Received: 29 Aug. 2022, **Accepted:** 15 Nov. 2022
Published online: 31 Dec. 2022
DOI: https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2022.2.102 **Volume:** 6, **Issue:** 2, **Pages:** 1-9

terra digitalis
international e-journal of maps

Modelado espacial del potencial de energía solar en México a partir de Modelo Digital de Elevaciones ASTGTM V3☆

Spatial modeling of solar energy potential in Mexico from the ASTGTM V3 Digital Elevation Model

Diana Hernández Martínez*[a], Luca Ferrari[b]

[a]*Posgrado en Ciencias de la Tierra, Centro de Geociencias, UNAM, Campus Juriquilla, Qro., Mex.*
[b]*Centro de Geociencias, UNAM, Campus Juriquilla, Qro., Mex.*

Resumen

Presentamos un modelo de alta resolución de la irradiación total del territorio nacional obtenido por medio del módulo "Solar Radiation toolset"de ArcGIS aplicado a un modelo digital de elevación (MDE) de alta resolución (30 x 30 m) obtenido a partir del Modelo de Elevación Digital Global, Versión 3, del Radiómetro de Reflexión y Emisión Térmica Espacial Avanzado de Terra (ASTGTM V3), cuyos datos se procesaron para eliminar valores erróneos. La alta resolución del MDE mejora significativamente los resultados particularmente en las zonas de cambios de relieve abrupto, que tienden a homogenizarse en modelos de baja resolución. Por cada celda se obtuvo la Radiación Solar Directa y la Radiación Solar Difusa con la finalidad de obtener la Radiación Solar Global en kilovatios hora por metro cuadrado (kWh/m^2). El resultado se presenta en 12 mapas mensuales y uno anual de la Radiación Solar Global del territorio nacional. Los meses que presentan mayor potencial de radiación solar corresponden a los meses de primavera y verano, con un máximo absoluto para el mes de julio. Los resultados teóricos de este trabajo se compararon con los valores de radiación de los modelos publicados por el National Renewable Energy Laboratory (NREL), y el Banco Mundial. Estos últimos muestran una sobreestimación del potencial solar debido a su menor resolución, particularmente en zonas con topografía abrupta.

Palabras clave: potencial radiación solar, Mexico, modelos digital de elevación de alta resolucion, ASTGTM V3

Abstract

We present a high-resolution model of the total irradiation of the Mexican territory obtained through the ArcGIS "Solar Radiation toolset" module applied to a high-resolution digital elevation model (DEM) (30 x 30 m) obtained from the Terra Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Version 3 (ASTGTM V3), which were processed to correct errors. The high resolution of the DEM significantly improves the results, particularly in steeper areas, which tend to be smoothed out in low resolution models. Direct Solar Radiation, Diffuse Solar Radiation and Global Solar Radiation in kilowatt hours per square meter (kWh/m^2) were obtained for each cell. The result is presented in twelve monthly maps and one annual map of the Global Solar Radiation of the national territory. The months with the greatest potential for solar irradiation correspond to spring and summer, with an absolute maximum for July. The comparison shows that our model has a better approximation to the real data than the models published by the National Renewable Energy Laboratory (NREL) and The World Bank. The latter show an overestimation of solar potential due to their lower resolution, particularly in areas with steep topography.

Keywords: Solar radiation potential, Mexico, high resolution digital elevation model, ASTGTM V3

1. Introducción

A raíz de la creciente dificultad de obtención de energía fósil y con el propósito de tener una mayor diversificación de la matriz energética y un menor impacto sobre el clima, en las últimas dos décadas varios gobiernos y agencias internacionales

☆© D. Hernández Martínez & L. Ferrari. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/), which permits noncommercial sharing of the work and adaptions, provided the original work is properly cited and the new creations are licensed under identical terms.

**E-mail address:* dianah@geociencias.unam.mx

han impulsado el desarrollo de las fuentes de energía renovables (Ölz, 2011). No obstante, el cambio de matriz energética requiere un análisis profundo, tanto del potencial de las fuentes renovables, como de la viabilidad geográfica, ecológica y social de su implementación, con el objetivo de alcanzar un desarrollo sostenible (ONU, 1987; 2015).

Entre las fuentes renovables modernas la energía solar fotovoltaica es la que muestra el mayor potencial de crecimiento ya que tiene una disponibilidad geográfica más amplia que la fuente hidroeléctrica o geotérmica y una mayor predictibilidad comparado con la fuente eólica. Para la planeación de cualquier proyecto de aprovechamiento de la energía solar la primera información que se requiere es conocer el potencial disponible en una determinada región. Sin embargo, aunque la cantidad de insolación solar incidente en la superficie de la tierra se puede medir con diversos métodos, la extensión territorial y la resolución espacial de las áreas de interés hace inviable la obtención de datos solo por medio de estaciones de medición dedicadas. Por lo tanto, algunos estudios han utilizado los datos meteorológicos y/o datos de teledetección para estimar la energía solar radiante en lugares donde no hay medidores (Zhao et al. 2022; Gueymard 2022). Otra alternativa son los módulos diseñados para la obtención del potencial teórico en sistemas de información geográfica (SIG), los cuales resultan viables para la estimación del potencial tanto para pequeñas y grandes escalas, desde techos de edificios hasta países enteros (Lan et al. 2021; Kausica y van Sark, 2021,(Gawley and McKenzie 2022).

En este trabajo presentamos un primer análisis de la irradiación solar del territorio nacional aplicando el módulo "Solar Radiation toolset"de ArcGIS (ArcGIS Desktop, 2022) a un modelo de elevación de alta resolución obtenido a partir del Radiómetro de Reflexión y Emisión Térmica Espacial Avanzado de Terra, que, a pesar de no considerar la nubosidad, puede servir como base para la estimación preliminar del potencial máximo de generación solar fotovoltaica.

