

Una aproximación geoespacial para la estimación de la generación de energía fotovoltaica en Sonora

A geospatial approach for the estimation of photovoltaic power generation in Sonora

Leonardo Coronado Arvayo* y José Mauricio Galeana Pizaña**

Recibido: 10/7/2023. Aceptado: 3/3/2024. Publicado: 13/3/2024.

Resumen. A nivel internacional existe acuerdo en que la energía fotovoltaica (EF) es un pilar de la transición energética requerida para mitigar los efectos del calentamiento global. El presente artículo tiene por objetivo general aportar una primera aproximación geoespacial para estimar la proporción de territorio y la cantidad de electricidad factible de ser generada mediante el proceso fotovoltaico en el estado de Sonora. Para cumplir con esto, primero es necesario plantear que método es el más apto para identificar estos sitios. En la literatura se identificó que el proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) es una de las metodologías más empleadas para la selección de sitios para la producción de diferentes tipos de energías solares, incluyendo mayoritariamente a la fotovoltaica (Suprova *et al.*, 2020; Malemnganbi y Shimray, 2020; Al Garni y Awasthi, 2017; Solangi *et al.*, 2019). Una mezcla de GIS y AHP es uno de los submétodos más apto para identificar estos sitios y aplicarles condiciones específicas (Chandio *et al.*, 2012), en este caso en particular a través de la aplicación de ecuaciones, usando álgebra de mapas, para estimar la producción teórica de electricidad para toda la entidad federativa con el proceso fotovoltaico. Ya que los sistemas de información geográfica (GIS-AHP) permiten espacializar objetivos específicos.

De aquí que la primera tarea fuera espacializar las variables determinísticas del proceso fotovoltaico, así como los sitios donde no es posible producir esta energía. En este caso, se obtuvieron las variables meteorológicas gracias a

datos de las estaciones de CESAVE-SIAFESON (2020). Por cuestiones de disponibilidad de datos y consistencia de estos en las estaciones, se emplearon 97 estaciones en total. Estas registran diferentes medidores. Como estos datos son geográficamente puntuales, se requirió utilizar técnicas de interpolación espacial para hacerlos continuos.

El resto de los criterios de selección se obtiene de diferentes fuentes de información. En el caso de la elevación del terreno del Continuo de Elevaciones Mexicano de INEGI (s.f.), la inclinación y la orientación del terreno se estimaron a partir de los datos de elevación con la técnica geodésica de su método respectivo en el software Arcmap. Las vialidades se tomaron de la Red Nacional de Caminos, obtenida de INEGI (2020), las manchas urbanas y rurales respectivas de INEGI (2016) y las líneas de transmisión eléctrica de CENACE (2016). El método de proximidad empleado para estas tres variables fue el de camino-distancia del software Arcmap.

Los criterios de exclusión son las líneas de transmisión (CENACE, 2016), los patrimonios de la humanidad (CONANP, 2021a), las áreas naturales protegidas (CONANP, 2021), los sitios de vegetación nativa y vida (INEGI, 2017), los cuerpos de agua (INEGI, 2009), las manchas urbanas y rurales (INEGI, 2016), la propiedad social que se encuentra en la carta catastral de Sonora (INEGI, 2016a), la red vial (INEGI, 2020c), lugares con una inclinación mayor a 10 grados (INEGI, s.f.) y los sitios turísticos, religiosos, aeropuertos y otros (INEGI, 2020c).

* Candidato a Doctor por el Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A.C., Ciudad de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6960-1060>

** Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial. Contoy 137, Lomas de Padierna, 14240, Tlalpan, Ciudad de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3623-6851>. Email: mgaleana@centrogeo.edu.mx. Autor de correspondencia.

Con esto se contó con las variables determinísticas y los sitios no aptos para instalar plantas solares. Para identificar la importancia relativa de las variables determinísticas se utilizaron estudios similares como son Sánchez-Lozano et al. (2013), Chen et al. (2014), Noorollahi et al. (2016), Zoghi et al. (2017), Doljak y Stanojević (2017), Al Garni y Awasthi (2017) y Doorga et al. (2018).

Posteriormente se aplicó el método de AHP a los datos espaciales para generar la clasificación de los sitios para cumplir con el objetivo de producir electricidad vía el proceso fotovoltaico. Tanto a los resultados como a Sonora en su totalidad, se le aplicaron ecuaciones específicas (Obukhov *et al.*, 2017; Ropp *et al.*, 1997; Faiman, 2008; Huld y Gracia Amillo, 2015) usando algebra de mapas para estimar la electricidad que es posible generar usando panales solares.

Se encontró que 35.85% del territorio puede ser usado para generar esta energía y con solo 0.58% de este territorio, equivalente a 1081 km², se podría abastecer el consumo total de electricidad mexicano del año 2020 (Expansión, s.f.). De esa forma, la energía fotovoltaica en el país es un recurso fundamental y con alta factibilidad para lograr la transición energética.

Palabras clave: criterios de exclusión, criterios de selección, proceso analítico jerárquico, transición energética, consumo total de electricidad.

Abstract. There is international agreement that photovoltaic energy (PE) is a pillar of the energy transition required to mitigate the effects of global warming. The general objective of this article is to make a first geospatial approximation to estimate the proportion of territory and the amount of electricity feasible to be generated by the photovoltaic process in the state of Sonora.

In order to achieve this objective, it is first necessary to determine the most appropriate method for identifying these sites. In the literature, it has been found that the Analytical Hierarchical Process (AHP) is one of the most used methods for the selection of sites for the production of different types of solar energy, mainly photovoltaic (Suprova *et al.*, 2020; Malemnganbi and Shimray, 2020; Al Garni and Awasthi, 2017; Solangi *et al.*, 2019).

Where the mixture of GIS and AHP is one of the most appropriate submethods to identify these sites and apply specific conditions to them (Chandio *et al.*, 2012), in this particular case through the application of equations using map algebra to estimate the theoretical electricity production for the entire federal entity with the photovoltaic process. Since Geographic Information Systems (GIS)-AHP allow the spatialization of specific objectives.

Therefore, the first task is to spatialize the deterministic variables of the photovoltaic process, as well as the locations

where it is not possible to produce this energy. In this case, the meteorological variables were obtained thanks to the data of the CESAVE-SIAFESON weather stations (2020). Due to data availability and consistency issues, a total of 97 stations were used. The stations consist of a number of different climatological gauges. Since these data are geographically punctual, it was necessary to use spatial interpolation techniques to make them continuous.

The rest of the selection criteria are obtained from various sources of information. In the case of terrain elevations from the Mexican Continuum of Elevations of INEGI (n.d.), the slope and orientation of the terrain were estimated with the elevation data using the geodetic technique of its respective method in the Arcmap software. The roads were taken from the national road network obtained from INEGI (2020), the corresponding urban and rural areas from INEGI (2016), and the power lines from CENACE (2016). The proximity method used for these three variables was the path-distance method of the Arcmap software.

Exclusion criteria were power transmission lines (CENACE, 2016), World Heritage Sites (CONANP, 2021a), protected natural areas (CONANP, 2021), native vegetation and habitats (INEGI, 2017), water bodies (INEGI, 2009), urban and rural spots (INEGI, 2016), social property found in the Sonora cadastral map (INEGI, 2016a), road network (INEGI, 2020c), places with slopes greater than 10 degrees (INEGI, n. f.), and tourist, religious, airport, and other sites (INEGI, 2020c).

Thus, we had both the deterministic variables and the locations unsuitable for the installation of solar plants. To identify the relative importance of the deterministic variables, similar studies were used, such as Sánchez-Lozano et al. (2013), Chen et al. (2014), Noorollahi et al. (2016), Zoghi et al. (2017), Doljak y Stanojević (2017), Al Garni y Awasthi (2017) and Doorga et al. (2018).

In light of this, the AHP method was applied to the spatial data in order to generate the ranking of sites to achieve the goal of producing electricity through the photovoltaic process. A specific equation using map algebra (Obukhov *et al.*, 2017; Ropp *et al.*, 1997; Faiman, 2008; Huld y Gracia Amillo, 2015) was applied to both the results and the whole of Sonora to estimate the electricity that could be generated using solar panels.

It was found that 35.85% of the territory could be used to generate this energy, and that only 0.58% of this territory, corresponding to 1,081 km², could supply all of Mexico's electricity consumption in 2020 (Expansión, n.d.). Thus, photovoltaic energy in the country is a fundamental resource with high feasibility to achieve the energy transition.

Keywords: exclusion criteria, selection criteria, hierarchical analytical process, energy transition, total electricity consumption.

REVISIÓN DE LA LITERATURA ACTUAL

Existe una gran variedad de métodos usados para identificar sitios con mejores condiciones para la

generación de energía solar en distintos lugares del mundo. Por ejemplo, autores como Al Garni y Awasthi (2018), Suprova *et al.* (2020) y Malemnganbi y Shimray (2020), recopilan artículos

que tienen este objetivo para diferentes formas de aprovechamiento de la radiación solar. Los autores encuentran que el proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), solo o integrado a otro método, es la forma más utilizada de los métodos de análisis de decisión multicriterio (MADM).

Algunas de las ventajas del AHP, es que puede tratar con problemas complejos (Elkarmi y Mustafa, 1993), permite evaluar alternativas para cumplir con un objetivo definido (Ozdemir y Sahin, 2018), y es una metodología sencilla en su aplicación e interpretación, pero con fundamentos robustos (Khemiri *et al.*, 2018) que se sustentan en la experiencia de expertos para determinar la importancia relativa de los factores que afectan el objetivo (Vaidya y Kumar, 2006).

A su vez, el AHP se puede usar junto con distintos métodos para obtener resultados más confiables y robustos (Koc *et al.*, 2019), como es el caso de los sistemas de información geográfica (GIS por sus siglas en inglés), que complementan a los AHP al manejar y procesar los datos de entrada, así como visualizar los resultados (Taibi y Atmani, 2017). Los GIS-AHP son una herramienta eficiente para evaluar la factibilidad de las características de un lugar para cumplir con un objetivo específico, especialmente en el aspecto costo-eficiencia (Chandio *et al.*, 2012).

De esta forma, las aplicaciones de GIS-AHP para analizar y buscar cumplir con objetivos espaciales específicos ha aumentado (Al Garni y Awasthi, 2018; Chandio *et al.*, 2012), sin embargo, existen relativamente pocas investigaciones que usan un GIS-AHP para la selección de sitios con mejores condiciones para la generación de electricidad con base en el proceso fotovoltaico (Colak *et al.*, 2019).

Cabe mencionar que los diferentes autores mencionados previamente (Solangi *et al.*, 2019; Al Garni y Awasthi, 2017; Malemnganbi y Shimray, 2020; Suprova *et al.*, 2020; Al Garni y Awasthi, 2018), solo en unos pocos casos mencionan que se trata de un GIS en conjunto con el AHP (GIS-AHP) y ninguno de los que presentan los lugares geográficos, contemplan a Sonora o México para el cumplir con este objetivo.

