menores a 1°C para temperatura.

Para el caso de humedad las diferencias altas (comparadas con otros trabajos) en MAPE, rMBD y rRMSD han sido corroboradas con los valores promedios anuales de la humedad relativa, encontrando que para estos trabajos las humedades tienden a ser de 60-70% y el presente estudio tiene humedades de 40%, por lo cual esto hace que este tipo de diferencias se vean afectadas, pero cuando se compararon las diferencias anuales con respecto a los datos base, no hubo diferencias de las humedades relativas mayores al 2%, además se obtuvieron también las curvas de ajuste donde no se presentó un valor de R² menor al .9, siendo un indicador de que los datos de humedad tienen una buena representatividad con los datos de largo plazo.

También se realizó una comparación de los distintos TMYs contra el TMYE para analizar diferencias que pudieran existir por cambiar el valor ponderado de los parámetros, si exceptuamos el parámetro de humedad, las diferencias no sobrepasan el 3%. Las diferencias más altas se muestran en humedad, pero no son mayores al 7%. El resultado de que parámetros como radiación solar, temperatura, velocidad de viento y humedad relativa no se hayan visto afectados, puede deberse a que el valor de FS es un valor relativamente pequeño, por lo cual la selección de los meses no será sensible a la selección de los parámetros ponderados.

Las comparaciones anuales de los datos base contra los datos obtenidos del TMYs sugieren que los TMYs en este trabajo son aceptables, debido a que reproducen la media y su variabilidad, pueden utilizarse efectivamente en lugar de los valores promedios de largo plazo.

Los resultados presentados en este trabajo pueden facilitar las simulaciones y diseño de sistemas de aplicaciones que necesiten de parámetros meteorológicos de largo plazo.

Se propuso una nueva metodología con el fin de obtener un año típico, que sea más representativo para dirección de viento, utilizando la metodología de SANDIA como base. El procedimiento considera sólo la dirección de viento sin la ponderación para el resto de los parámetros climatológicos, usando análisis con frecuencias en direcciones específicas. Los resultados obtenidos demostraron que las velocidades de vientos para un día promedio son de 4-6 m/s provenientes principalmente del suroeste, con un 40% de probabilidad, seguido de las velocidades de 2-4 m/s provenientes de la dirección este con un porcentaje de 38 %.

5.2. Recomendaciones y comentarios finales

Se recomiendan más evaluaciones e investigaciones sobre trabajos que permitan contar con valores representativos de los climas de las diferentes regiones incorporando variables importantes como la radiación directa normal, cantidad de polvos-aerosoles, entre otros.

Se sugiere continuar incorporando datos, en busca obtener una mejor representación de la variabilidad de estos parámetros, utilizando información satelital (estimación basada en satélite) de la cual se cuentan al menos 30 años de datos para Hermosillo, Sonora. Con el conocimiento aprendido en este trabajo se sugiere que dependiendo de la aplicación destino, se utilice el TMY más adecuado.

Mantener los esfuerzos de medición de buena y alta calidad de los datos medidos de la región, esto nos servirá para tener un mejor conocimiento del sitio.

Este trabajo es un paso inicial para varias líneas de investigación que deben continuar con respecto a este tema, ya que, esto es importante para obtener una mejor representación de la variabilidad de los parámetros a corto/largo plazo y del pronóstico a corto/largo plazo de la irradiación solar, ambas necesarias para diversos proyectos privados y gubernamentales impartidos actualmente en la Universidad de Sonora.

CAPÍTULO 6

BIBLIOGRAFÍA

- Alonso Suárez, R., Bidegain, M., Abal, G., & Modernell, P. (2019). Año meteorológico típico para aplicaciones de energía solar.
- An, T. (1930). Mechanische Aehnlichkeit und Turbulenz.
- Cabanillas L., R. E.-P. V., Jesus B., - Watts T., Christopher. (2005). Evaluación del recurso solar en el estado de Sonora *ERS-07*, 5.
- Cebecauer, T., & Suri, M. (2015). Typical meteorological year data: SolarGIS approach. *Energy Procedia*, 69, 1958-1969.
- Chan, A. L. S. (2011). Developing a modified typical meteorological year weather file for Hong Kong taking into account the urban heat island effect. *Building and Environment*, 46(12), 2434-2441. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.038>
- Coc, O. K. O., & Ogoloma, O. B. (2011). Generation of a typical meteorological year for port harcourt zone. *Journal of Engineering Science and Technology*, 6(2), 204-214.
- Finkelstein, J. M., & Schafer, R. E. (1971). Improved goodness-of-fit tests. *Biometrika*, 58(3), 641-645.
- Gazela, M., & Mathioulakis, E. (2001). A new method for typical weather data selection to evaluate long-term performance of solar energy systems. *Solar Energy*, 70(4), 339-348.
- González, M., Perez, C. K. R., Bretado, J. A. E., Dominguez, I. R. M., Trejo, M. N., & Muñoz, N. A. R. (2017). COMPARACIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS UTILIZADOS EN SIMULACIONES DINÁMICAS DE SISTEMAS TERMICOS EN CUATRO CIUDADES DE DURANGO, MÉXICO.
- Gueymard, C. A. (2014). A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 1024-1034.
- Hinojosa, F. (1997). *Evaluación térmica de un edificio* (Publication Number 508/97) Universidad Autónoma de Baja California]. Mexicali, Baja California.
- Hoyer-Klick, C., Hustig, F., Schwandt, M., & Meyer, R. (2009). Characteristic meteorological years from ground and satellite data.
- Huld, T., Paietta, E., Zangheri, P., & Pinedo Pascua, I. (2018). Assembling Typical Meteorological Year Data Sets for Building Energy Performance Using Reanalysis and Satellite-Based Data. *Atmosphere*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/atmos9020053>
- International Organization for, S. (1990). *Solar energy-specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*. ISO.

- Jiang, Y. (2010). Generation of typical meteorological year for different climates of China. *Energy*, 35(5), 1946-1953.
- Kambezidis, H. D., Psiloglou, B. E., Kaskoutis, D. G., Karagiannis, D., Petrinoli, K., Garvill, A., & Kavadias, K. (2020). Generation of Typical Meteorological Years for 33 locations in Greece: Adaptation to the needs of various applications. *Theor. Appl. Climatol.*
- Li, L., Kareem, A., Xiao, Y., Song, L., & Zhou, C. (2015). A comparative study of field measurements of the turbulence characteristics of typhoon and hurricane winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 140, 49-66.
- Marion, W., & Urban, K. (1995). *Users manual for TMY2s: Derived from the 1961--1990 National Solar Radiation Data Base.*
- Mishra, A. K., & Ramgopal, M. (2013). Field studies on human thermal comfort—an overview. *Building and Environment*, 64, 94-106.
- Ohunakin, O. S., Adaramola, M. S., Oyewola, O. M., & Fagbenle, R. O. (2013). Generation of a typical meteorological year for north-east, Nigeria. *Applied Energy*, 112, 152-159.
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., & Zelenka, A. (1990). Making full use of the clearness index for parameterizing hourly insolation conditions. *Solar Energy*, 45(2), 111-114.
- Pissimanis, D., Karras, G., Notaridou, V., & Gavra, K. (1988). The generation of a “typical meteorological year” for the city of Athens. *Solar Energy*, 40(5), 405-411.
- Reverdin, A., Earle, M., van den Heuvel, F., Gaydos, A., & Wolff, M. A. (2016). Description of the Quality Control and Event Selection Procedures used within the WMO-SPICE project. *Madrid, Spain, September, 20.*
- Roberto, B. (2019). *Inauguran parque fotovoltaico en Hermosillo con más de 500 mil paneles solares*
<https://www.elsoldemexico.com.mx/republica/sociedad/inauguran-planta-fotovoltaica-que-producira-162-megawatts-de-energia-renovable-en-sonora-4034884.html>
- Rumbayan, M., & Nagasaka, K. (2012). Solar irradiation estimation with neural network method using meteorological data in Indonesia. *International journal of technology*, 2, 110-120.
- Samer, M., von Bobruzki, K., Berg, W., Kiwan, A., & Werner, D. (2011). A computer program for monitoring and controlling ultrasonic anemometers for aerodynamic measurements in animal housing.
- Secretaria de Energía, S. (2019). *Balance Nacional de Energía 2018*. SENER. Retrieved 28 de Agosto del 2020 from file:///C:/Users/Usuario/Music/Datos%20TMY/Escrito%20de%20tesis/Introduccion%20articulos/Balance_Nacional_de_Energ_a_2018.pdf
- SOLARGIS. (2019). *Mapas solares en México* Retrieved 28 de Agosto del 2020 from <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/mexico>
- Su, F., Huang, J., Xu, T., & Zhang, C. (2009). An evaluation of the effects of various parameter weights on typical meteorological years used for building energy simulation.
- Tuller, S. E., & Brett, A. C. (1984). The characteristics of wind velocity that favor the fitting of a Weibull distribution in wind speed analysis. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(1), 124-134.