2. Estimación del potencial de energía solar e influencia de la resolución de los modelos digitales de elevación

Existen diversos mapas del potencial de energía solar para México, tales como los realizados por el Servicio Solarimétrico Mexicano (Servicio Solarimétrico Mexicano. 2022), el Banco Mundial (The World Bank, 2020), y el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos de América (NREL) (Sengupta et al., 2018). Sin embargo, los mapas disponibles son de baja resolución, con pixeles de 250 a 4,000 m de lado. Es conocido que la resolución determina la precisión de los resultados de los mapas (Thompson et al., 2001). Por ello, en este trabajo se realizó un ejercicio con el módulo "Solar"de ArcGIS para estimar el potencial de energía solar para México a partir de un Modelos Digitales de Elevación (DEM) de alta resolución. La calidad de los DEM determina la precisión y fiabilidad del análisis geomorfométrico espacial (Thompson et al., 2001) y se encuentra estrechamente relacionada a la resolución horizontal y la precisión vertical en la que se representan los datos de elevación y su fuente origen (Atkinson et al., 2020).

Disminuir la resolución horizontal de un DEM tiende a crear un paisaje más suave, menos definido, con pendientes más moderadas y curvaturas reducidas. Una disminución en la precisión vertical del DEM de resolución horizontal produce un paisaje menos continuo, con cambios más abruptos en el gradiente de la pendiente y la curvatura de la pendiente (Figura 1) (Thompson, Bell, and Butler 2001).

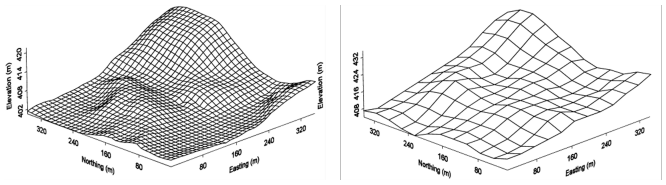


Figura 1. Cambios en el relieve y pendiente al reducir la escala de resolución de un DEM (Thompson, Bell, and Butler 2001) / Figure 1. Effects on relief and slope when reducing the resolution scale of a DEM (Thompson, Bell, and Butler 2001).

En el caso de la estimación del potencial de radiación solar ambos aspectos comprometen la calidad y fiabilidad del análisis, ya que la elevación y pendientes influyen sobre el cálculo de la irradiación (ESRI,2022). Estudios previos para algunas zonas del país (López & Reyes, 2006) consideran como óptima una resolución de 30 metros en los DEM para análisis y clasificación del relieve en zonas con cambios topográficos abruptos, cálculo de parámetros del relieve y clasificación de formas del terreno en escala media.

3. Metodología

3.1. Limpieza y procesado de imágenes

Para este estudio de se han utilizado los datos de las 253 imágenes que componen el Territorio Nacional Mexicano obtenidas del Modelo de Elevación Digital Global, Versión 3, del Radiómetro de Reflexión y Emisión Térmica Espacial Avanzado de Terra (ASTGTM V3, por sus siglas en inglés) disponibles en el sitio web Earth Data de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) de Estados Unidos de América (https://www.earthdata.nasa.gov/). Las imágenes tienen una resolución de 30 m por pixel, con un tamaño de área un grado y las características que se muestran en la Tabla 1.

Algunos análisis mencionan que el modelo SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), presentan una mejor precisión en los valores de elevación (Carrera-Hernández, 2021), sin embargo, a diferencia de las imágenes ASTGTM, presentan una gran cantidad de datos nulos por efectos de la nubosidad. Todas las imágenes satelitales pueden estar sujetas a imperfecciones, como valores verticales y horizontales anómalos, causados por ruido de objetos o nubosidad, huecos (áreas no observadas) y sesgos (compensaciones) que pueden variar según la región o

Tabla 1. Características de las imágenes ASTGTM V3. / Table 1. ASTGTM V3 images specifications.

Tipo de proyección	Geográfica
Datum horizontal	WGS84
Unidades verticales	Metros
Resolución espacial	1 segundo de arco para cobertura global (~ 30 metros)
Tamaño de la trama	Azulejos de 1 grado

presentarse en los bordes (Figura 2). Debido a las diversas imperfecciones que se pueden presentar en las imágenes satelitales, resulta necesaria una exhaustiva revisión y corrección de las mismas (Hirt 2018).

Consideramos el software ArcGIS como el más apropiado para realizar los procesos de homologación y corrección de las imágenes, debido a que cuenta con aplicaciones para crear y automatizar procesos. En la primera fase de análisis se eliminaron datos nulos, datos de relieve negativos o de nubosidad, logrando homologar e integrar las imágenes ASTGTM V3 que comprenden el Territorio Nacional. Los rangos de elevación considerados como aceptables deben restringirse alturas menores a 5,636 m (correspondiente al Pico de Orizaba, punto más alto del territorio) y las elevaciones mayores al nivel del mar, excepto en el caso de la zona de Laguna Salada en Baja California Norte que presenta niveles de -9 m (Carrera-Hernández, 2020) .

En los DEM solo se detectaron valores negativos correspondientes a cuerpos de agua, por lo que se realizó una reclasificación de valores que se encontraran fuera de los rangos naturales de la topografía mexicana. La mayoría de las imágenes del país aparentemente no contenían errores, sin embargo, se les realizó el mismo procesado para garantizar su calidad.

Para el procesado de las imágenes ASTGTM V3 se desarrolló una herramienta con el apoyo de la aplicación ModelBuilder del software ArcGIS, con el objetivo de establecer las secuencias de geoprocesamiento a fin de optimizar el proceso, acortar la velocidad del cálculo, asegurar la correcta aplicación del procedimiento y finalmente repetirlo para todas las imágenes utilizadas. La herramienta permitió reducir el error por factor humano, además de disminuir considerablemente la cantidad de archivos finales de salida y el volumen de almacenamiento.

Todas las imágenes ASTGTM V3 corregidas y procesadas, mantuvieron las propiedades originales de resolución (30 m) y sistema geodésico de coordenadas geográficas WGS84, EPSG: 4326. Las imágenes fueron agrupadas en un solo ráster nacional, el cual a su vez mantuvo las propiedades originales de resolución y sistema de coordenadas.