Existen pocos estudios que abordan la estimación de electricidad usando EF. Huld y Gracia Ami-

llo (2015) estudian el papel de diferentes variables para la estimación de electricidad usando tecnología fotovoltaica en regiones geográficas grandes. Los autores encuentran que existe un fuerte efecto en la eficiencia de las celdas solares con relación a la radiación solar, temperatura y, en menor grado, la velocidad del viento en el sitio.

Por su parte, Ropp *et al.* (1997) plantean una ecuación para la estimación de la eficiencia solar con relación a la temperatura de las celdas solares durante su operación. Chung (2020) realiza estimaciones de electricidad complementando dicha ecuación con otra para estimar la temperatura de la celda y encuentra que la modelación se acerca a los valores reales tanto con radiación medida como estimada. Ayvazogluysel y Filik (2018) comparan el método anterior con otros, también complementado con ecuaciones para la estimación de la temperatura de la celda considerando tanto la temperatura ambiente como la velocidad del viento, y encuentran poca diferencia entre los diversos instrumentos empleados.

En cuanto a la literatura de las plantas fotovoltaicas en Sonora, la revisión arrojó que existe una importante carencia en el desarrollo de este tema, sin embargo, se lograron identificar algunas referencias. Una es Engie (2018), donde se menciona que la radiación promedio del sitio y la cercanía a la red eléctrica nacional son factores relevantes para la selección del sitio. De forma similar, los informes de dos plantas fotovoltaicas para obtener financiamiento del Banco de Desarrollo de América del Norte –BDAN– (BDAN, 2017, 2017a), hacen alusión a la importancia de la alta radiación incidente en el sitio como factor de selección.

INTRODUCCIÓN

La transición energética consiste en transitar al uso de energías renovables para disminuir la participación de las energías tradicionales. A diferencia de las primeras, las energías tradicionales son fuentes finitas con mayor grado de daño al medio ambiente y la humanidad por la aceleración que producen en la generación de gases de efecto invernadero, incrementando con ello el calentamiento global

del planeta (Barasa y Olanrewaju, 2022; Kyriakopoulos *et al.*, 2022; IPCC, 2021).

En este escenario, las renovables son el recurso necesario para sustentar una civilización con crecientes necesidades energéticas, que también requiere mantener un equilibrio con el mundo en el que vive (IRENA, 2018; IPCC, 2012). Según IRENA (2019), la energía fotovoltaica será la fuente renovable más relevante en las próximas décadas, si se quiere llegar a un escenario positivo en cuanto a la mitigación del cambio climático. En su caso, México tiene una locación geográfica privilegiada en términos de esta energía, ya que cuenta con algunas de las zonas con mayor radiación solar en el mundo, en promedio cada día recibe 5.5 kWh/m², llegando a 6.12 kWh/m² en el verano (ProMéxico, 2017; Limón, 2017; IRENA, 2015; GIZ, 2018).

Aunque no se ha probado, se estima que el país tiene la posibilidad de producir hasta 6 500 000 GWh al año (INERE en GIZ, 2018). Para ponerlo en perspectiva, en el año 2020 el país consumió 267,340 GWh de electricidad (*Expansión*, s.f.), por lo que la capacidad de generación de electricidad fotovoltaica mexicana es más de 24 veces su consumo total eléctrico. Sin embargo, la electricidad producida con el proceso fotovoltaico sigue siendo marginal en el país, debido su poca explotación comercial a gran escala (ProMéxico, 2017; IRENA, 2015). En 2016 el uso de radiación solar para generar electricidad representó solo el 0.5% del total energético producido en nuestro país (ProMéxico, s.f.).

Cabe mencionar en especial que Sonora y Baja California Sur tienen una radiación solar incidente promedio de 6.2 kWh/m² diarios (González García, 2019). Tan solo en Sonora se estima que el 0.29% de su territorio es suficiente para abastecer toda la demanda eléctrica que existía en el país en 2017 (González García, 2019). Aunque este cálculo se hizo sin considerar características espaciales, que afectan la eficiencia de las celdas, por lo que los cálculos pueden tener sobreestimaciones (González García, 2019).

Esta investigación analiza el potencial de energía fotovoltaica en Sonora, México, por varias razones. La primera de ellas es que, de acuerdo con diversos autores, Sonora tiene uno de los potenciales

fotovoltaicos más elevados del mundo (Taddei *et al.*, 2014; Universidad de Sonora, s.f.; Arancibia-Bulnes *et al.*, 2014), lo que representa un área de oportunidad para México, si se desarrolla energía que aproveche la radiación solar. Otra de los motivos es que han existido una serie de proyectos públicos que buscaban, junto con la iniciativa privada, poner a esta entidad federativa en la frontera de la generación de esta energía en el país, lo cual habla del interés de diversos actores para desarrollarla (Comité de Energía de la Comisión Sonora-Arizona, 2017; COEES, 2018; CENACE, 2016). Por último, no existen datos meteorológicos libres a nivel nacional, pero gracias a las Redes Meteorológicas Automáticas de Sonora, las cuales son parte del Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Sonora-Sistema de Alerta Fitosanitaria del Estado de Sonora (CESAVE-SIAFESON, 2020), se tienen datos meteorológicos que permiten identificar las zonas con mejores condiciones para la generación de energía fotovoltaica.

El objetivo general de esta investigación es evaluar la cantidad de energía fotovoltaica potencial que se puede generar en Sonora. Por su parte, los objetivos específicos son:

- Identificar las zonas con mejores condiciones para la generación de EF, con base en variables geoespaciales que determinan la capacidad de producción de esta energía.
- Estimar la cantidad de electricidad que se puede producir en estas zonas.

La metodología propuesta para identificar los sitios con mejores condiciones para la producción de electricidad vía el proceso fotovoltaico propone primero aplicar el GIS-AHP, que contempla lugares donde no es posible instalar plantas fotovoltaicas y las variables espaciales que afectan la generación de esta energía. Posteriormente, se aplican ecuaciones simples que usan la radiación solar incidente y otras variables que afectan la tecnología fotovoltaica para estimar qué tanta electricidad fotovoltaica se puede producir en estos sitios.

En general, los resultados del trabajo son que 35.85% del espacio en Sonora es apto para producir electricidad vía el proceso fotovoltaico. Y sería

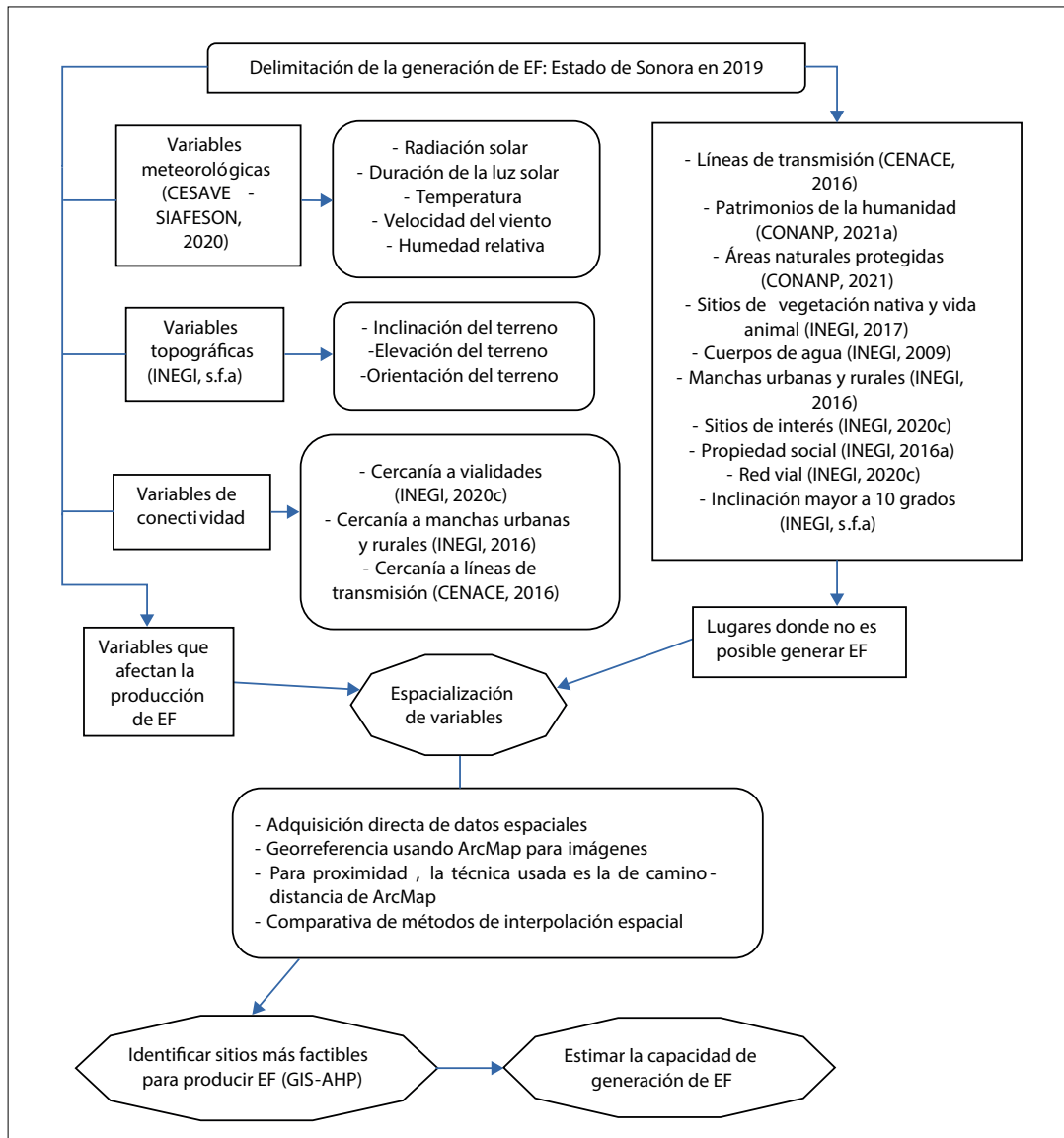
suficiente el 0.58% de este territorio, equivalente a 1081 km², para satisfacer el consumo total de electricidad mexicano del año 2020 (Expansión, s.f.).

que se emplearon en este trabajo, las fuentes de donde se obtuvieron los datos, los principales procedimientos analíticos seguidos, así como las delimitaciones espaciales del estudio.

En una primera instancia cabe mencionar que los datos meteorológicos, como radiación solar, duración de la luz solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, se obtienen gracias a las Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas

METODOLOGÍA

La Figura 1 resume el diseño metodológico de la investigación, mostrando las diferentes variables



Nota: los cuadrados significan insumos, los cuadrados sin esquinas son explicaciones para mayor detalle y los decágonos son resultados.