- Wilcox, S., & Marion, W. (2008). *Users manual for TMY3 data sets*. National Renewable Energy Laboratory Golden, CO.
- Wong, W. L., & Ngan, K. H. (1993). Selection of an “example weather year” for Hong Kong. *Energy and Buildings*, 19(4), 313-316.

ANEXOS

Anexo A: Procedimiento y tablas utilizadas para los filtros de persistencia en la obtención del TMY

Para cada uno de los TMYs se realizó la concatenación de los meses de manera independiente. En la tabla 22, se muestran los resultados de factores de ponderación ω_{FS}^{jy} para el TMYE, del cual en la siguiente tabla (véase tabla 23) se separan los cuatro meses con ω_{FS}^{jy} más pequeño, son agrupados de forma descendente. Esto mismo se realizó para los siguientes TMYs, es decir: TMYs, TMYT y TMYV.

Como se describió en la sección 3.2.2-3.2.3, se realiza un filtrado de los meses candidatos basado primero en los percentiles de 33% de irradiación solar diaria y los percentiles de 33% y 67% de temperatura diaria promedio. A continuación, en la tabla 21 se muestran los valores utilizados para utilizar la filtración por percentiles ya previamente descrita. La tabla muestra los distintos valores de percentiles en cada uno de los meses.

Se nombró como P_1 al percentil de 33% de irradiación solar diaria, expresado en MJ/m^2 , como P_2 , al percentil de 33% de Temperatura promedio diaria en $^{\circ}\text{C}$ y por último como P_3 , al percentil 67% de Temperatura promedio diaria en $^{\circ}\text{C}$. Estos, por tanto, son los valores que se utilizaron para hacer el filtrado de F_1 , F_2 , F_3 y F_4 .

Tabla 21. Valores de los percentiles de irradiación solar diaria (GHI) en MJ/m² y de Temperatura promedio diaria (TEMP) en °C, utilizados para el filtro de persistencia de los meses candidatos.

| Percentiles para los filtros de persistencia | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Filtro LP | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sept | Oct | Nov | Dic |
| P ₁ | 15.21 | 18.10 | 22.53 | 27.41 | 29.71 | 28.79 | 24.40 | 23.77 | 22.10 | 18.90 | 15.30 | 13.54 |
| P ₂ | 13.83 | 15.37 | 19.13 | 21.75 | 24.46 | 30.33 | 30.84 | 30.50 | 28.83 | 23.72 | 17.68 | 13.56 |
| P ₃ | 16.06 | 18.84 | 21.46 | 24.1 | 26.90 | 32.40 | 32.68 | 32.32 | 30.53 | 26.67 | 20.88 | 16.12 |

Los cuatro años candidatos para cada mes se ordenan en forma descendente, es decir del mes más típico al mes menos típico, según el valor obtenido de ωFS^{jy} . Se hace el análisis por percentiles y en las tablas siguientes se marcan que filtro eliminó cada instancia. Después de realizar el filtrado por percentiles, se escoge el año con menor valor de ωFS^{jy} . En caso de eliminarse los cuatro años por estos filtros, se marca con RMSD, para indicar que se utilizó la filtración por el método de Pissimanis. También se utilizó esta metodología en caso de que la variación sea un solo día y las diferencias de RMSD sean notorias. Se resaltó en negro la instancia seleccionada (véase Anexo A).

Tabla 22. Valores de los factores de ponderación de los índices meteorológicos de TMYE para la estadística ωFS^j

| Año/Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sept | Oct | Nov | Dic |
|---------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2010 | - | - | - | - | - | - | .033 | .038 | .055 | .047 | .062 | .055 |
| 2011 | 0.042 | .073 | .037 | .035 | .032 | - | - | - | .066 | .046 | .054 | .060 |
| 2012 | 0.050 | .051 | .047 | .024 | .035 | .032 | .044 | .028 | .029 | .031 | .044 | .023 |
| 2013 | 0.052 | .053 | .048 | .036 | .043 | .033 | .030 | .028 | .035 | .049 | .041 | .028 |
| 2014 | 0.065 | .050 | .040 | .035 | .048 | .055 | .032 | .047 | .057 | .071 | .052 | .032 |
| 2015 | - | .057 | .041 | .042 | .048 | .030 | .028 | .038 | .056 | .047 | .052 | .044 |
| 2016 | 0.043 | .072 | - | - | .035 | .036 | .055 | .043 | .044 | .064 | - | - |
| 2017 | 0.048 | .042 | .041 | .029 | .027 | .033 | .047 | .040 | .047 | .079 | .080 | .059 |
| 2018 | 0.073 | .037 | .047 | .043 | .038 | .038 | .043 | .045 | .036 | .079 | .055 | .042 |
| 2019 | 0.049 | .065 | .039 | .021 | - | - | - | .033 | .073 | .044 | .079 | .036 |
| 2020 | 0.068 | .047 | .130 | .065 | - | - | - | - | - | - | - | - |

Tabla 23. Valores más bajos de ωFS^{jy} , meses candidatos para formar parte del TMYE

| Año/Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sept | Oct | Nov | Dic |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2010 | - | - | - | - | - | - | .033 | .038 | - | - | - | - |
| 2011 | .042 | - | .037 | - | .032 | - | - | - | - | .046 | - | - |
| 2012 | - | - | - | .024 | .035 | .032 | - | .028 | .029 | .031 | .044 | .023 |
| 2013 | - | - | - | - | - | .033 | .030 | .028 | .035 | - | .041 | .028 |
| 2014 | - | .050 | .040 | .035 | - | - | .032 | - | - | - | .052 | .032 |
| 2015 | - | - | - | - | - | .030 | .028 | - | - | .047 | .052 | - |
| 2016 | .043 | - | - | - | .035 | - | - | - | .044 | - | - | - |
| 2017 | .048 | .042 | .041 | .029 | .027 | .033 | - | - | - | - | - | - |
| 2018 | - | .037 | - | - | - | - | - | - | .036 | - | - | - |
| 2019 | .049 | - | .039 | .021 | - | - | - | .032 | - | .044 | - | .036 |
| 2020 | - | .047 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Tabla 24. Valores de los factores de ponderación de los índices meteorológicos de TMYS para la estadística ωFS^y

| Año/Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sept | Oct | Nov | Dic |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2010 | - | - | - | - | - | - | .030 | .042 | .049 | .043 | .074 | .056 |
| 2011 | .042 | .081 | .051 | .028 | .032 | - | - | - | .068 | .050 | .051 | .055 |
| 2012 | .053 | .053 | .045 | .026 | .038 | .032 | .054 | .032 | .029 | .032 | .041 | .024 |
| 2013 | .054 | .052 | .055 | .040 | .040 | .032 | .031 | .037 | .043 | .053 | .038 | .028 |
| 2014 | .058 | .050 | .042 | .047 | .047 | .057 | .030 | .049 | .056 | .058 | .052 | .035 |
| 2015 | - | .061 | .043 | .043 | .049 | .043 | .028 | .039 | .061 | .051 | .050 | .041 |
| 2016 | .048 | .071 | - | - | .033 | .033 | .059 | .052 | .050 | .058 | - | - |
| 2017 | .047 | .045 | .047 | .031 | .026 | .031 | .047 | .045 | .049 | .075 | .074 | .062 |
| 2018 | .067 | .047 | .044 | .037 | .031 | .032 | .044 | .046 | .038 | .086 | .049 | .039 |
| 2019 | .050 | .082 | .044 | .023 | - | - | - | .038 | .072 | .044 | .102 | .028 |
| 2020 | .055 | .066 | .14 | .058 | - | - | - | - | - | - | - | - |