Cada uno de los DEM procesados de ASTGTM V3 fue transformado del sistema geodésico de coordenadas geográficas WGS84, EPSG:4326, al sistema coordenado México ITRF2008, EPSG:6372; debido a que para el análisis de radiación solar es recomendable que los valores X, Y y Z se encuentren en el mismo sistema de unidades.

La normatividad nacional mexicana, establecida por el INEGI, respecto al uso y aplicación de marcos de referencia geodésicos establece como sistema oficial para México el ITRF2008. La Norma Técnica del Sistema Geodésico Nacional, específica que, desde el punto de vista cartográfico, el Sistema Geodésico Horizontal ITRF2008 época 2010 es compatible con el WGS84, debido a que las diferencias al momento de realizar las transformaciones resultan ser mínimas (INEGI, 2010).

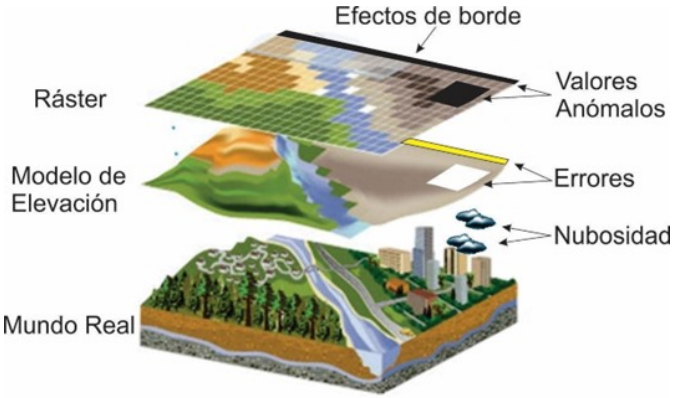


Figura 2. Errores en los modelos de elevación (Galán, Lopez-Paredes, and Martínez 2006) / Figure 2. Errors in Digital Elevation Models (Galán, Lopez-Paredes, and Martínez 2006)

3.2. Metodología de Estimación del potencial de energía solar mediante SIG

Para la estimación del potencial de energía solar se utilizaron los datos de las imágenes ASTGTM V3, previamente procesadas con el método de limpieza.

Para el procesado de las imágenes en el Módulo de Radiación solar de ArcGIS se desarrolló una herramienta con el apoyo de la aplicación ModelBuilder. Con las imágenes unificadas en el mismo sistema coordenado se procedió a ejecutar el módulo de Radiación Solar de ArcGIS, con cálculos de tiempo a intervalos mensuales para el año 2000, cada 2 horas. Los cálculos de radiación fueron en 8 direcciones en cielo despejado con la finalidad de obtener los máximos energéticos. Los mapas obtenidos de este proceso son Radiación Solar Directa, Radiación Solar Difusa con los que se obtiene la Radiación Solar Global (Figura3)(ESRI,2022).

Los mapas tienen unidades de vatios hora por metro cuadrado (Wh/m^2). Cada uno de los mapas obtenidos representa los valores mensuales y anuales. Para facilitar el manejo de unidades y la comparación con otros mapas se convirtieron los valores del mapa de Radiación Solar Global a kilovatios hora por metro cuadrado (kWh/m^2).

4. Resultados

Los resultados del análisis se presentan en un total de 13 mapas nacionales de Radiación Solar: uno anual y 12 mensuales (Ver página 9). El máximo anual registrado para el país es

Figura 3. Estimación de Radiación Solar mediante ModelBuilder / Figure 3. Solar Radiation Estimation using ModelBuilder.

de 2,778 kWh/m^2 anual, lo que corresponde a 7.6 kWh/m^2 por día (Tabla 2). En los mapas interactivos es posible obtener los valores por cada celda de 30 x 30 m.

Tabla 2. Radiación Solar mensual total y promedio diario / Table 2. Total monthly solar radiation and daily average

	kWh/m^2 Total			kWh/m^2 diario		
Mes	**Máx**	**Mín**	**Moda**	**Máx**	**Mín**	**Moda**
Enero	212.36	1.90	97.00	6.85	0.06	3.13
Febrero	206.13	1.99	107.00	7.11	0.07	3.69
Marzo	240.09	2.50	142.00	7.74	0.08	4.58
Abril	254.89	4.22	160.00	8.50	0.14	5.33
Mayo	277.78	14.10	174.00	8.96	0.45	5.61
Junio	275.34	21.50	177.00	9.18	0.72	5.90
Julio	281.23	18.40	179.00	9.07	0.59	5.77
Agosto	268.62	6.42	168.00	8.67	0.21	5.42
Septiembre	248.65	2.63	150.00	8.29	0.09	5.00
Octubre	224.76	2.23	122.00	7.25	0.07	3.94
Noviembre	209.25	1.90	98.00	6.98	0.06	3.27
Diciembre	208.10	1.79	90.00	6.71	0.06	2.90
Anual	**2778.00**	**102.00**	**1387.00**	**7.61**	**0.28**	**3.80**

Es importante aclarar que el máximo anual no corresponde a la suma de máximos mensuales, debido a que los máximos mensuales varían su ubicación en el área geográfica. Los meses que presentan mayor potencial de radiación solar corresponden a los meses de primavera (marzo, abril, mayo, junio) y verano (junio, julio, agosto y septiembre). Los meses de otoño e invierno (octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero) presentan las radiaciones solares de menor intensidad. El máximo absoluto corresponde al mes de julio (Tabla 2).

Para dar cuenta de la variabilidad geográfica se graficó la frecuencia de los valores mensuales de kWh/m^2 Total en el territorio nacional, donde cada ocurrencia corresponde a un pixel de resolución a 30 m. En las gráficas, que se presentan en la Figura 4, se puede observar que los picos o valores más altos de irrandiancia de primavera y verano solo se presentan en área restringidas, que corresponden a menos del 30 % del territorio nacional.