Figura 1. Mapa de insumos-procesos-resultados de la metodología de investigación. Fuente: elaboración propia.

de Sonora (REMAS), que son parte del CESAVE-SIAFESON (2020). Estos datos corresponden al periodo del 1° de enero al 31 de diciembre de 2019. Se cuenta con 97 puntos de medición, de los cuales se emplearon el 80%, equivalente a 78 estaciones, para aplicar los métodos de interpolación espacial y 20% para probar qué tan buena es la estimación.

Los métodos de interpolación espacial usados son la distancia inversa ponderada (IDW, por sus siglas en inglés), el kriging ordinario, el kriging simple, la regresión kriging y un método propuesto en esta investigación, denominado Regresión basado en Distancia Inversa Ponderada (IDW), que es un método propuesto en este trabajo, en el cual se aplica una regresión con una variable espacial explicativa aplicándose con álgebra de mapas. Paso siguiente, se emplea el método IDW sobre el error de la regresión en su forma de datos espaciales y, por último, se suma la parte determinística de la regresión con el error estimado.

Las métricas de error que se usan para comparar la precisión de la estimación de los métodos de interpolación espacial son:

- El error cuadrático promedio (ECP):

$$ECP = \frac{1}{N} \sum_n^N (y_n - f_n)^2$$

- El error absoluto promedio (EAP):

$$EAP = \frac{1}{N} \sum_n^N y_n - f_n$$

- Y la bondad de ajuste (R^2) tomada de la regresión sin constante relacionando con la radiación solar observada y la estimada por la interpolación espacial. No se utilizó constante debido a que se encontró que solo así había correlación entre las variables.

En las ecuaciones anteriores N es el total de observaciones, y_n es el registro real de radiación solar en la estación de prueba y f_n es el valor de la interpolación espacial en el mismo lugar.

El resto de los criterios de selección se obtienen de diferentes fuentes de información. En el caso de

la elevación del terreno del Continuo de Elevaciones Mexicano de INEGI (s.f.), la inclinación y la orientación del terreno se estimaron con los datos de elevación con la técnica geodésica de su método respectivo en el software Arcmap. Las vialidades se tomaron de la Red Nacional de Caminos obtenida de INEGI (2020), las manchas urbanas y rurales respectivas de INEGI (2016) y las líneas de transmisión eléctrica de CENACE (2016). El método de proximidad empleado para estas tres variables fue el de camino-distancia del software Arcmap.

DATOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los datos meteorológicos se obtienen gracias a CESAVE-SIAFESON (2020). SIAFESON es un proyecto que tiene como objetivo proporcionarles a los productores agrícolas las herramientas para estar preparados contra posibles eventualidades que tengan una causa meteorológica, como heladas, plagas, entre otros (SIAFESON, s.f.).

En el pasado, Sonora contaba con la red Agrosón, que era la fuente de datos meteorológicos más importante de la entidad, no obstante, un diagnóstico efectuado en 2011 reveló que se encontraba en condiciones inadecuadas para garantizar su funcionamiento, por lo que SAGARHPA encargó su cuidado y mantenimiento al CESAVE, que contaba con personal e infraestructura para mantener la red a partir de octubre de 2014, renombrada REMAS, y a la cual se le han agregado estaciones con el paso del tiempo (CESAVE-SIAFESON, s.f.a).

De esta forma, la REMAS tiene el propósito de generar, procesar, almacenar e informar sobre datos meteorológicos (CESAVE-SIAFESON, 2020). Para ello se cuenta con más de 100 estaciones meteorológicas repartidas a lo largo de la entidad (CESAVE-SIAFESON, 2020).

Cada estación meteorológica consiste en un sensor de viento, un sensor de radiación solar (LP02), un panel solar para dar energía a la estación, una unidad de transmisión remota, un sensor de temperatura y humedad (TR1), un barómetro (BP1), un pluviómetro y un sensor de suelo (CESAVE-SIAFESON, 2017). Más detalles de la estación se pueden apreciar en la Figura 2.

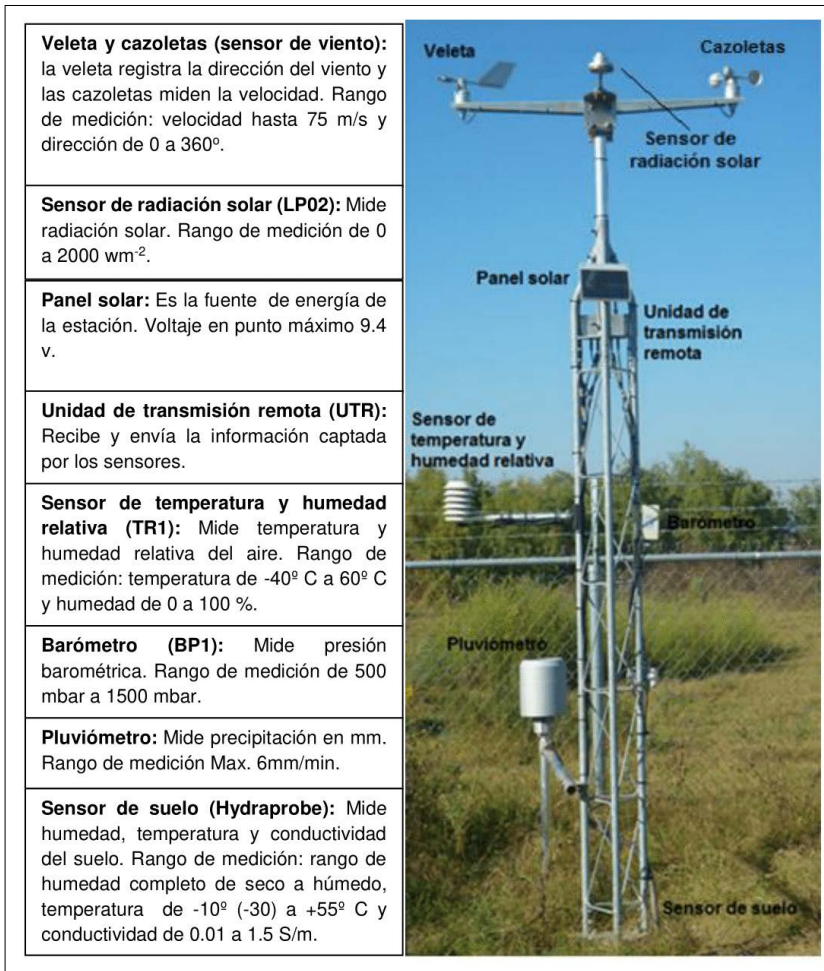


Figura 2. Estación meteorológica de REMAS. Fuente: CESAVE-SIAFESON (2017: 3).

El sensor LP02 es de clase C (segunda clase), espectralmente plano, que se alinea al ISO 9060:2018 y monitorea el espectro solar completo (Campbell Scientific, s.f). Cuenta con una termopila que permite su uso en condiciones desfavorables, como días nublados, con rayos reflejados, bajo sombra, entre otros (Campbell Scientific, s.f).

En CESAVE-SIAFESON (s.f.) se presentan diversos documentos para la correcta limpieza de los elementos que conforman la estación meteorológica, cambio de baterías, conexiones de la unidad de transmisión remota (necesaria para enviar la información captada), entre otros. De acuerdo con CESAVE-SIAFESON (s.f.a), las estaciones se visitan cada 15 días, para revisar su condición, así como realizar procedimientos de limpieza y mantenimiento.

El cambio de los sensores se realiza cada cuatro años, siguiendo especificaciones del productor.

Sobre los datos de CESAVE-SIAFESON (2020), el comportamiento de la radiación solar es diferente a la mayoría de los demás fenómenos meteorológicos, ya que solo se tienen valores las horas del día con sol visible, es decir, la radiación solar es prácticamente nula durante la noche. Se probaron distintos valores mínimos de radiación solar para observar el comportamiento de la radiación solar, horas de luz solar y la generación vatios/ m^2 y vatios-hora/ m^2 . Los resultados se presentan en la Tabla 1. Las 97 estaciones empleadas para este trabajo, separadas en estaciones para realizar interpolación espacial y para probar métodos, se observan en la Figura 3.

Tabla 1. Radiación solar, horas de luz y generación de electricidad en las estaciones meteorológicas con diferentes valores límites de radiación solar medida.

	1 watt	15 watt	50 watt	100 watt	200 watt	300 watt	400 watt	500 watt	600 watt	700 watt
Radiación solar (vatios/m ²)	434.75	470.79	501.02	531.97	584.42	631.64	680.78	725.20	776.92	836.24
Horas de luz (horas)	12.73	11.70	10.88	10.09	8.84	7.76	6.66	5.64	4.46	3.31
Generación (Vatios/m ²)	60.58	65.21	69.04	72.94	79.44	85.19	91.08	96.27	102.19	108.57
Generación por día (Vatios-hora/m ²)	772.55	764.20	752.58	737.56	703.86	663.62	609.16	545.82	458.62	361.85

Fuente: elaboración propia con base en datos de CESAVE-SIAFESON (2020).

Una primera aclaración es que las horas de luz solar no son una variable medida por las estaciones de CESAVE-SIAFESON (2020), pero es posible inferir la variable al contar las horas en las que se tiene una radiación solar mayor a un cierto límite para cada estación.

De la Tabla 1 se aprecia que, conforme aumenta el valor límite de radiación solar, mayor es la radiación solar promedio diaria, así como la generación de electricidad vía el proceso fotovoltaico en vatios/m², sin embargo, las horas luz y la generación por día en vatios-hora/m² disminuye. Lo anterior tiene lugar debido a que, conforme mayor es el límite, mayor es el promedio de radiación solar, pero disminuyen las horas diarias de luz a esos valores.

Para esta investigación se eligió el valor límite de 100 vatios, debido a que ofrece un valor más representativo de la radiación solar promedio al día con respecto al valor promedio de radiación solar por hora, considerando que existen horas de radiación solar muy bajas, las primeras y últimas del día, así como horas con promedios de radiación solar muy altas en el mediodía. Por ello, se estableció un límite de radiación solar mínima para el cálculo del promedio, con el fin de eliminar las horas del día con niveles muy bajos de radiación solar.

Un ejemplo de estos problemas es que había estaciones con datos cercanos a 0 en horas con poco o nula luz solar, que, de incluirlo en los datos, haría que la estación tuviera horas de sol al día mayores a las que realmente tiene, por lo que la generación por día podría ser considerablemente más alta de la real.

Los promedios diarios de la temperatura, velocidad del viento y humedad relativa también corresponden solo a las horas en las cuales se tiene radiación solar mayor a 100 vatios. De forma que estas variables serán más representativas de la parte del día en las que estaría funcionando la tecnología fotovoltaica.

Para analizar la consistencia de los datos, primero se analizó el número de observaciones de cada estación. Solo cuatro estaciones obtuvieron menos de 3500 observaciones por hora, dos cerca de 3000 y dos de 3400, que se mantuvieron debido a que se encuentran en zonas con pocas estaciones y que el promedio de sus variables era similar al de las demás.