Tabla 25. Valores más bajos de ωFS^{jy} , meses candidatos para formar parte del TMYS

| Año/Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sept | Oct | Nov | Dic |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2010 | - | - | - | - | - | - | .030 | - | .049 | .043 | - | - |
| 2011 | .042 | - | - | .028 | .032 | - | - | - | - | .050 | - | - |
| 2012 | - | - | - | .026 | - | .033 | - | .032 | .029 | .032 | .041 | .024 |
| 2013 | - | .052 | - | - | - | .032 | .031 | .037 | .043 | - | .038 | .028 |
| 2014 | - | .050 | .042 | - | - | - | .030 | - | - | - | - | .035 |
| 2015 | - | - | .043 | - | - | - | .028 | .039 | - | - | .050 | - |
| 2016 | .048 | - | - | - | .033 | - | - | - | - | - | - | - |
| 2017 | .047 | .045 | - | .031 | .026 | .031 | - | - | - | - | - | - |
| 2018 | - | .047 | .044 | - | .031 | .032 | - | - | .038 | - | .049 | - |
| 2019 | .050 | - | .044 | .023 | - | - | - | .038 | - | .044 | - | .028 |
| 2020 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Tabla 26. Valores de los factores de ponderación de los índices meteorológicos de TMYT para la estadística ωFS^y

| Año/Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sept | Oct | Nov | Dic |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2010 | - | - | - | - | - | - | .032 | .057 | .075 | .053 | .074 | .062 |
| 2011 | .047 | .088 | .038 | .028 | .034 | - | - | - | .081 | .051 | .060 | .079 |
| 2012 | .059 | .060 | .056 | .040 | .052 | .032 | .048 | .025 | .033 | .033 | .053 | .025 |
| 2013 | .072 | .073 | .055 | .047 | .046 | .035 | .035 | .029 | .037 | .068 | .047 | .029 |
| 2014 | .078 | .062 | .052 | .043 | .057 | .067 | .032 | .058 | .045 | .069 | .044 | .037 |
| 2015 | - | .079 | .055 | - | .069 | .032 | .032 | .041 | .052 | .044 | .069 | .055 |
| 2016 | .055 | .078 | - | .031 | .047 | .036 | .056 | .056 | .060 | .082 | - | - |
| 2017 | .042 | .054 | .053 | .037 | .030 | .039 | .053 | .047 | .051 | .097 | .097 | .078 |
| 2018 | .093 | .036 | .047 | .023 | .038 | .035 | .053 | .057 | .043 | .089 | .067 | .044 |
| 2019 | .049 | .085 | .044 | .058 | - | - | - | .046 | .092 | .051 | .080 | .030 |
| 2020 | .066 | .053 | .014 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Tabla 27. Valores más bajos de ωFS^{jy} , meses candidatos para formar parte del TMYT

| Año/Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sept | Oct | Nov | Dic |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2010 | - | - | - | - | - | - | .032 | - | - | .051 | - | - |
| 2011 | .047 | - | .038 | .028 | .034 | - | - | - | - | .051 | .060 | - |
| 2012 | - | .060 | - | .026 | - | .033 | - | .025 | .033 | .033 | .053 | .025 |
| 2013 | - | - | - | - | .046 | .035 | .035 | .029 | .037 | - | .047 | .029 |
| 2014 | - | - | .052 | - | - | - | .032 | - | .045 | - | .044 | .037 |
| 2015 | - | - | - | - | - | .032 | .032 | .041 | - | .044 | - | - |
| 2016 | .055 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2017 | .042 | .054 | - | .031 | .030 | - | - | - | - | - | - | - |
| 2018 | - | .036 | .047 | - | .038 | .035 | - | - | .043 | - | - | - |
| 2019 | .049 | - | .044 | .023 | - | - | - | .046 | - | - | - | .030 |
| 2020 | - | .053 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Tabla 28. Valores de los factores de ponderación de los índices meteorológicos de TMYV para la estadística ωFS^y

| Año/Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sept | Oct | Nov | Dic |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2010 | - | - | - | - | - | - | .037 | .035 | .054 | .041 | .059 | .178 |
| 2011 | .032 | .070 | .033 | .037 | .034 | - | - | - | .064 | .048 | .051 | .057 |
| 2012 | .036 | .056 | .042 | .031 | .036 | .031 | .046 | .032 | .029 | .029 | .045 | .037 |
| 2013 | .053 | .057 | .041 | .034 | .043 | .030 | .034 | .038 | .037 | .042 | .042 | .046 |
| 2014 | .050 | .054 | .042 | .033 | .041 | .052 | .030 | .039 | .051 | .059 | .049 | .050 |
| 2015 | - | .062 | .058 | .045 | .040 | .031 | .026 | .041 | .058 | .037 | .056 | .052 |
| 2016 | .032 | .065 | - | - | .029 | .032 | .048 | .038 | .049 | .054 | - | - |
| 2017 | .032 | .044 | .033 | .027 | .028 | .034 | .052 | .053 | .052 | .062 | .075 | .076 |
| 2018 | .063 | .039 | .051 | .039 | .035 | .032 | .038 | .050 | .041 | .069 | .057 | .054 |
| 2019 | .032 | .068 | .036 | .023 | - | - | - | .036 | .073 | .044 | .077 | .050 |
| 2020 | .052 | .054 | .100 | .065 | - | - | - | - | - | - | - | - |

Tabla 29. Valores más bajos de ω_{FS}^{jy} , meses candidatos para formar parte del TMYV

| Año/Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sept | Oct | Nov | Dic |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2010 | - | - | - | - | - | - | .037 | .035 | - | .041 | .049 | - |
| 2011 | .032 | - | .033 | .033 | .034 | - | - | - | - | - | .047 | - |
| 2012 | - | - | - | .030 | - | .031 | - | .032 | .029 | .029 | .043 | .037 |
| 2013 | - | - | .041 | - | - | .030 | .034 | .038 | .037 | .042 | .040 | .046 |
| 2014 | - | .053 | - | - | .033 | - | .030 | - | - | - | - | .050 |
| 2015 | - | - | - | - | - | .031 | .026 | - | - | .037 | - | - |
| 2016 | .032 | - | - | .029 | - | - | - | - | .041 | - | - | - |
| 2017 | .032 | .039 | .033 | .034 | .027 | - | - | - | - | - | - | - |
| 2018 | - | .037 | - | .035 | - | .032 | - | - | .050 | - | - | - |
| 2019 | .032 | - | .036 | - | .023 | - | - | .036 | - | - | - | .050 |
| 2020 | - | .049 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Tabla 30. Filtrado de meses para la obtención del mes típico de TMYE