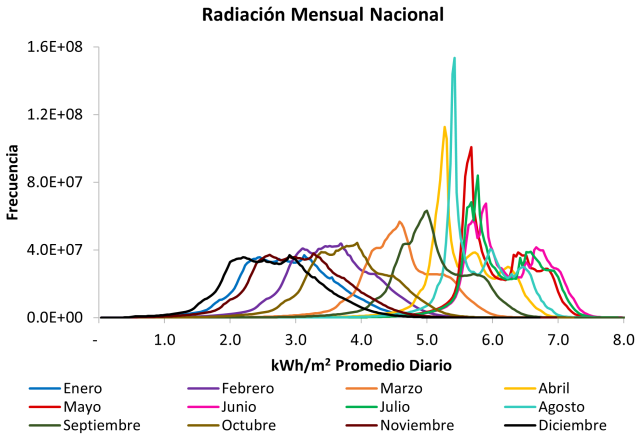


Figura 4. Gráficas mensuales de la frecuencia de los valores de radiación (kWh/m^2) que se presentan en el Territorio Nacional / Figure 4. Monthly graphs of the frequency of radiation values (kWh/m^2) estimated in the National Territory

Es importante tomar en cuenta que los valores obtenidos se refieren a la radiación solar en ausencia de nubes, lo que explica porque los valores más elevados tienden a ubicarse en el centro y sur del país. A pesar de esto, el modelo puede servir como base para la estimación preliminar del potencial máximo de generación solar fotovoltaica, con mayor precisión en la región norte del país que experimenta una baja nubosidad.

5. Comparación

Los mapas de radiación solar publicados por NREL y el Banco Mundial son los de mayor cobertura a nivel mundial. El NREL utiliza productos satelitales que proporcionan estimaciones continuas de la radiación solar que cubren un amplio espectro de escalas temporales y espaciales para el período 1998–2016 (Sengupta et al. 2018). El Banco Mundial basa su metodología para la obtención de datos satelitales de resoluciones de hasta 4 km, que son reprocesadas para obtener mayores resoluciones (The World Bank, 2019). El módulo de ArcGIS para la estimación de radiación solar está basado en métodos teóricos de algoritmo de cuenca visual hemisférica, donde es estimada la cantidad de radiación total para cada ubicación de la superficie topográfica (ESRI, 2022).

Se realizó la comparación de los mapas de NREL y del Banco Mundial con el mapa de radiación obtenido con ArcGIS y ASTGTM V3 (Tabla 3). El modelo obtenido en este trabajo presenta un valor máximo mayor pero una estimación general menor de los modelos de NREL y el Banco Mundial (Figura 5).

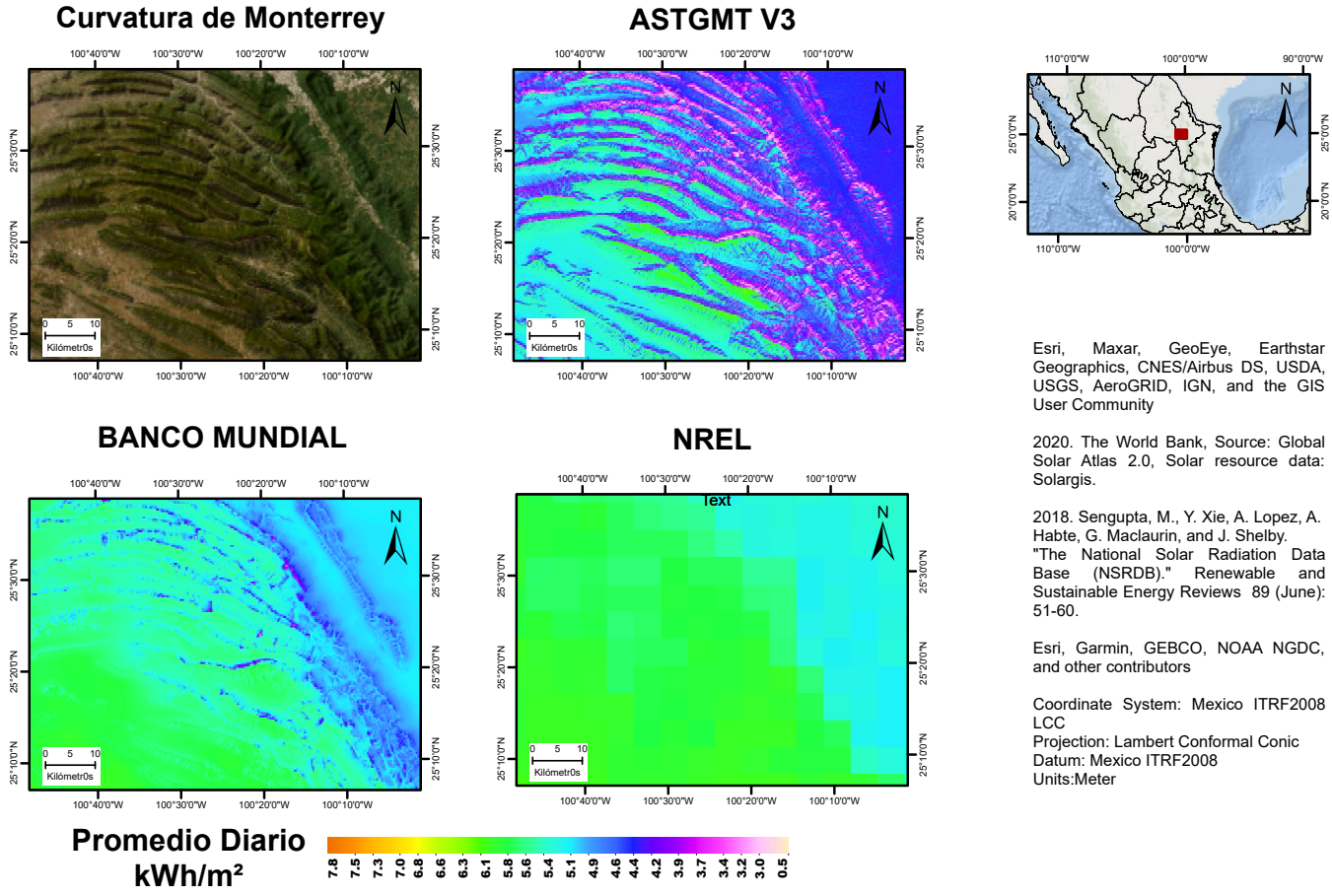


Figura 5. Comparación entre los valores de radiación de los diferentes modelos de radiación solar en el área de la Curvatura de Monterrey, en el Estado de Nuevo León / Figure 5. Comparison between the radiation values of the different models of solar radiation in the area of the Curvature of Monterrey, Nuevo León state.