Criterios de exclusión

En la Figura 4 se presenta tanto el polígono que representa a Sonora como los lugares donde sería posible poner plantas fotovoltaicas, es decir, se quitan los sitios de exclusión del polígono del estado. El resultado es que, alrededor de

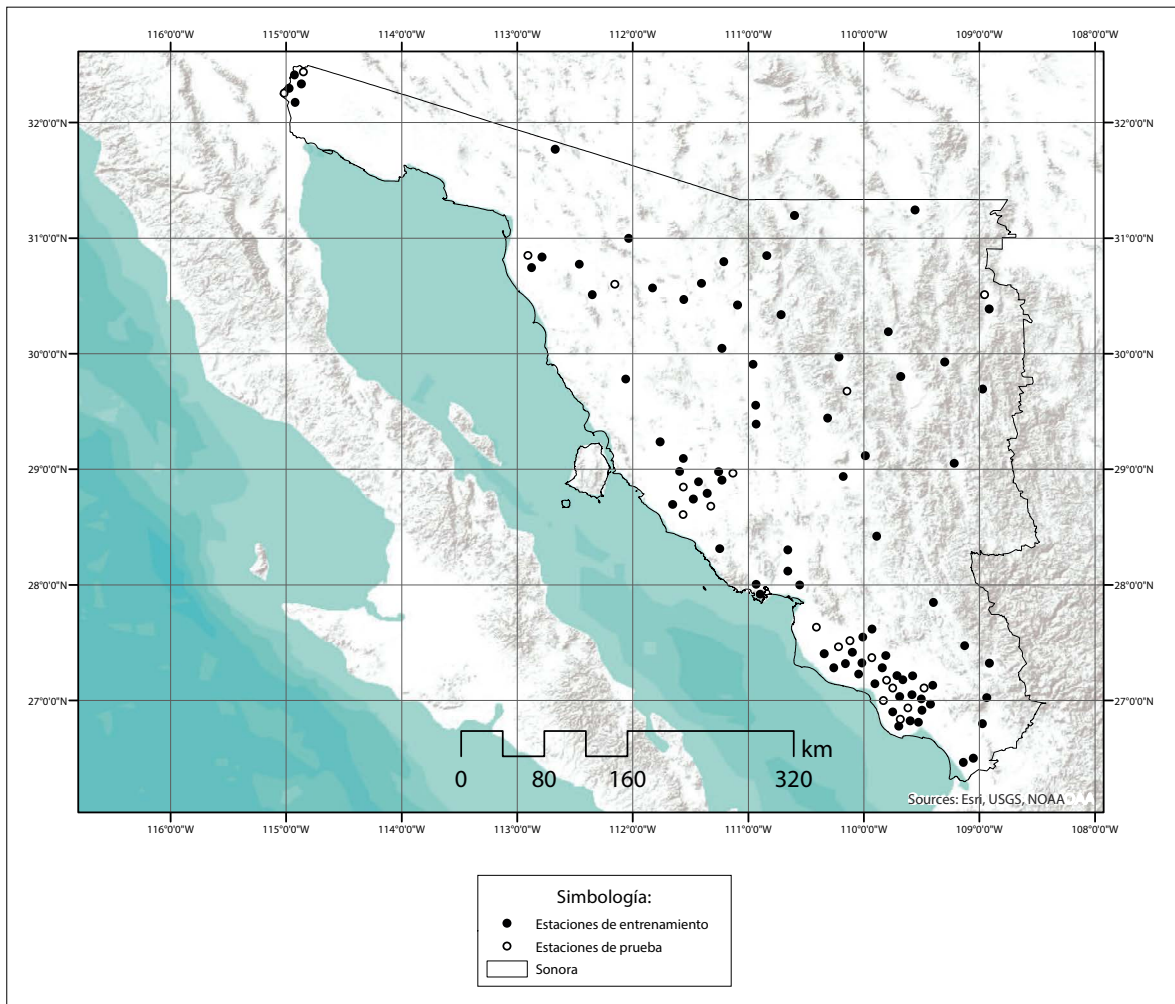


Figura 3. Estación meteorológica de REMAS. Fuente: elaboración propia con base en datos de CESAVE-SIAFESON (2020).

115 998 282 598.79 m² no son adecuados para instalar plantas solares. En total, Sonora cuenta con 180 840 617,117 m² y 35.85% del territorio esta fuera de los criterios de exclusión.

Los criterios de exclusión son las líneas de transmisión (CENACE, 2016), los patrimonios de la humanidad (CONANP, 2021a), las áreas naturales protegidas (CONANP, 2021), los sitios de vegetación nativa y vida (INEGI, 2017), los cuerpos de agua (INEGI, 2009), las manchas urbanas y rurales (INEGI, 2016), la propiedad social que se encuentra en la carta catastral de Sonora (INEGI, 2016a), La red vial (INEGI, 2020c), lugares con

una inclinación mayor a 10 grados (INEGI, s.f.), y los sitios turísticos, religiosos, aeropuertos y otros (INEGI, 2020c).

Identificación de los sitios óptimos

La estimación de la cantidad de electricidad generada a través del proceso fotovoltaico se realizó en dos etapas. Primero se identificaron las zonas óptimas para la instalación de plantas/celdas solares y, en una segunda fase, se estimó de la cantidad de electricidad potencialmente puede ser producida con celdas fotovoltaicas. Para la identificación de las zonas óptimas de instalación de plantas/celdas

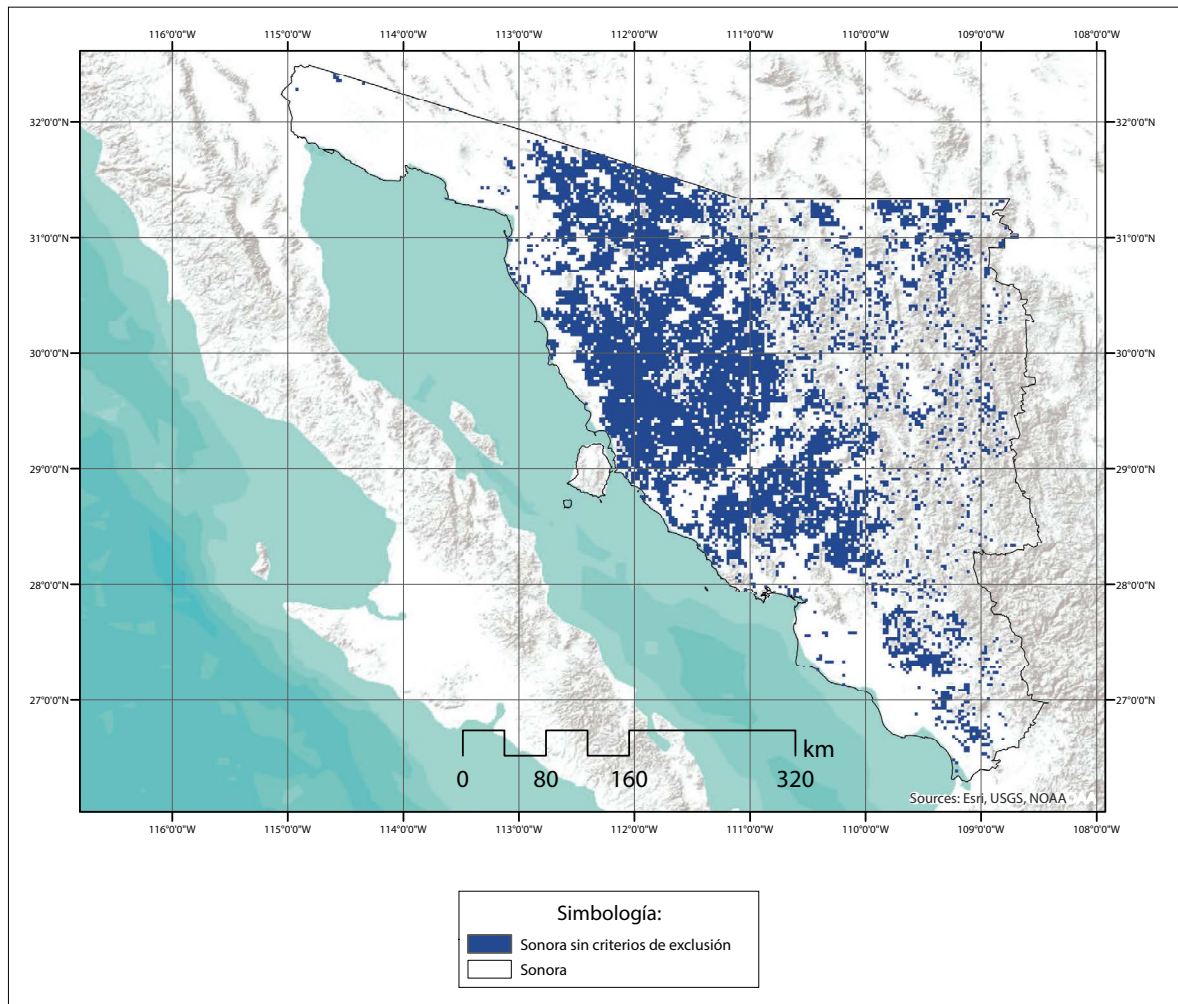


Figura 4. Sonora sin sitios de exclusión. Fuente: elaboración propia con datos de CONANP (2021, 2021a), CENACE (2016) e INEGI (2009, 2016, 2016a, 2017, 2020, s.f.).

solares, se determinaron los criterios de selección de factores que influyen en el funcionamiento de la tecnología fotovoltaica. Estos dependen principalmente de tres categorías de análisis: climatología, topografía y proximidad (Doorga *et al.*, 2018).

Una vez seleccionados los criterios, se llevó a cabo el Proceso Analítico Jerárquico para la ponderación de los factores geolocalizados que afectan la generación de energía fotovoltaica, después de excluir los lugares donde no es posible instalar esta tecnología (Alami *et al.*, 2018; Doorga *et al.*, 2018).

El funcionamiento del AHP-GIS se sustenta en la estimación de ponderaciones prioritarias de una serie de criterios en una matriz cuadrada de comparación de pares múltiples; dicha matriz es positiva y, si los pares de comparación son totalmente consistentes, es recíproca (Amini y Amin, 2016). Los elementos de decisión se comparan en pares en términos de su importancia relativa, que se determina en una escala de nueve puntos, llamada “Escala Fundamental de Saaty” (Bottero *et al.*, 2011). La definición e implicación de la escala de intensidad de nueve puntos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Definición e implicación de la escala de intensidad de nueve puntos.

Intensidad del peso relativo	Definición	Implicación
1	De igual importancia	Dos criterios contribuyen igualmente a los objetivos
3	Moderada importancia	Un criterio contribuye ligeramente más que otro
5	Importancia fuerte	Un criterio contribuye significativamente más que otro
7	Importancia muy fuerte	Un criterio contribuye muy significativamente más que otro
9	Importancia extrema	Un criterio contribuye extremadamente más que otro
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Se emplean para representar compromiso entre las prioridades enlistadas arriba

Nota: propiedad de reciprocidad, si un criterio *i* tiene asignado un número no cero en comparación con *j*, entonces *j* tiene un valor recíproco al compararse con *i* (Doorga *et al.*, 2018; Amini y Amin, 2016).