| TMYE | | | | | | | | | | | |
|---------|------|-------|--|-----------|------|-------|---------------------------------|------------|------|-------|---------------------------------|
| Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros |
| Enero | 2011 | 0.032 | - | Febrero | 2018 | 0.037 | F ₃ | Marzo | 2011 | 0.033 | F ₁ , RMSD |
| | 2016 | 0.032 | F ₃ | | 2017 | 0.042 | - | | 2017 | 0.033 | F ₄ |
| | 2017 | 0.032 | F ₁ , F ₄ | | 2020 | 0.047 | F ₁ | | 2019 | 0.036 | F ₃ |
| | 2019 | 0.032 | - | | 2014 | 0.05 | F ₄ | | 2013 | 0.041 | - |
| Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros |
| Abril | 2019 | 0.021 | F ₁ , F ₃ | Mayo | 2017 | 0.027 | F ₃ , F ₄ | Junio | 2015 | 0.030 | F ₁ , F ₄ |
| | 2012 | 0.024 | - | | 2011 | 0.032 | F ₄ | | 2012 | 0.032 | F ₄ |
| | 2017 | 0.029 | - | | 2012 | 0.035 | F ₁ , F ₄ | | 2017 | 0.033 | F ₃ |
| | 2014 | 0.035 | F ₁ , F ₃ , F ₄ | | 2016 | 0.035 | - | | 2013 | 0.033 | - |
| Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros |
| Julio | 2015 | 0.028 | - | Agosto | 2013 | 0.028 | - | Septiembre | 2012 | 0.029 | F ₁ , F ₃ |
| | 2013 | 0.030 | F ₃ , F ₄ | | 2012 | 0.028 | F ₃ | | 2013 | 0.035 | F ₃ , F ₄ |
| | 2014 | 0.032 | RMSD | | 2019 | 0.032 | F ₄ | | 2018 | 0.036 | - |
| | 2010 | 0.033 | F ₁ , F ₄ | | 2010 | 0.038 | F ₁ | | 2016 | 0.044 | F ₃ |
| Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros |
| Octubre | 2019 | 0.031 | - | Noviembre | 2013 | 0.040 | F ₄ | Diciembre | 2012 | 0.023 | F ₄ , RMSD |
| | 2012 | 0.044 | - | | 2012 | 0.043 | F ₃ , RMSD | | 2013 | 0.028 | F ₃ |
| | 2011 | 0.046 | F ₃ | | 2011 | 0.047 | F ₁ | | 2014 | 0.032 | - |
| | 2015 | 0.047 | F ₁ , F ₄ | | 2010 | 0.049 | F ₄ | | 2018 | 0.036 | F ₁ |

Tabla 31. Filtrado de meses para la obtención del mes típico de TMYS

| TMYS | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------------|--------------|-------------------|------------------|-------------|--------------|---------------------|-------------------|-------------|--------------|---------------------|
| Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros |
| Enero | 2011 | 0.042 | - | Febrero | 2018 | 0.037 | F ₃ | Marzo | 2014 | 0.042 | - |
| | 2016 | 0.047 | F ₃ | | 2017 | 0.042 | F _{1,RMSD} | | 2015 | 0.042 | F ₄ |
| | 2017 | 0.048 | F _{1,F4} | | 2014 | 0.050 | F ₄ | | 2019 | 0.044 | F ₃ |
| | 2019 | 0.05 | - | | 2013 | 0.052 | - | | 2018 | 0.044 | F ₁ |
| Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros |
| Abril | 2019 | 0.023 | F ₁ | Mayo | 2017 | 0.026 | F ₃ | Junio | 2017 | 0.031 | F ₃ |
| | 2012 | 0.026 | - | | 2018 | 0.031 | F ₁ | | 2018 | 0.032 | F ₁ |
| | 2011 | 0.028 | F ₃ | | 2011 | 0.032 | F ₄ | | 2013 | 0.032 | - |
| | 2017 | 0.031 | F ₄ | | 2016 | 0.033 | - | | 2012 | 0.033 | F ₄ |
| Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros |
| Julio | 2015 | 0.028 | - | Agosto | 2012 | 0.032 | F _{1,F3} | Septiembre | 2012 | 0.029 | F _{3,RMSD} |
| | 2010 | 0.030 | F _{1,F4} | | 2013 | 0.037 | - | | 2018 | 0.038 | - |
| | 2014 | 0.030 | <i>RMSD</i> | | 2019 | 0.038 | F ₄ | | 2013 | 0.043 | F _{3,F4} |
| | 2013 | 0.031 | F _{3,F4} | | 2015 | 0.039 | - | | 2010 | 0.049 | F ₁ |
| Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros |
| Octubre | 2012 | 0.032 | - | Noviembre | 2013 | 0.038 | F _{1,F4} | Diciembre | 2012 | 0.030 | F _{4,RMSD} |
| | 2010 | 0.043 | F _{1,F4} | | 2012 | 0.041 | F ₃ | | 2013 | 0.033 | F ₃ |
| | 2019 | 0.044 | - | | 2018 | 0.049 | F ₃ | | 2014 | 0.040 | - |
| | 2011 | 0.050 | F ₃ | | 2015 | 0.050 | - | | 2019 | 0.035 | F ₁ |

Tabla 32. Filtrado de meses para la obtención del mes típico de TMYT

| TMYT | | | | | | | | | | | |
|---------|-------------|--------------|--------------------------------|-----------|-------------|--------------|--------------------------------|------------|-------------|--------------|--|
| Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros |
| Enero | 2017 | 0.042 | F ₁ ,F ₄ | Febrero | 2018 | 0.035 | F ₃ ,F ₄ | Marzo | 2011 | 0.038 | - |
| | 2011 | 0.047 | - | | 2020 | 0.053 | F ₁ | | 2019 | 0.044 | F ₃ ,F ₄ |
| | 2019 | 0.049 | - | | 2017 | 0.054 | - | | 2018 | 0.047 | F ₁ |
| | 2016 | 0.055 | F ₃ | | 2012 | 0.060 | - | | 2014 | 0.052 | - |
| Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros |
| Abril | 2019 | 0.023 | F ₁ | Mayo | 2017 | 0.030 | F ₃ | Junio | 2015 | 0.032 | F ₁ ,F ₃ ,F ₄ |
| | 2012 | 0.026 | - | | 2011 | 0.034 | F ₄ | | 2012 | 0.032 | F ₄ |
| | 2011 | 0.028 | F ₃ | | 2018 | 0.038 | F ₁ | | 2013 | 0.035 | - |
| | 2017 | 0.031 | F ₄ <i>RMSD</i> | | 2013 | 0.046 | - | | 2018 | 0.035 | - |
| Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros |
| Julio | 2014 | 0.032 | - | Agosto | 2012 | 0.025 | F ₁ ,F ₃ | Septiembre | 2012 | 0.033 | F ₃ , <i>RMSD</i> |
| | 2010 | 0.032 | F ₁ ,F ₄ | | 2013 | 0.029 | - | | 2013 | 0.037 | F ₃ ,F ₄ |
| | 2015 | 0.032 | - | | 2015 | 0.041 | F ₄ | | 2018 | 0.043 | - |
| | 2013 | 0.035 | F ₃ ,F ₄ | | 2019 | 0.046 | - | | 2014 | 0.045 | F ₁ ,F ₃ |
| Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros |
| Octubre | 2012 | 0.033 | - | Noviembre | 2014 | 0.044 | F ₄ | Diciembre | 2012 | 0.031 | F ₄ <i>RMSD</i> |
| | 2015 | 0.044 | F ₁ ,F ₄ | | 2013 | 0.047 | - | | 2013 | 0.034 | F ₃ |
| | 2011 | 0.051 | F ₃ | | 2012 | 0.053 | F ₃ | | 2019 | 0.037 | - |
| | 2019 | 0.051 | - | | 2011 | 0.060 | F ₁ | | 2014 | 0.042 | F ₁ |