Tabla 3. Comparación Valores de Radiación Solar de los Modelos ASTGTM V3, Banco Mundial (BM) y NREL / Table 3. Comparison of Solar Radiation Values of the ASTGTM V3, World Bank (WB) and NREL Models.

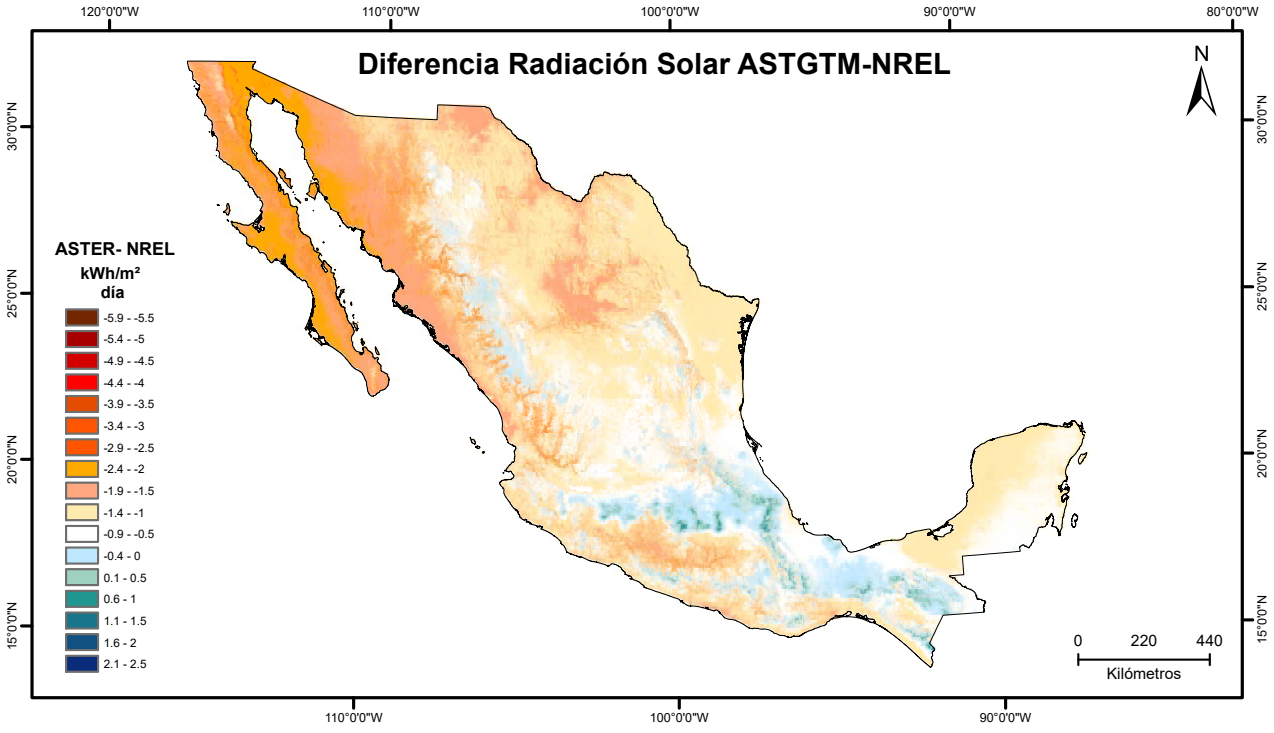
Radiación Solar en kWh/m^2 promedio por día			
	ASTGTM V3	**BM**	**NREL**
Máximo	7.6	6.3	6.6
Percentil 90	5.4	6.1	6.3
Percentil 75	5.0	6.0	6.1
Percentil 50	4.6	5.9	5.9
Percentil 25	4.3	5.5	5.6
Percentil 10	4.1	5.1	5.4
Mínimo	0.28	4.6	3.9