Fuente: elaboración propia con base en Doorga *et al.* (2018).

Una vez que se dieron valores a las matrices de comparación, los pesos relativos de los elementos de cada criterio de selección con respecto a un elemento adyacente del próximo criterio se designan como componentes del eigenvector asociado al eigenvalor más grande de la matriz de comparación (Bottero *et al.*, 2011). Las inconsistencias salientes del método de eigenvector se determinan por el Índice de Consistencia (CI, por sus siglas en inglés) como (Doorga *et al.*, 2018):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Donde λ_{max} es el máximo eigenvalor y *n* es el número de columnas o renglones en la matriz de selección o ponderación. Además, del método de eigenvector se desprende una medida natural de consistencia, denominada Ratio de Consistencia (CR por sus siglas en inglés) y se expresa como (Bottero *et al.*, 2011):

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

RI es el Índice Aleatorio (RI, por sus siglas en inglés) del índice de consistencia, en escala de nueve puntos, generado aleatoriamente por una matriz recíproca (Amini y Amin, 2016), es decir, se generan matrices aleatorias con los números $\frac{1}{9}, \frac{1}{8}, \dots, 1, \dots, 8, 9$, y se obtiene el índice de la matriz (Tek-

nomo, 2006). Por lo general, el proceso se repite al menos 500 veces para obtener un RI confiable (Teknomo, 2006).

Según Amini y Amin (2016), el CR donde RI es función del tamaño de la matriz y CR es menor a 0.1 o 10% es el límite aceptable, en caso de no cumplirse se debe revisar y ajustar la metodología.

Una vez aplicado el proceso analítico, se obtienen los valores de ponderación de los criterios de selección, los cuales representan la importancia relativa de esos criterios.

Cabe mencionar que, dentro de esta metodología, se considera que los expertos o tomadores de decisiones lleven a cabo la asignación de los pesos relativos con base en el contexto del lugar y fenómeno de estudio, porque en realidad no existe un protocolo general para aplicar estas herramientas (Doorga *et al.*, 2018).

Por último, para la identificación de sitios más factibles para producir EF, se emplea el método de Ponderación de Combinaciones lineales (WLC, por sus siglas en inglés), que se usa para combinar las capas ráster resultantes del proceso de jerarquización y reclasificación de los criterios de evaluación usando el entorno GIS (Doorga *et al.*, 2018).

La superposición ponderada es un análisis combinatorio relativamente simple en el que se asignan pesos a los factores causales en su relación con el objeto de estudio (Pardeshi *et al.*, 2013). Para determinar la significancia estadística y el valor

numérico del peso relativo de los aspectos causales se usa la función de discriminación bi-variada, que tiene la siguiente forma (Nagarajan *et al.*, 2000; Doorga *et al.*, 2018; Malczewski, 2000):

$$SA_i = w_1X_{i1} + w_2X_{i2} + w_3X_{i3} + \dots + w_nX$$

Lo cual se puede expresar como:

$$SA_i = \sum_{j=1}^n w_jX_{ij}$$

Donde SA_i es el indicador de idoneidad para el i -ésima área, es decir, el indicador resultado de sumar los criterios de selección (en este caso, las variables espaciales interpoladas) multiplicados por su peso relativo; w_j es el peso relativo de criterio j ; X_{ij} es el valor estandarizado del criterio de selección j en el área i , y n es el número total de criterios de evaluación (Malczewski en Doorga *et al.*, 2018; Malczewski, 2000).

Generación de energía eléctrica en los sitios óptimos

La cantidad de energía eléctrica por hora generada por m^2 en condiciones de sitio es principalmente estimada con una ecuación basada en Obukhov *et al.* (2017), multiplicada por el número de horas luz, que es:

$$W = S * n_1 * n_2 * H_{luz}$$

Donde W es la cantidad de energía eléctrica estimada (Wh/m^2), S es la intensidad promedio de radiación solar por unidad de área (W/m^2), n_1 es la eficiencia de las celdas (cantidad de luz solar que se convierte en electricidad sobre el total de luz solar incidente), H_{luz} es el número de horas de luz solar que se tienen en promedio al día y n_2 es la eficiencia de la conversión de energía (cantidad de electricidad que se transmite a la red eléctrica sobre el total de electricidad generado), que en se toma de 96% con referencia en Chung (2020). Esta ecuación tiene el supuesto de que hay celdas solares en toda área usable.

Para mejores estimaciones, se usa la ecuación de la eficiencia de las celdas solares de Ropp *et al.*

(1997), también usada en investigaciones como Chung (2020) y Omran (2010), que tiene la forma siguiente:

$$n_1 = n_{stc} * (1 + K_T * (T_c - T_{STC}))$$

La eficiencia máxima de la celda a temperatura de prueba en condiciones estándares (n_{stc}) se toma como 15.34%, siguiendo a Chung (2020), el coeficiente termal de la celda solar (K_T) es de $-0.0037^\circ C^{-1}$ (Ropp *et al.* 1997, Omran, 2010), T_c es la temperatura de la celda solar y T_{STC} es la temperatura de prueba en condiciones estándar de la celda, que generalmente es de $25^\circ C$ (Ropp *et al.*, 1997; Chung, 2020; Omran, 2010).

La ecuación de Faiman (2008) se usa para predecir la temperatura de la celda, que es:

$$T_c = T_{amb} + \frac{S}{U_o + U_1 * W_c}$$

Donde T_{amb} es la temperatura ambiente, W_c es la velocidad del viento en la celda, U_o y U_1 son constantes de la ecuación. Aquí U_o se tomó de 25 y de 6.84 (PVPMC, 2018; pvlb Python. s.f.). La estimación de la velocidad del viento en la celda está dada como (Huld y Gracia Amillo, 2015):

$$W_c = \left(\frac{d_c}{d_{ane}}\right)^{0.2} * W_{ane}$$

Con d_c es la altura de la celda solar, W_{ane} y d_{ane} son la velocidad del viento y la altura del anemómetro. Para la altura de la celda se emplearon los valores de 0.2 y 0.5 m (PurePoint Energy, 2020). La altura de la medición de la velocidad del viento es de 3 m de acuerdo con CESAVE-SIAFESON (2020).

RESULTADOS

Antes de comenzar con la matriz de pesos relativos de los criterios de selección, fue necesario hacer una reclasificación de los valores de estas variables. Esta reclasificación es necesaria para aplicar el proceso de estandarización que permite sobreponer y comparar las capas en las que se representan los criterios

de selección. A su vez, la estandarización permite asignar la intensidad del peso relativo de cada variable de acuerdo con su relación con el proceso fotovoltaico (Doorga *et al.*, 2018). En este caso se siguió a Doorga *et al.* (2018) y se clasificaron las variables en un rango de 1 a 9. Esta reclasificación va progresivamente de menor a mayor idoneidad. Los rangos de clasificación se obtuvieron usando nueve clases de rupturas naturales (Jenks) en Arcmap, debido a que lo emplean estudios similares, como Wong *et al.* (2016), Magar *et al.* (2023) y Beriro *et al.* (2022), así como porque es mejor en un rango de 7-10 clases (1967).

En la Figura 5 se muestran los mapas de los diferentes criterios de selección, con excepción de la inclinación del terreno, que por sus características solo puede mapearse en los sitios con valores menores a los 10 grados. Cabe recordar que el análisis de la información vertida en los mapas se refiere a los sitios donde es posible establecer plantas fotovoltaicas.

En la Tabla 3, la columna sitios presenta los pesos relativos de los criterios de selección después de usar la escala de Saaty. Por su parte, la columna que se llama sitios con velocidad del viento agrupa a todos estos criterios, pero se agrega la velocidad del viento, como criterio de selección de los sitios más factibles.

En ambos casos, el ratio de consistencia fue muy cercano a 0, por lo que se considera dentro del límite aceptable en términos de consistencia y se pueden usar estos pesos relativos para identificar los sitios con características más factibles para producir electricidad vía el proceso fotovoltaico.

En la Figura 6 se ven los resultados de aplicar el AHP usando los criterios de ponderación. Una primera apreciación es que los valores y rangos de los dos casos son bastante similares, aunque existen pequeñas diferencias en términos de los sitios que se adjudican a cada intervalo. La idoneidad va de menor valor (idoneidad más baja) a mayor valor (idoneidad más alta).

Un ejemplo es en el oeste de Sonora, donde algunos sitios que estarían en el cuarto intervalo de idoneidad de no considerarse la velocidad del viento pasan a estar en el quinto lugar. Esto se puede apreciar principalmente en el norcentro y

centro de Sonora, que corresponde a sitios con un bajo promedio de la velocidad del viento. En el primer caso aumenta el intervalo menor y en el segundo disminuye el mayor.

De esta forma, es posible inferir que la inclusión de la velocidad del viento como criterio de selección de sitios con mejores condiciones para generar energía fotovoltaica, principalmente afecta los lugares donde esta variable tiene valores bajos.

Los resultados de la generación de electricidad por m^2 se presentan en la Figura 7, tanto para el total de la superficie de la entidad federativa. Teniendo en las zonas de exclusión, una diferencia notable es el área que cubren los mapas, en el caso de Sonora en su totalidad se cuenta con 27 107 pixeles, cada pixel mide alrededor de 6771.07 km^2 , por lo que el área cubierta sería alrededor de $183\,543 \text{ km}^2$ en el espacio del mapa. Por su parte, los sitios no excluidos cuentan con 5325 pixeles, lo que corresponden a $36\,055 \text{ km}^2$. Los sitios, entonces, representan 19.64% del total de la superficie de Sonora.

Otra distinción importante es el intervalo de la capacidad de generación entre los mapas, mientras el intervalo del total de la superficie del estado va de alrededor de 580 a poco más de 832 vatios-hora/ m^2 por hora, los sitios con mayor idoneidad están entre 597 y 821 vatios-hora/ m^2 por hora. Estos valores son coherentes con la eficiencia promedio de los paneles solares según diferentes fuentes, como Lane (2021), Howell (2021), Stenhouse (2021) y Svarc (2022).

También es posible estimar la cantidad de Vatios por hora que se pueden generar en todo el territorio al multiplicar la generación de electricidad promedio diaria por m^2 por el área de la celda. De esta forma, en los sitios con mayor idoneidad se puede generar un total de 260 860 GWH en promedio por día (suponiendo que toda el área tiene celdas solares). En 2020 México consumió 267 340 GWh (Expansión, s.f.), por lo que, de instalarse plantas solares en todos los sitios, tomaría alrededor de 11 días para cubrir el consumo anual de electricidad mexicano o, usando alrededor del 3% de los sitios o 0.58% de Sonora, equivalente a 1081 km^2 , para abastecer el consumo eléctrico total del país en un año.