Tabla 33. Filtrado de meses para la obtención del mes típico de TMYV

| TMYV | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------------|--------------|--|------------------|-------------|--------------|----------------|-------------------|-------------|--------------|--------------------------------|
| Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros |
| Enero | 2011 | 0.041 | - | Febrero | 2018 | 0.039 | F ₃ | Marzo | 2011 | 0.038 | F ₁ ,RMSD |
| | 2017 | 0.042 | F ₁ ,F ₄ | | 2017 | 0.044 | - | | 2019 | 0.039 | F ₃ |
| | 2019 | 0.044 | F ₃ | | 2014 | 0.054 | F ₄ | | 2017 | 0.040 | F ₄ |
| | 2016 | 0.044 | F ₃ | | 2020 | 0.054 | F ₁ | | 2014 | 0.045 | - |
| Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros |
| Abril | 2019 | 0.023 | F ₁ ,F ₃ | Mayo | 2017 | 0.028 | F ₃ | Junio | 2013 | 0.030 | - |
| | 2017 | 0.027 | - | | 2016 | 0.029 | - | | 2012 | 0.031 | F ₄ |
| | 2012 | 0.031 | - | | 2011 | 0.034 | F ₄ | | 2017 | 0.031 | F ₁ ,F ₃ |
| | 2014 | 0.033 | F ₁ ,F ₃ ,F ₄ | | 2018 | 0.035 | F ₁ | | 2018 | 0.032 | - |
| Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros |
| Julio | 2015 | 0.026 | - | Agosto | 2012 | 0.032 | F ₃ | Septiembre | 2012 | 0.027 | F ₁ ,F ₃ |
| | 2014 | 0.030 | RMSD | | 2010 | 0.035 | F ₁ | | 2013 | 0.033 | F ₃ ,F ₄ |
| | 2013 | 0.034 | F ₃ ,F ₄ | | 2019 | 0.036 | F ₄ | | 2018 | 0.040 | F ₁ |
| | 2010 | 0.037 | F ₁ ,F ₄ | | 2013 | 0.038 | - | | 2016 | 0.044 | - |
| Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros | Mes | Año | WFS | Filtros |
| Octubre | 2012 | 0.029 | - | Noviembre | 2013 | 0.042 | F ₄ | Diciembre | 2012 | 0.037 | F ₄ ,RMSD |
| | 2015 | 0.037 | F ₁ ,F ₃ | | 2012 | 0.044 | F ₃ | | 2013 | 0.046 | F ₃ |
| | 2010 | 0.041 | F ₄ | | 2014 | 0.049 | - | | 2014 | 0.050 | - |
| | 2013 | 0.042 | F ₃ | | 2011 | 0.051 | F ₁ | | 2019 | 0.050 | F ₁ |