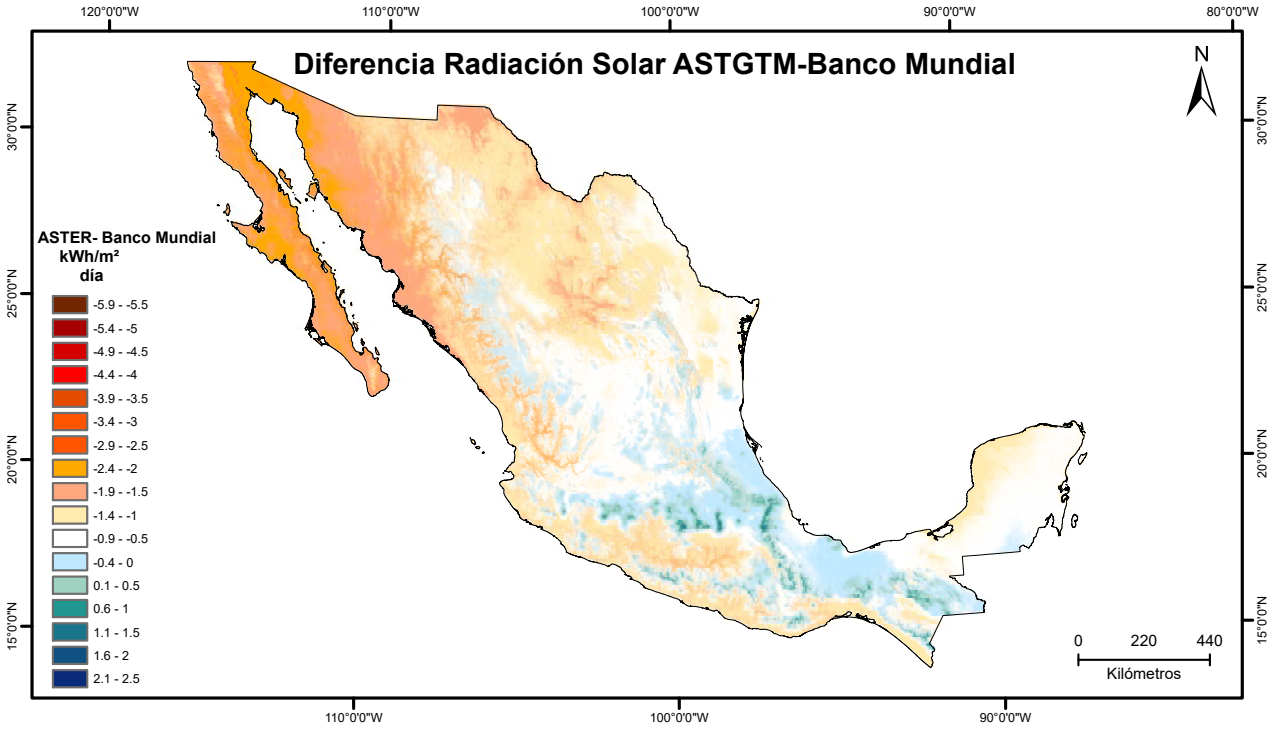
La sobreestimación del recurso solar por parte del NREL ha sido reportada en diversos estudios regionales como en Pakistan (Tahir and Asim, 2018; Ahmad and Zeeshan, 2022), Colombia (Luna Carlosama et al., 2021) y Ecuador (Revelo, 2018).

Los modelos NREL y del Banco mundial presentan valores por encima de 5.8 kWh/m^2 para la mayor parte del territorio nacional: 66.5 % para NREL y 56.3 % para el Banco de México. En contraste el modelo obtenido en este trabajo solo presenta 1.1 % de territorio nacional con valores mayores a 5.8 kWh/m^2 y situa el 48.8 % del territorio nacional con valores entre 4.2 y 4.8kWh/m^2 (Figuras 6 y 7). Cabe mencionar que NREL ha reconocido y detectado variabilidades de hasta el 10 % en sus resultados (Sengupta et al., 2018). Por su metodología la variabilidad temporal de la radiación global solar y el tamaño de la cuadricula de NREL da como resultado variaciones hasta del ±25 % en la radiación solar global (Habte et al. 2020).

6. Conclusiones

En las estimaciones de potencial solar tanto la metodología de obtención de datos como el factor de escala del mapa impactan directamente en el resultado. En este trabajo encontramos que las estimaciones de radiación solar mayores corresponden al modelo de NREL, obtenidos a partir de una resolu-





Coordinate System: Mexico ITRF2008 LCC
Projection: Lambert Conformal Conic
Datum: Mexico ITRF2008
Units:Meter

2018. Sengupta, M., Y. Xie, A. Lopez, A. Habte, G. Maclaurin, and J. Shelby. "The National Solar Radiation Data Base (NSRDB)." Renewable and Sustainable Energy Reviews 89 (June): 51-60.
2020. The World Bank, Source: Global Solar Atlas 2.0, Solar resource data: Solargis.

Figura 6. Mapas de diferencias puntual entre valores de Radiación Solar del modelo ASTGTM V3 (este trabajo) con los de NREL y el Banco Mundial / Figure 6. Maps showing differences between Solar Radiation values of the ASTGTM V3 model (this work) with those of NREL and the World Bank.

cion en pixeles de 4,000 m de lado, donde valores superiores a 6.4 kWh/m^2 corresponden al 17.4 % del territorio nacional, en contraste con el 4 % de los etimados por el Banco de Mundial que tiene pixeles de 250 m de lado. Al incrementar la resolución a 30 m por pixel con el modelo ASTGTM V3 los valores superiores a 6.4 kWh/m^2 se restringen al 0.1 % del territorio nacional.

Variaciones significativas en los modelos de radiación solar para México habían sido reportadas anteriormente parar otro tipo de modelos obtenidos con diferentes metodología a partir de datos de estaciones meteorologicas; al cambiar de una cuadricula de 500 m a 250 m los valores disminuian en 1.04 kWh/m^2, pasando de 5.04 a 4 kWh/m^2 (Cervantes-Ortiz et al., 2021).

Con este trabajo hemos demostrado que la herramienta "Solar Radiation toolset"de ArcGIS aplicado a un modelo digital de elevación de alta resolución (30 x 30 m) a partir del satélite ASTER produce datos mas precisos para estimar la radiación solar teórica en nuestro país dando cuenta de la gran variación geográfica y estacional. La confiabilidad de los resultados se comprobará en un próximo trabajo donde se compararán con los datos medidos en superficie.

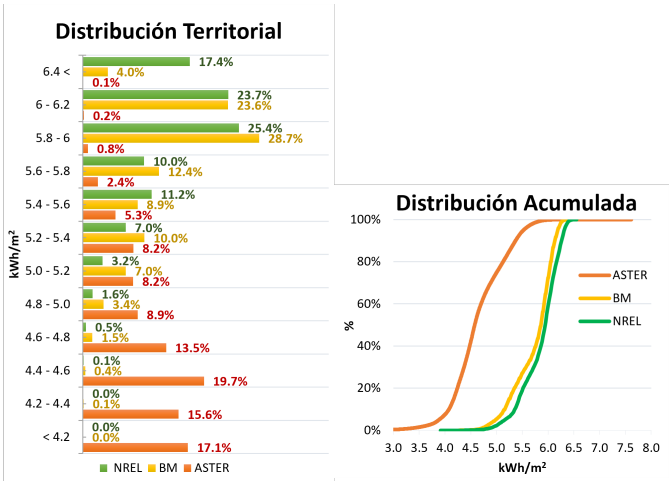


Figura 7. Comparación de la distribución de los valores de Radiación Solar de los Modelos ASTGTM V3 (ASTER), Banco Mundial (BM) y NREL / Figure 7. Comparison of the distribution of the Solar Radiation values of the ASTGTM V3 (ASTER), World Bank (WB) and NREL Models.