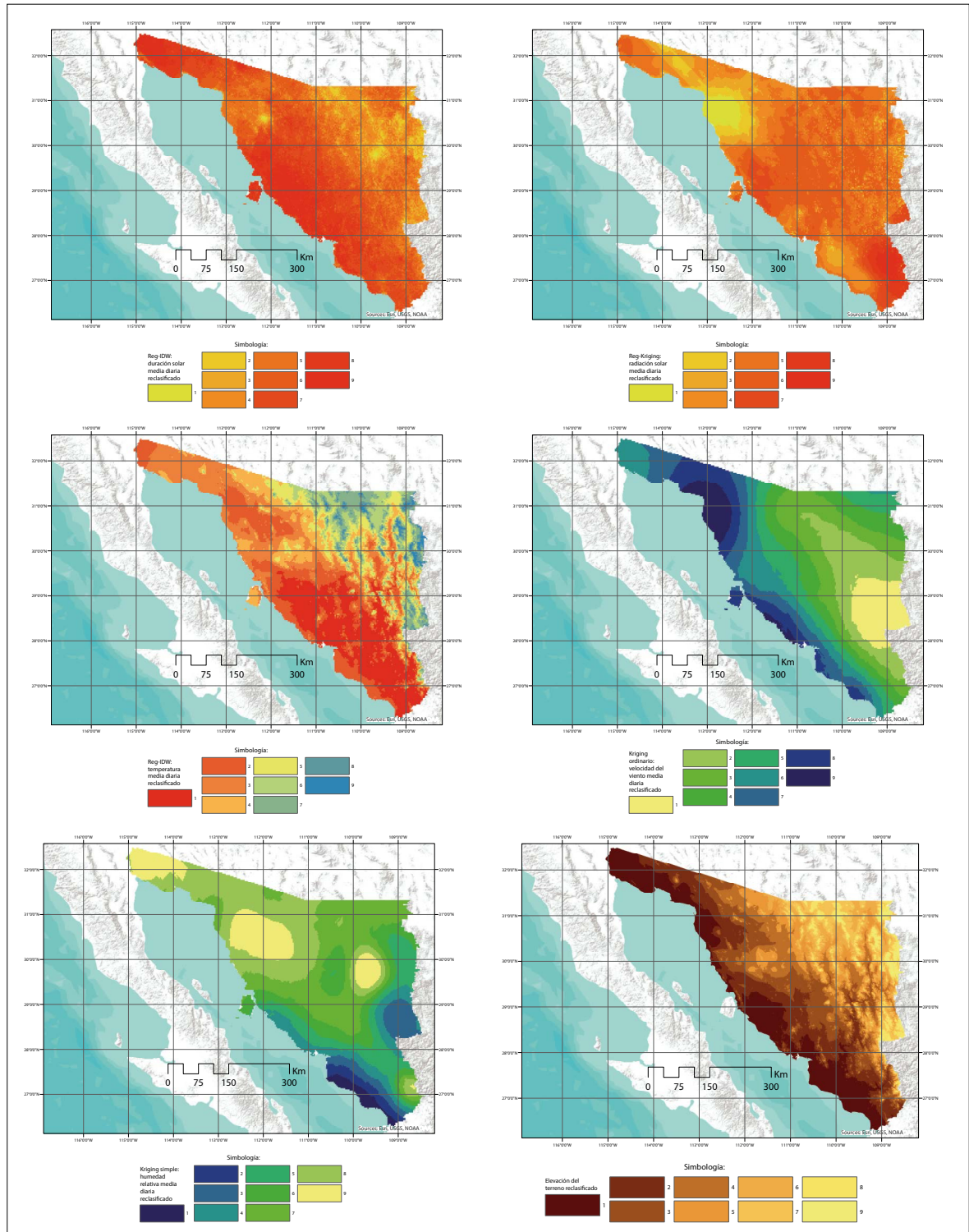


Figura 5. Criterios de selección reclasificados (parte 1). Fuente: elaboración propia con datos de CESAVE-SIAFESON (2020), CENACE (2016), INEGI (2016, 2020 y s.f.), The European Space Agency (s.f.), Solargis (2017) y USGS (s.f.)

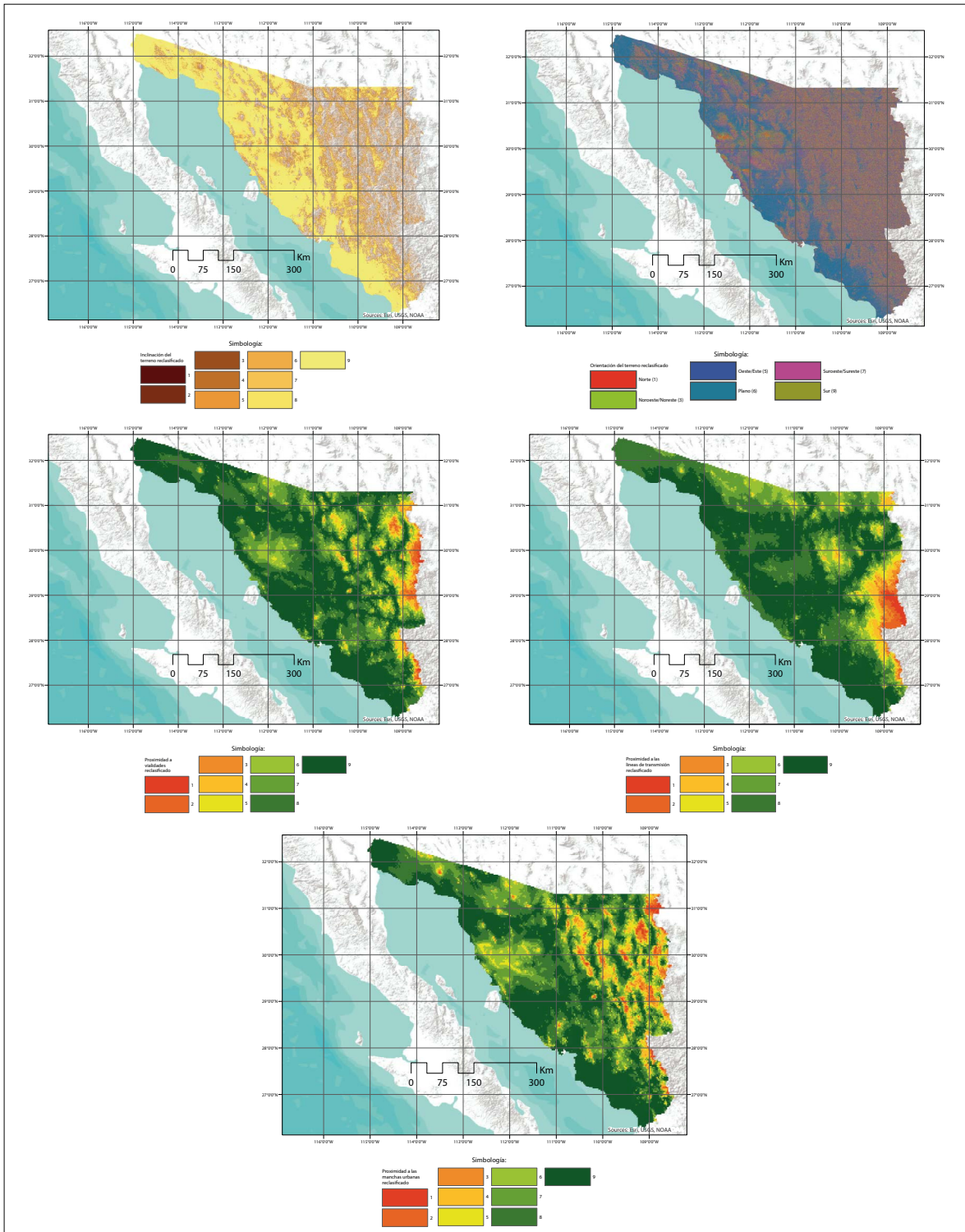


Figura 5. Criterios de selección reclasificados (parte 2). Fuente: elaboración propia con datos de CESAVE-SIAFESON (2020), CENACE (2016), INEGI (2016, 2020 y s.f.), The European Space Agency (s.f.), Solargis (2017) y USGS (s.f.).

Tabla 3. Pesos atribuidos a los criterios de selección.

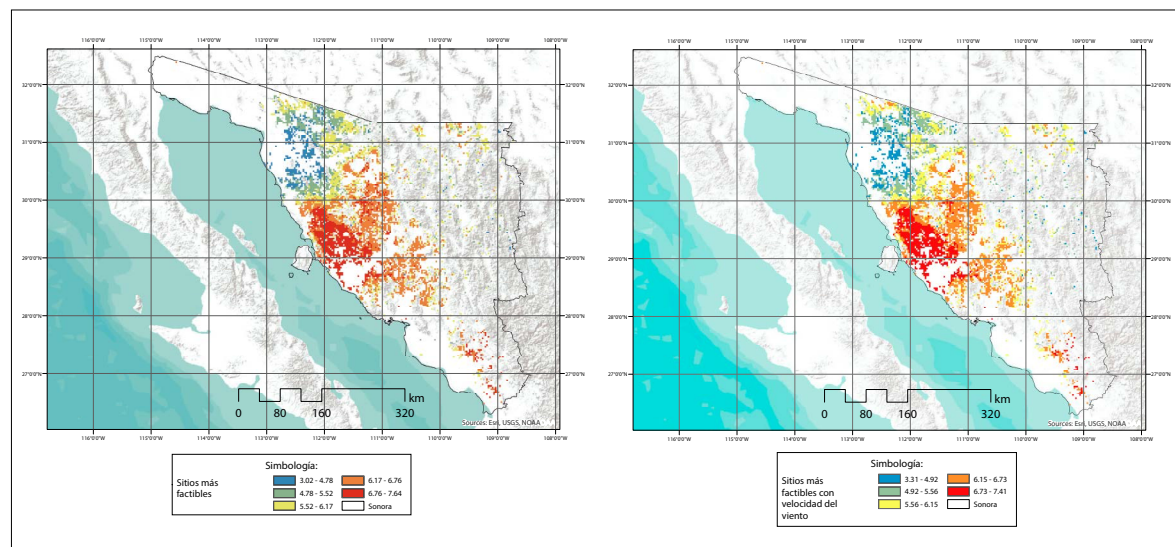
Criterio de evaluación	Sitios	Sitios con velocidad del viento
Radiación solar (W/m ²)	0.40077	0.37523
Duración de luz solar (horas)	0.19259	0.18572
Temperatura ambiente (°C)	0.06976	0.0664
Velocidad del viento (km/hr)	N.A.	0.05911
Humedad relativa (%)	0.01378	0.01247
Elevación del terreno (m)	0.02363	0.02093
Inclinación del terreno (%)	0.09687	0.09419
Orientación de la inclinación (%)	0.04017	0.03464
Proximidad a red eléctrica	0.11144	0.10703
Proximidad a vialidades	0.03455	0.02958
Proximidad a zonas urbanas	0.01645	0.0147

DISCUSIÓN

Esta investigación tiene la novedad de aplicar procesos y metodologías establecidos en el área geográfica de Sonora, donde no existen estudios similares y, por ende, sectores públicos, académicos y privados tendrían la posibilidad de aprovechar información nueva para tomar decisiones referentes a esta energía.