Anexo B: Comparación gráfica de los datos base de largo plazo y TMY's

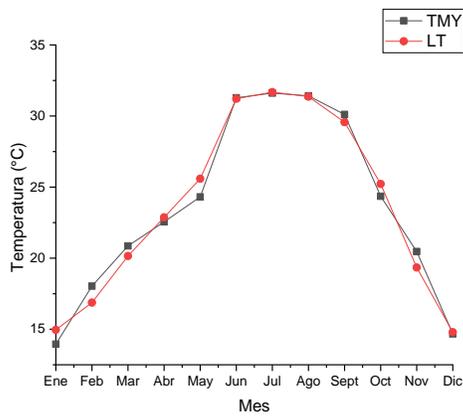


Figura 38. Gráfica TEMP mensual de TMYE

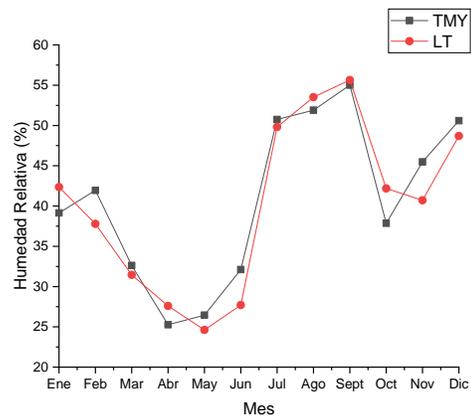


Figura 39. Gráfica HR mensual de TMYE

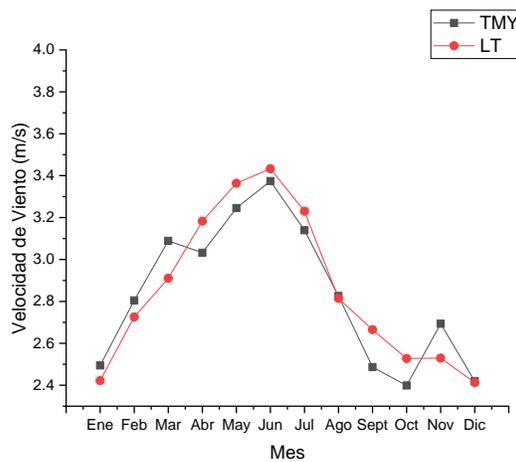


Figura 40. Gráfica VV mensual de TMYE

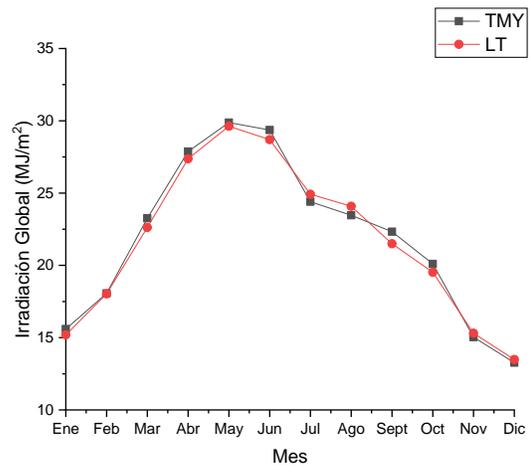


Figura 41. Gráfica GHI mensual de TMYE

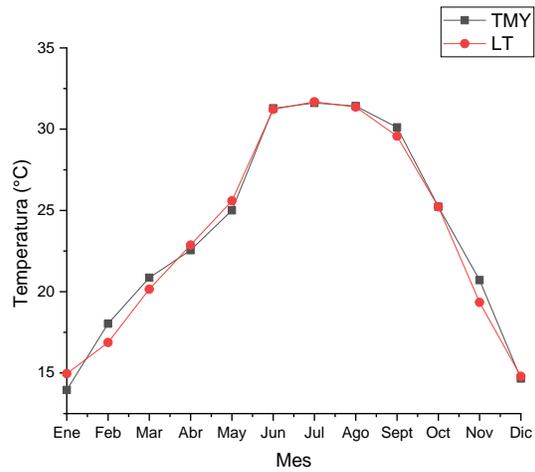


Figura 42. Gráfica TEMP mensual de TMY

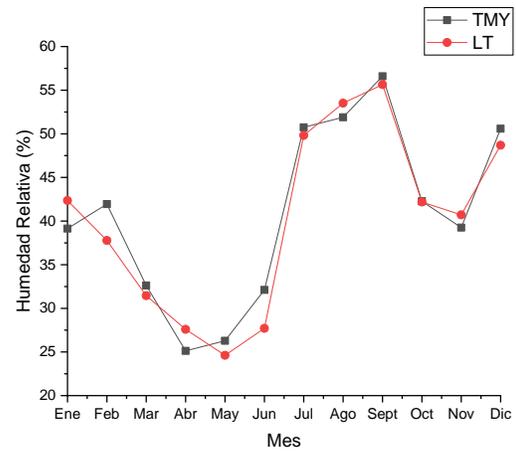


Figura 43. Gráfica HR mensual de TMY

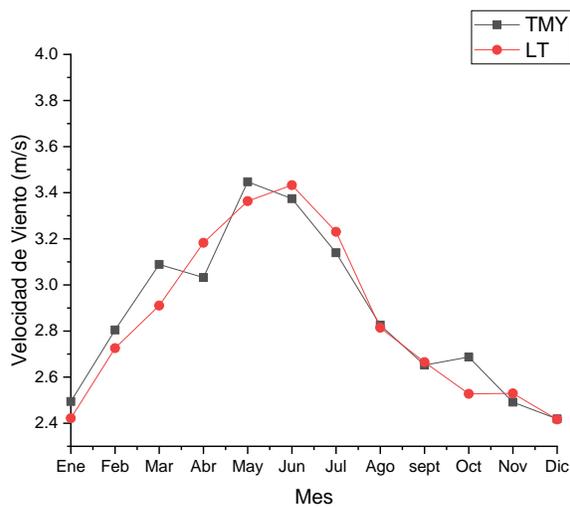


Figura 44. Gráfica VV mensual de TMY

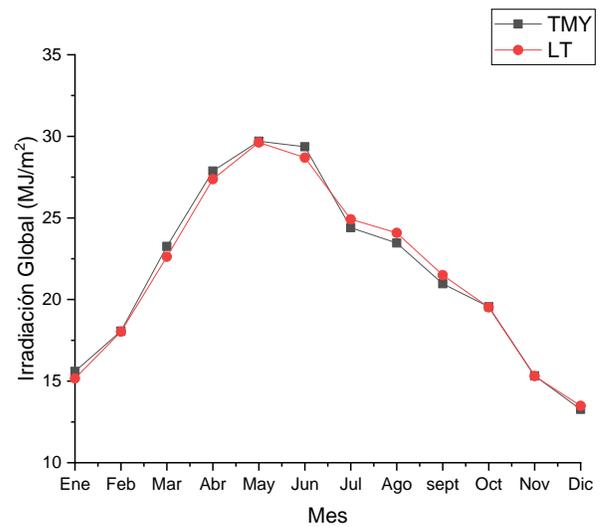


Figura 45. Gráfica GHI mensual de TMY

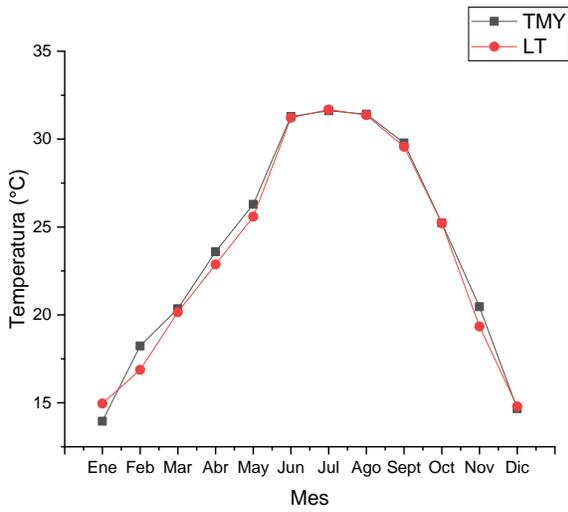


Figura 46. Gráfica TEMP mensual de TMYT

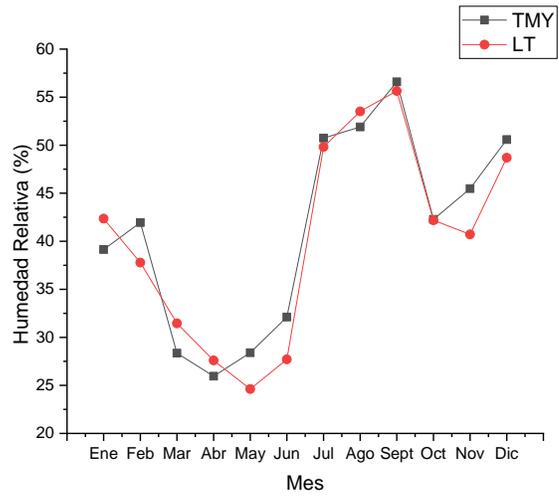


Figura 47. Gráfica HR mensual de TMYT

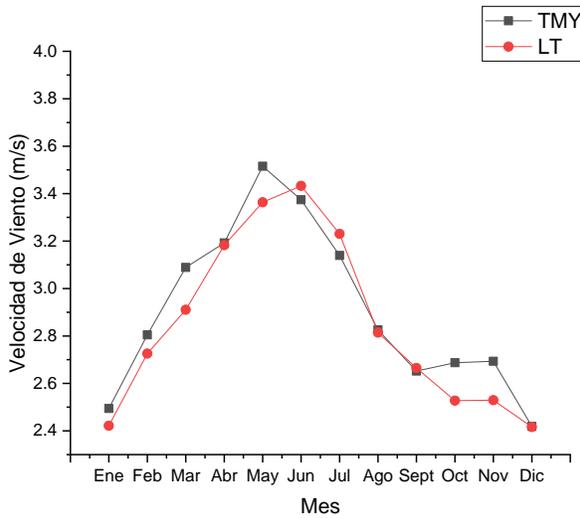


Figura 48. Gráfica VV mensual de TMYT

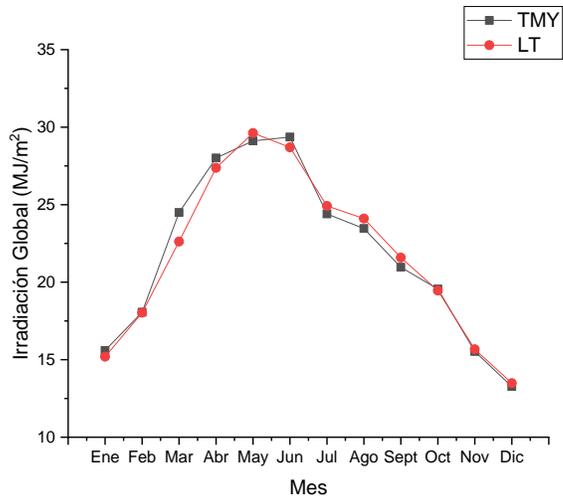


Figura 49. Gráfica GHI mensual de TMYT

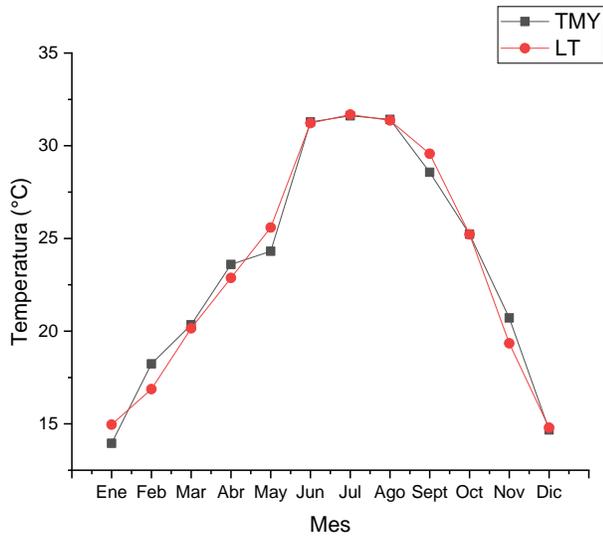


Figura 50. Gráfica TEMP mensual de TMYV

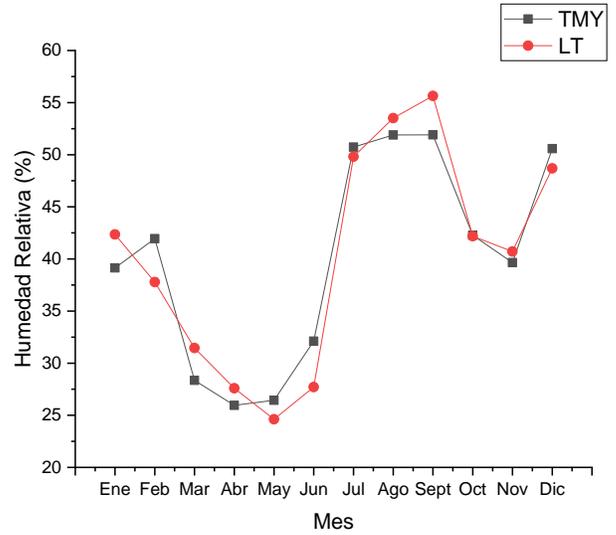


Figura 51. Gráfica HR mensual de TMYV

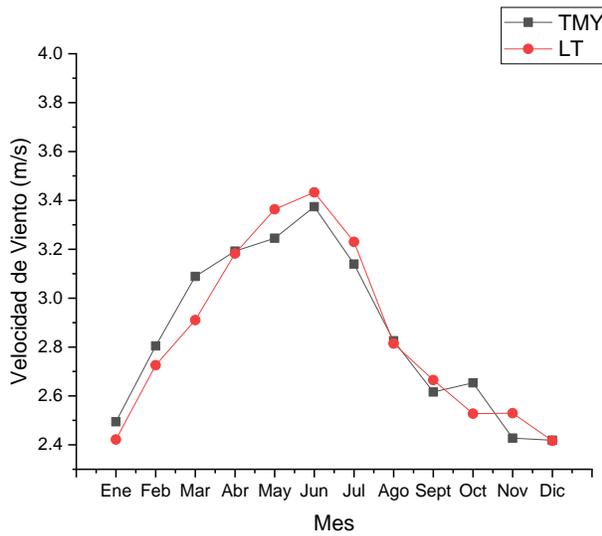


Figura 52. Gráfica VV mensual de TMYV

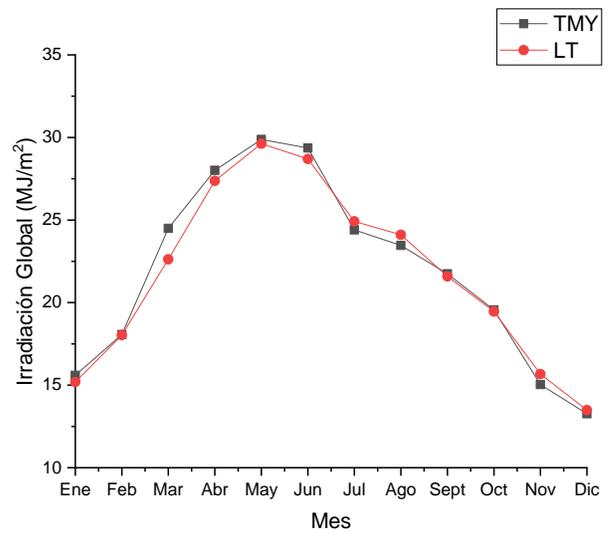


Figura 53. Gráfica GHI mensual de TMYV

Anexo C: Distribución diaria de irradiación solar, temperatura, humedad relativa de los datos base y distribución mensual de velocidad de viento de los datos base

A continuación, se muestran las distribuciones diarias de las variables de irradiación global diaria, temperatura y humedad de manera descendente, con el fin de identificar características propias del sitio.

Se realiza con los datos base, ya que equivale a la cantidad de datos totales de años que se tienen del sitio, lo cual nos podría definir las características del lugar, como el porcentaje promedio de días con mayor irradiación global en el año, o incluso la cantidad de días en promedio que se tienen con meno humedad relativa. También, se realizó una gráfica de cajas para analizar la distribución de velocidad de viento para cada uno de los meses del año, con los datos base.