Agradecimientos y finaciamiento

El estudio fue apoyado por el proyecto CONACYT F003-319032 “Plataforma Nacional Energía Ambiente y Sociedad. Fase 2: Consolidación y desarrollo de herramientas de modelado y planificación” y es parte de la tesis doctoral de la primera autora en el Posgrado en Ciencias de la Tierra UNAM. Agradecemos al M. en C. Francisco Javier Osorno Covarrubias por la confección del mapa interactivo y a la Dra. Penélope López-Quiroz por su apoyo durante el proceso editorial.

Referencias

Ahmad, M., Zeeshan, M., 2022. Validation of weather reanalysis datasets and geospatial and techno-economic viability and potential assessment of concentrated solar power plants. Energy Conversion and Management 256, 115366, https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2022.115366.

Atkinson, J., de Clercq, W., Rozanov, A., 2020. Multi-resolution soil-landscape characterisation in KwaZulu Natal: Using geomorphons to classify local soilscapes for improved digital geomorphological modelling. Geoderma Regional 22, e00291, https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00291.

Carrera-Hernández, J. J., 2020. Vertical datum transformation grids for Mexico. Scientific Data 7 (1), 167, https://doi.org/10.1038/s41597-020-0511-x.

Carrera-Hernández, J. J., 2021. Not all DEMs are equal: An evaluation of six globally available 30 m resolution DEMs with geodetic benchmarks and LiDAR in Mexico. Remote Sensing of Environment 261, 112474, https://doi.org/10.1016/J.RSE.2021.112474.

Cervantes-Ortiz, C. A., Cervantes, I., Cervantes-Camacho, R. E., 2021. The effect of parameters and irradiance estimation techniques on PV potential quantification: The case of Mexico. Sustainable Energy Technologies and Assessments 45, 101131, https://doi.org/10.1016/J.SETA.2021.101131.

ESRI, 2022. Area Solar Radiation—Help | ArcGIS Desktop (online). Retrieved: 09/01/2022. https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.5/tools/spatial-analyst-toolbox/area-solar-radiation.htm.

Galán-Ordax, J. M., López-Paredes, A., del Olmo-Martínez, R., 2006. Modelado y simulación basada en agentes con SIG para la gestión de agua en espacios metropolitanos. En: X Congreso de Ingeniería de Organización. pp. 1–10, valencia, 7-8 de septiembre.

Gawley, D., McKenzie, P., 2022. Investigating the suitability of GIS and remotely-sensed datasets for photovoltaic modelling on building rooftops. Energy and Buildings 265, 112083, https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2022.112083.

Gueymard, C. A., 2022. 1.10 - Solar radiation Resource: Measurement, Modeling and Methods. En: Letcher, T. M. (Ed.), Comprehensive Renewable Energy (Second Edition). Elsevier, Oxford, pp. 176–212, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00101-1.

Habte, A., Sengupta, M., Gueymard, C., Golnas, A., Xie, Y., 2020. Long-term spatial and temporal solar resource variability over America using the NSRDB version 3 (1998–2017). Renewable and Sustainable Energy Reviews 134, 110285, https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110285.

Hirt, C., Mar. 2018. Artefact detection in global digital elevation models (DEMs): The Maximum Slope Approach and its application for complete screening of the SRTM v4.1 and MERIT DEMs. Remote Sensing of Environment 207, 27–41, https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.037.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010. ACUERDO por el que aprueba la Norma Técnica para el Sistema Geodésico Nacional. Diario Oficial de la Federación (DOF), publicado 23 de diciembre de 2010.

Kausika, B. B., van Sark, W. G. J. H. M., 2021. Calibration and Validation of ArcGIS Solar Radiation Tool for Photovoltaic Potential Determination in the Netherlands. Energies 14 (7), 1865, https://doi.org/10.3390/en14071865.

Lan, H., Gou, Z., Xie, X., 2021. A simplified evaluation method of rooftop solar energy potential based on image semantic segmentation of urban streetscapes. Solar Energy 230, 912–924, https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2021.10.085.

Luna Carlosama, C. F., Moreno Chuquen, R., Mulcue Nieto, L. F., Jiménez García, F. N., Jan. 2021. Potential of Photovoltaic Generation in the Putumayo Department of Colombia. Applied Sciences 11 (12), 5528, https://doi.org/10.3390/app11125528.

López-López, D. M., 2006. Desarrollo e implementación de un modelo para la clasificación automática de unidades de relieve a partir de modelos digitales de elevaciónTesis de maestría. Centro de Investigación en Geografía y Geomática Ing. Jorge L. Tamayo A. C.

Olz, S, 2011. Renewable energy policy considerations for deploying renewables (online). International Energy Agency (IEA), https://www.ctc-n.org/sites/www.ctc-n.org/files/resources/renew_policies.pdf.

Organización de las Naciones Unidas, ONU, 1987. Nuestro futuro común: Informe Brundtland (online).

Organización de las Naciones Unidas, ONU, 2015. General Assembly Resolution A/RES/70/1. Transforming Our World, the 2030 Agenda for Sustainable Development (online).

Revelo, V. D. G., 2018. Repositorio Digital - EPN: Validación de datos satelitales de radiación solar utilizando mediciones terrestres para el Ecuador. Retrieved: 10/10/2022. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19516.

Sengupta, M., Xie, Y., Lopez, A., Habte, A., Maclaurin, G., Shelby, J., 2018. The National Solar Radiation Data Base (NSRDB). Renewable and Sustainable Energy Reviews 89, 51–60, https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.003.