Si bien no existen estudios públicos específicos para la identificación de sitios con mejores condiciones para la localización de plantas fotovoltaicas, Sonora cuenta con diez parques solares fotovoltaicos (COEES, 2018), once si se suma la planta de Puerto Peñasco, que actualmente está en sus procesos iniciales de construcción y cuya ubicación se aproximó con Zarco (2022) y Flores (2022). En la Figura 8 se observa la distribución de las once plantas y su relación con los sitios más factibles, así como la generación de electricidad.

De estas, cuatro plantas se encuentran dentro del área de influencia de 5 km y nueve dentro de un área de 10 km. Contrariamente, solo tres de las diez plantas parecen ubicarse en zonas con un po-



Nota: la imagen de la izquierda usa todos los criterios de selección con excepción de la velocidad del viento y la de la derecha usa todos.

Figura 6. Sitios con condiciones más factibles para generar energía fotovoltaica. Fuente: elaboración propia con datos de CESAVE-SIAFESON (2020), CENACE (2016), CONANP (2021, 2021a), INEGI (2009, 2016, 2016a, 2017, 2020, s.f.), The European Space Agency (s.f.), Solargis (2017) y USGS (s.f.).

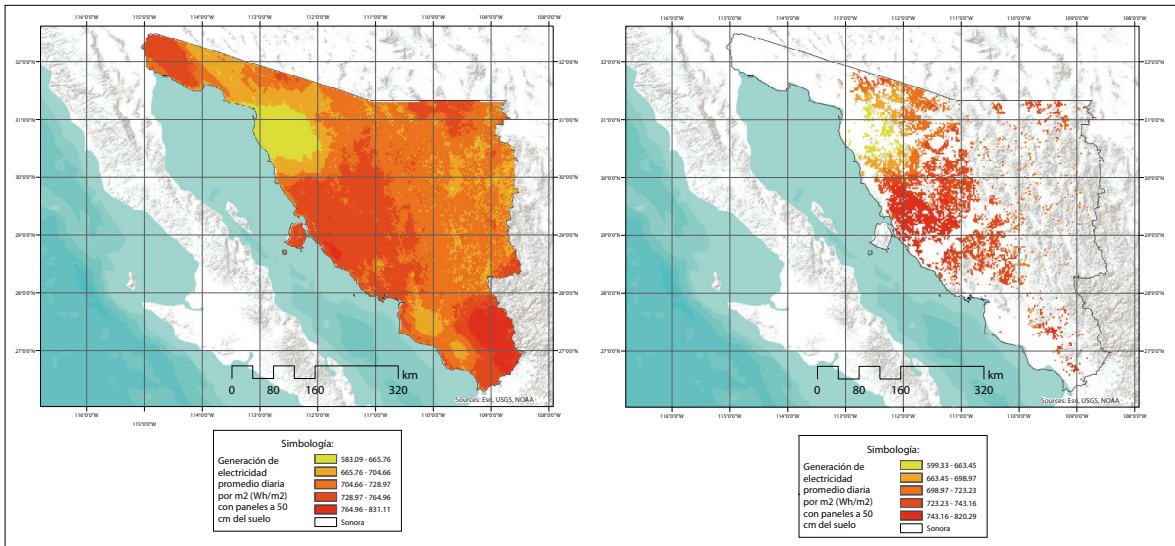


Figura 7. Potencial promedio de generación de electricidad diario por m² en Sonora y zonas donde es posible instalar plantas solares con celdas a 50 cm de altura del suelo. Fuente: elaboración propia con datos de CESAVE-SIAFESON (2020), CENACE (2016), CONANP (2021, 2021a), INEGI (2009, 2016, 2016a, 2017, 2020, s.f), The European Space Agency (s.f.), Solargis (2017) y USGS (s.f.).

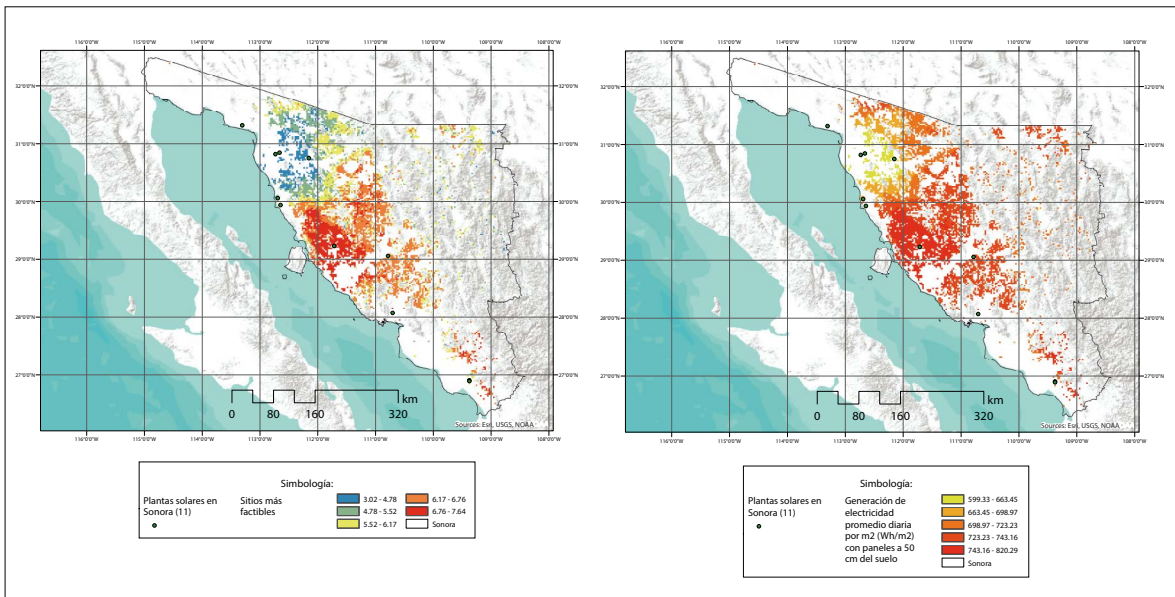


Figura 8. Potencial promedio de generación de electricidad diario por m², lo sitios más factibles y plantas solares en Sonora. Fuente: elaboración propia con datos de CESAVE-SIAFESON (2020), CENACE (2016), CONANP (2021, 2021a), INEGI (2009, 2016, 2016a, 2017, 2020, s.f), The European Space Agency (s.f.), Solargis (2017) y USGS (s.f.).

tencial de generación de electricidad relativamente bajo (zonas amarillas). Hay diferentes razones para esta discrepancia. Una es que el gobierno facilita

las zonas para las plantas solares sin considerar estos criterios de exclusión, por ejemplo, el caso de la nueva planta en Puerto Peñasco, que está

localizada cerca de vegetación desértica, propiedad social, carreteras y un aeropuerto (INEGI, 2016a, 2017, 2020), que es construida por la CFE y donde se tuvo que construir una línea de transmisión para garantizar el funcionamiento de la planta (Hernández, 2022).

Por otro lado, Arancibia-Bulnes *et al.* (2014) estiman que con menos del 1% del territorio de Sonora, sería posible abastecer de electricidad al país, lo cual se comprueba en este estudio con mayor precisión.

Un área específica de oportunidad para futuros estudios, que se encuentra fuera del marco de esta investigación, son los medios de distribución o traslado de la electricidad, ya que, si bien solo se requiere conectar las plantas a la red nacional eléctrica, para plantas grandes el proceso puede ser más complicado y requerir de análisis adicional para poder llevarse a cabo.

Un aspecto novedoso a lo encontrado en la literatura es la inclusión de la velocidad del viento como factor determinístico para generar esta energía, como es el caso de Sánchez-Lozano *et*

al. (2013), Chen *et al.* (2014), Noorollahi *et al.* (2016), Zoghi *et al.* (2017), Doljak y Stanojević (2017), Al Garni y Awasthi (2017) y Doorga *et al.* (2018). Aparentemente los resultados sin y con esta variable son similares, pero sí existen ligero cambios en las categorías más y menos factibles, que en general se pueden relacionar con espacios con baja velocidad del viento.

Otra variante con respecto a estudios similares es la comparación de diferentes métodos de interpolación espacial para poder elegir el método que tenga menores métricas de error. Y que se propone el método de Regresión IDW, que tuvo mejores resultados en algunas de las variables en las que se usó interpolación espacial. Posiblemente porque hay una relación espacial determinística entre las variables, así como que existe evidencia que ligeras mejoras en este instrumento aumentan su eficiencia (Barrios *et al.*, 2018). Las métricas de error para cada variable interpolada se presentan en la Tabla 4:

Este estudio se limita al año 2019, por lo que valdría la pena hacer estudios con datos históricos que nos permitan analizar las tendencias futuras en

Tabla 4. Pesos atribuidos a los criterios de selección.

Variable espacial	Métrica de error	Regresión kriging	Kriging simple	Kriging ordinario	IDW	Regresión-IDW	Metodo empleado
Radiación Solar	ECP	208.372	268.8484	216.4485	229.1728	222.5986	Regresión kriging
	EAP	10.4208	11.9342	10.7383	11.12146	11.0182	
	R2	0.9993	0.9991	0.9993	0.9992	0.9992	
Temperatura	ECP	0.3836	0.5472	0.8114	0.6027	0.3623	Regresión-IDW
	EAP	0.5004	0.4889	0.6229	0.4936	0.4551	
	R2	0.9995	0.9993	0.9989	0.9992	0.9995	
Velocidad del viento	ECP	4.8171	4.6517	4.5201	5.4616	5.5719	Kriging ordinario
	EAP	1.7328	1.6581	1.6399	1.8608	1.8715	
	R2	0.9472	0.949	0.9506	0.9405	0.9394	
Humedad relativa	ECP	7.8633	6.6648	7.6185	10.0522	9.1476	Kriging simple
	EAP	2.3727	2.0996	2.1589	2.4191	2.3668	
	R2	0.9964	0.9971	0.9968	0.9955	0.9957	
Duración de la luz solar	ECP	0.0735	0.0741	0.079	0.0719	0.069	Regresión-IDW
	EAP	0.1741	0.1667	0.1847	0.1803	0.1838	
	R2	0.9993	0.9993	0.9993	0.9993	0.9994	

Fuente: elaboración propia con datos de CESAVE-SIAFESON (2020), USGS (s.f.), The European Space Agency (s.f.) y Solargis (2017).

temas de generación de EF. Otra limitación es que, si bien Sonora cuenta con condiciones favorables para producir este tipo de energía, otros estados, como Durango y Chihuahua, podrían beneficiarse de estudios similares.