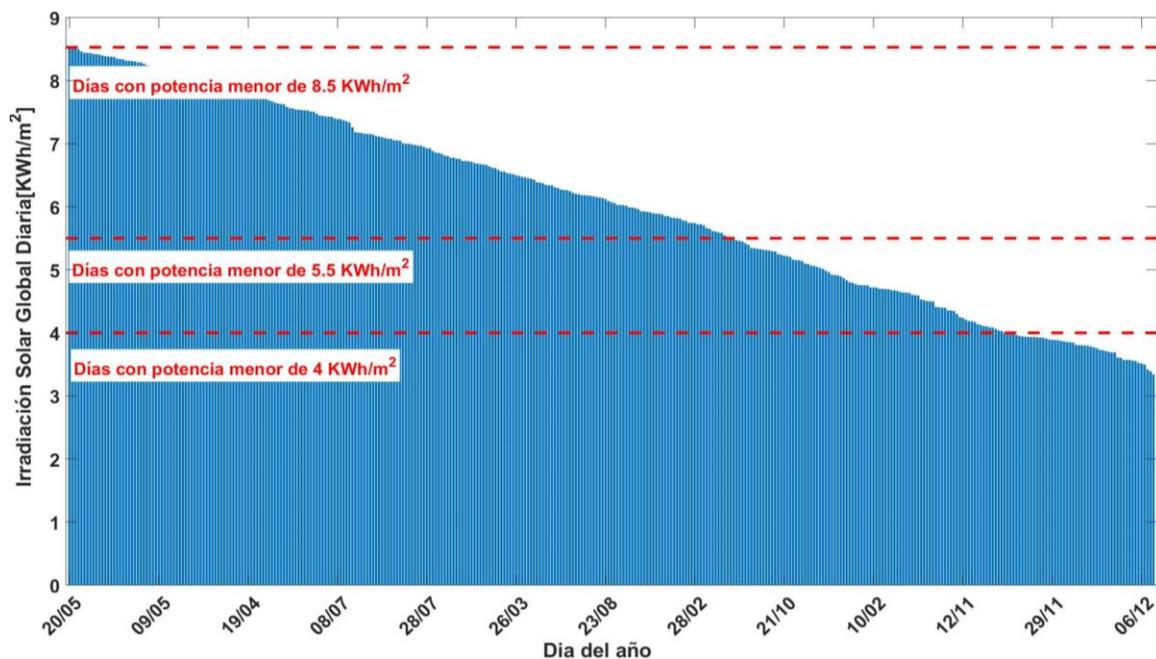


Figura 54. Distribución diaria de la radiación solar global para el TMYS

En la figura 54 se muestran los valores diarios de irradiación solar global en orden decreciente para los datos base, en el eje de las abscisas tenemos los días del año del TMY cada treinta días. Se analiza la variabilidad de la irradiación solar global para cada día del año, de la cual se identificaron en tres tipos de días. Se considero de los días potencia de 8.5 hasta valores < 5.5 kWh/m², rangos de potencia de <5.5 hasta 4.0 kWh/m² y rangos de 4.0 hasta el último valor de 3.34 kWh/m². Estos datos se obtuvieron de forma gráfica al analizar los comportamientos de los días.

De la figura 54 se obtuvo que el 61.09% del año los días se encuentran los rangos mayores de potencia 8.5 hasta valores < 5.5 kWh/m². El 24.9% entre 5.5 hasta 4.0 kWh/m² y por último los rangos de 4.0-3.34 kWh/m², que equivale al 14.01 % de los días en todo el año. Esto nos dice que predomina los días de potencia alta para Hermosillo, y son muy con baja potencia, por lo cual esto es una excelente noticia para el aprovechamiento de energía solar.

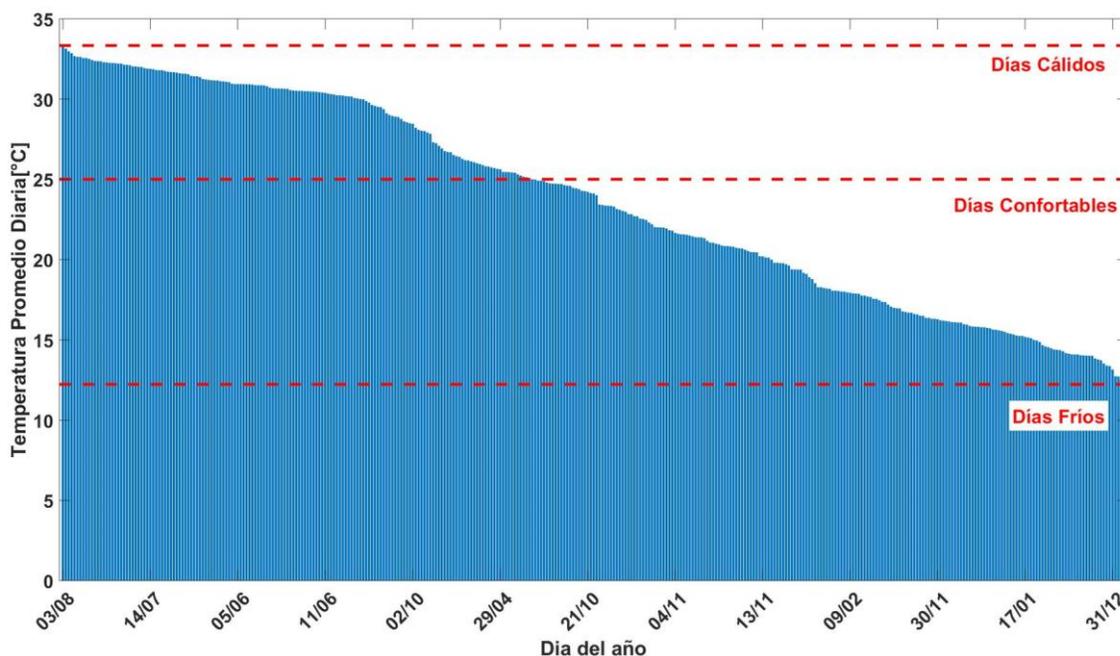


Figura 55. Distribución de la temperatura promedio diaria con los datos base

Para este caso se busco representar las condiciones temperatura promedio diaria para los datos base, La figura 55 muestra clasificación se realizó de la siguiente manera, los días cálidos se definieron de la temperatura máxima promedio de temperatura que fue de 33 °C a valores < 27 °C, que fueron un total de 130 días, correspondiente al 35.61% de los días del año. Los días confortables se definió que son los días con temperatura de 17 a 27 °C , debido a que fueron los encontrados en la bibliografía para climas secos(Hinojosa, 1997; Mishra & Ramgopal, 2013), estos dieron un total de 155 días obteniendo un total de 42.46% y por último los días fríos que son de los 17 °C hasta el último valor que fue de 12 °C, dando un total de 80 días correspondiente a 21.93% . Lo cual no sugiere que el tiempo en Hermosillo en su mayoría son días cálidos y muy pocos días fríos.