Servicio Solarimétrico Mexicano, 2022. Mapas de irradiancia solar diaria (online). Retrieved: 09/30/2022. https://rayenari.geofisica.unam.mx/~mauro/mapas/anual.pdf.

Tahir, Z. R., Asim, M., 2018. Surface measured solar radiation data and solar energy resource assessment of Pakistan: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 81, 2839–2861, https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.06.090.

The World Bank, 2019. Methodology, Solar radiation modeling (online). The World Bank Group, retrieved: 10/10/2022. https://solargis.com/docs/methodology/solar-radiation-modeling.

The World Bank, 2020. Global Solar Atlas 2.0. The World Bank Group.

Thompson, J. A., Bell, J. C., Butler, C. A., 2001. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. Geoderma 100 (1), 67–89, https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00081-1.

Zhao, S., Wu, L., Xiang, Y., Dong, J., Li, Z., Liu, X., Tang, Z., Wang, H., Wang, X., An, J., Zhang, F., Li, Z., Oct. 2022. Coupling meteorological stations data and satellite data for prediction of global solar radiation with machine learning models. Renewable Energy 198, 1049–1064, https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2022.08.111.

This article accompanies the following material:

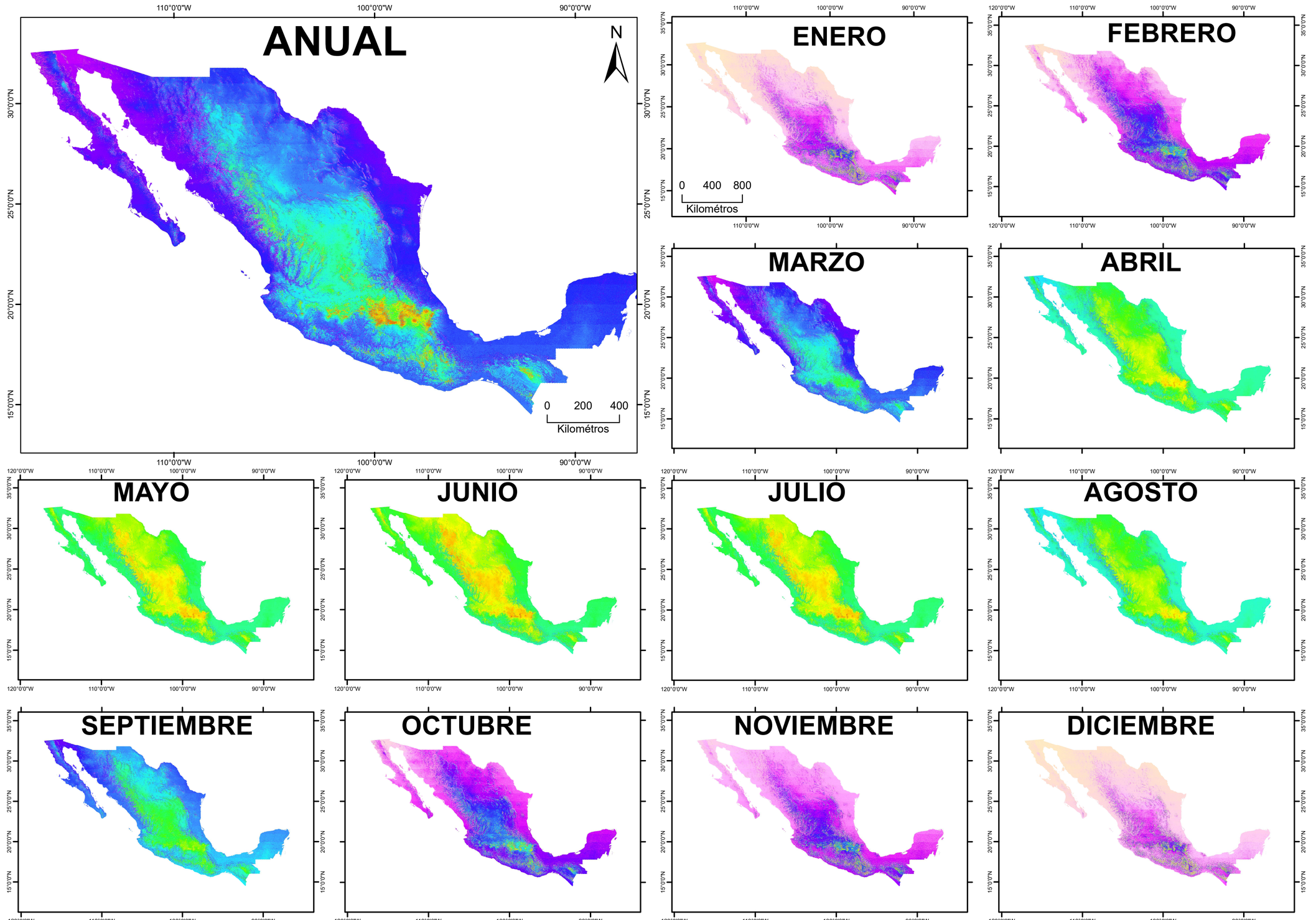
Static map: 10.22201/igg.25940694e.2022.2.102.216
Interactive map: 10.22201/igg.25940694e.2022.2.102.217

MODELADO ESPACIAL DEL POTENCIAL DE ENERGÍA SOLAR EN MÉXICO A PARTIR DE MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES ASTGTM V3

Diana Hernández Martínez[1], Luca Ferrari[2]

[1]Posgrado en Ciencias de la Tierra, Centro de Geociencias, UNAM, Campus Juriquilla, Qro.
[2]Centro de Geociencias, UNAM, Campus Juriquilla, Qro.

terra digitalis
international e-journal of maps



Radiación Solar

Promedio Diario
kWh/m²

9.0
8.5
8.0
7.8
7.5
7.3
7.0
6.8
6.6
6.3
6.1
5.8
5.6
5.4
5.1
4.9
4.6
4.4
4.2
3.9
3.7
3.4
3.2
3.0
0.5

WGS 1984
Word Mercator
Projection: Mercator
Datum: WGS 1984
Units:Meter