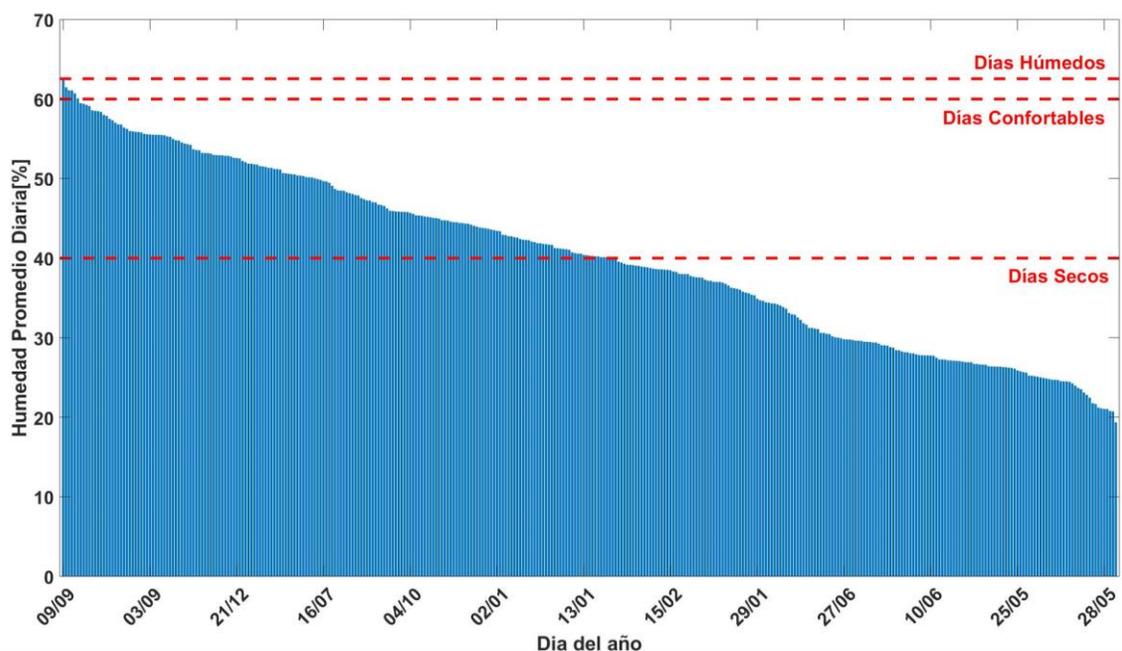


Figura 56. Distribución de la Humedad promedio diaria para los datos base

En la siguiente figura (fig. 56) se obtuvo la Humedad promedio diaria (%) para cada día del año de los datos base, en donde se definió que los rangos para día húmedos serían del valor máximo de humedad relativa: 62% hasta valores $< 40\%$, que constaron de un total de 6 días, equivalente a 1.64%, los días confortables se definieron según lo establecido como días confortables para zonas desérticas (Hinojosa, 1997) que ronda del 40-60% de Humedad relativa, de los cuales se obtuvo un total de 185 días, es decir el 50.68% del año. Para días secos se establecieron así a los días promedio con Humedades relativas menores al 40%, por tanto equivale a 174 días que son 47.67% de los días promedio de todo el año. Hay que recordar que esto es el promedio de todos los años, es decir hay años más secos que otros, pero esta gráfica nos sirve para darnos una idea general de la distribución promedio diaria.

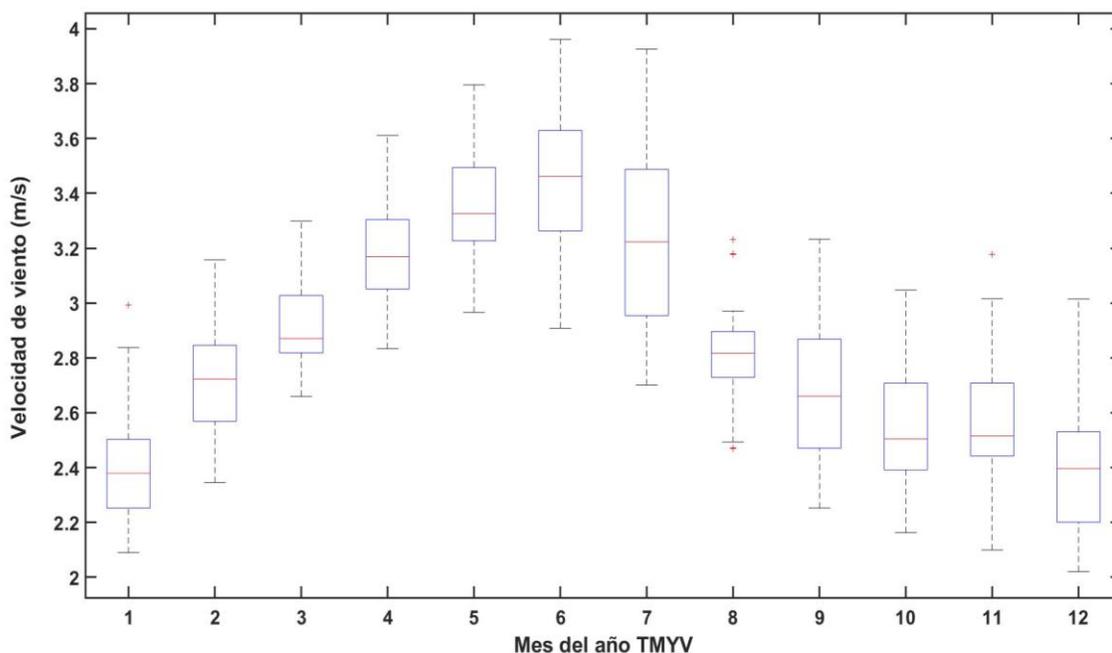


Figura 57. Gráfica de caja de datos para la velocidad de viento de los datos base

La siguiente gráfica (fig. 57) de caja de datos, nos muestra los valores más concurrentes que son los mostrados dentro de la caja, el inicio de la caja (en la parte inferior) se refiere al primer cuartil, del 25%, el final de la caja (en la parte superior) se refiere al cuartil 3, es decir 75% y la línea roja se refiere a la mediana. El bigote inferior nos muestra el valor mínimo, y el bigote superior el valor máximo de los valores típicos para ese mes en específico. Los asteriscos marcados en rojos son los valores atípicos, que están fuera de la distribución del diagrama de caja de bigotes, que son los máximos para algunos meses. Este diagrama mostró que los valores más altos de velocidad de viento se encuentran de abril hasta junio, este último mes sería el mes con velocidad de viento más altas en promedio, donde en julio comienza su decrecimiento para luego obtener los valores de velocidad de viento más bajos se encuentran aproximadamente en los meses noviembre hasta enero. En este gráfico podemos ver que en teoría la mayor cantidad de valores en todo el año ronda de 2-4 m/s.