Resulta relevante seguir trabajando en la búsqueda de ecuaciones más precisas que permitan estimar la electricidad que sería posible generar bajo ciertas condiciones; por ejemplo, incluir variables como sombra, humedad relativa, entre otros, y comparar estas predicciones contra valores específicos de sitio en esta región geográfica. También queda la posibilidad de realizar análisis similares con metodologías diferentes a las presentadas en este artículo, como es el caso del GIS-Fuzzy AHP, GIS-AHP-Topsis, GIS-Boolean Fuzzy, GIS-Best Worst Method, GIS-Fuzzy Topsis, entre otros (para más detalle puede revisarse Suprova *et al.*, 2020; Malemnganbi y Shimray, 2020), para realizar comparaciones en cuanto a la efectividad de cada método para este caso en específico.

Por último, es relevante que estudios futuros involucren tanto a tomadores de decisiones como al sector energético privado y público, en materia de tecnología fotovoltaica, para obtener elementos que permitan hacer investigaciones con mayor nivel de profundidad y que estén conectadas con las necesidades presentes de estos actores.

CONCLUSIONES

El objetivo general de este trabajo fue hacer una primera aproximación para la estimación de electricidad vía el proceso fotovoltaico en Sonora. Tiene la intención de coadyuvar al desarrollo racional de esta energía en México a través de la elaboración, recolección o unión de un conjunto de instrumentos y herramientas replicables que, al aplicarse a datos geoespaciales, permitan obtener información relevante para la toma de decisiones con respecto a la generación de electricidad vía el proceso fotovoltaico.

Específicamente, para aportar a la generación de conocimiento necesaria para lograr una transición energética en las próximas décadas, esta investigación evaluó la cantidad de electricidad potencial

que se puede generar en Sonora usando el proceso fotovoltaico. Considerando tanto los sitios más factibles donde se podrían ubicar estas plantas, así como una estimación de la electricidad que sería posible generar en sitio.

De esta forma, podemos afirmar que, considerando el consumo eléctrico total de México en 2020 (*Expansión*, s.f.), se requerirían de alrededor de 1081 km² del territorio de Sonora para abastecer al país usando tecnología fotovoltaica, y esto solo representaría el 3% de todo el espacio disponible en la entidad para emplear EF. Así, es posible afirmar que el potencial fotovoltaico en Sonora es privilegiado y presenta un área de oportunidad para la entidad y el país.

Poder pasar de las energías fósiles, que generan problemas importantes al ambiente y por su naturaleza son finitos, hacia energías renovables que tienen el potencial de contener los efectos negativos que la humanidad ha y sigue produciendo, es una responsabilidad relevante para la sociedad actual. En este escenario, el aprovechamiento de la radiación solar es fundamental, pero requiere de investigación para disminuir su impacto en el ambiente, así como eficientizar su aplicación

REFERENCIAS

- Al Garni, H. Z. y Awasthi, A. (2017). Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied Energy*, 206, 1225–1240. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.024>
- Al Garni, H. Z., y Awasthi, A. (2018). Solar PV Power Plants Site Selection: A Review. En Imene Yahyaoui (Ed), *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*. Volume 1: Solar and Wind Energies (pp. 57–75). ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812959-3.00002-2>
- Alami Merrouni, A., Elwali Elalaoui, F., Mezrhab, A., Mezrhab, A., y Ghennioui, A. (2018) Large scale PV sites selection by combining GIS and Analytical Hierarchy Process. Case study: Eastern Morocco. *Renewable Energy*. 119, 863-873. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.044>
- Amini, S. y Amin Asoodar, M. (2016). Selecting the most appropriate tractor using Analytic Hierarchy Process – An Iranian case study. *Information Processing in*

- Agriculture*, 3, 223–234. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.08.003>
- Arancibia-Bulnes, C. A., Peón-Anaya, R., Riveros-Rosas, D., Quiñones, J. J., Cabanillas, R.E., y Estrada, C. A. (2014). Beam solar irradiation assessment for Sonora, Mexico. *Energy Procedia*, 49, 2290–2296. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.242>
- Ayvazoglu, Ö., y Filik, Ü. B. (2018). Estimation methods of global solar radiation, cell temperature and solar power forecasting: A review and case study in Eskişehir. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 639–653. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.084>
- Barasa, M. J. y Olanrewaju, O. A. (2022). Sustainable Energy Transition for Renewable and Low Carbon Grid Electricity Generation and Supply. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.743114>
- Barrios, A., Trincado, G., y Garraud, R. (2018). Alternative approaches for estimating missing climate data: application to monthly precipitation records in South-Central Chile. *Ecosystems*, 5(28), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s40663-018-0147-x>
- BDAN (Banco de Desarrollo de América del Norte). (2017). Propuesta de certificación y financiamiento parque de energía fotovoltaica “Puerto Libertad” en el municipio de Pitiquito, Sonora. BDAN. https://www.nadb.org/uploads/files/certprojsabd202018_0220puerto20libertad20solar20park20project20span.pdf
- BDAN (2017a). Propuesta de certificación y financiamiento proyecto de energía fotovoltaica “Orejana” en el municipio de Hermosillo, Sonora. BDAN. https://www.nadb.org/uploads/files/certprojsabd_2017_16_orejana_solar_park_project_proposal_span_public.pdf
- Beriro, D., Nathanail, J., Salazar, J., Kingdon, A., Marchant, A., Richardson, S., Gillet, A., Rautenberg, S., Hammond, E., Beardmore, J., Moore, T., Angus, P., Waldron, J., Rodrigues, L., y Nathanail, P. (2022). A decision support system to assess the feasibility of onshore renewable energy infrastructure. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112771. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112771>
- Bottero, M., Comino, E., y Riggio, V. (2011). Application of the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process for the assessment of different wastewater treatment systems. *Environmental Modelling & Software*, 26, 1211-1224. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.04.002>
- Campbell Scientific (s.f.). LP02 Pyranometer. Campbell Scientific. [online] <https://www.campbellsci.eu/lp02>, consultado el 20 de febrero de 2023.
- CEDRSSA (2015). La propiedad social rural y su perfil productivo. Cámara de Diputados. Anteriormente disponible en: <http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/74Reporte%2030%20La%20Propiedad%20Social%20Rural.pdf>
- CENACE (2016). Diagramas unifilares del sistema eléctrico nacional. Programa de ampliación y modernización 2016-2030. CENACE. <https://www.cenace.gob.mx/Docs/MercadoOperacion/ModGralPlaneacion/Mod%20Gral%20Planeaci%C3%B3n%202016-2021%20Diagramas%20Unifilares%20RNT%20y%20RGD%20del%20MEM.pdf>
- CESAVE-SIAFESON (2017). REMAS: Manual para limpieza de las estaciones. [online] https://www.siafeson.com/remas/assets/documentos/Manual_Limpieza.pdf, consultado el 20 de febrero de 2022.
- CESAVE-SIAFESON (2020) Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora. [online] www.siafeson.com/remas consultado el 7 de julio de 2020.
- CESAVE-SIAFESON (s.f.). Documentos. [online] <https://www.siafeson.com/remas/index.php/home/documentos> consultado el 2 de febrero de 2023.
- CESAVE-SIAFESON (s.f.a.). Red de Estaciones Meteorológicas Automatizadas de Sonora. [online] https://www.siafeson.com/remas/assets/documentos/psnt_REMAS_20022016.pptx consultado el 20 de febrero de 2023.
- Chandio, I. A., Matori, A. N. B., WanYusof, K. B., Talpur, M. A. H., Balogun, A.-L., y Lawal, D. U. (2013). GIS-based analytic hierarchy process as a multicriteria decision analysis instrument: a review. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(8), 3059–3066. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0568-8>
- Chen, C.-R., Huang, C.-C., y Tsuei, H.-J. (2014). A hybrid MCDM model for improving GIS based solar farms site selection. *International Journal of Photoenergy*, Article ID 925370, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2014/925370>
- Chung, M. H. (2020). Estimating Solar Insolation and Power Generation of Photovoltaic Systems Using Previous Day Weather Data. *Advances in Civil Engineering*, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2020/8701368>
- Clifton, J. y Boruff, B. (2010). WDC, Site Options for Concentrated Solar Power Generation in the Wheatbelt Final Report. https://www.wheatbelt.wa.gov.au/files/9413/9711/1915/Concentrated_Solar_Power_Generation_in_the_Wheatbelt_Report.pdf
- COEES. (2018). Proyectos de Energía fotovoltaica en Sonora. COEES. [online] <https://coees.sonora.gob.mx/noticias-coees/208-proyectos-de-energia-solar-en-sonora.html>
- Comité de Energía de la Comisión Sonora- Arizona. (2017). Ruta Estratégica de Energía de la Megarregión Sonora-Arizona. Comisión Arizona-México | Comisión Sonora- Arizona. https://coees.sonora.gob.mx/images/archivos/Ruta_Estrategica_de_Ener

- gia_de_la_Megarregion_Sonora_-_Arizona_Final_final_.pdf
- CONANP. (2021). Información Espacial. Áreas Naturales Protegidas. Gobierno de México. http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm
- CONANP. (2021a). Información Espacial. Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación. Gobierno de México. http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm
- Colak, H. E., Memisoglu, T., y Gercek, Y. (2020). Optimal site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: A case study of Malatya Province, Turkey. *Renewable Energy*, 149, 565-576. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.078>
- Corkish, R. (2013). Solar Cells. Reference Module in *Earth Systems and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.01481-0>
- Doljak, D., y Stanojević, G. (2017). Evaluation of natural conditions for site selection of ground-mounted photovoltaic power plants in Serbia. *Energy*, 127, 291-300. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.140>
- Doorga, J. R. S., Rughooputh, S. D. D. V., y Boojhawon, R. (2018). Multi-criteria GIS-based modelling technique for identifying potential solar farm sites: A case study in Mauritius. *Renewable Energy*, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.105>
- Elkarmi, F., y Mustafa, I. (1993) Increasing the utilization of solar energy technologies (SET) in Jordan. *Energy Policy*, 21(9), 978-984. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(93\)90186-J](https://doi.org/10.1016/0301-4215(93)90186-J)
- Engie. (2018). Resumen ejecutivo de la manifestación del impacto ambiental, modalidad regional para el proyecto: parque solar abril. Engie. <https://solarabril.com/pdf/manifiestacion-abril.pdf>
- ESRI. (s.f.). How the path distance tools work. ESRI. <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-the-path-distance-tools-work.htm>
- Expansión. (s.f.) México. Consumo de electricidad. Expansión/Datosmacro.com. [online] <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/electricidad-consumo/mexico> consultado el 1 de junio de 2022.
- Faiman, D. (2008). Assessing the Outdoor Operating Temperature of Photovoltaic Modules. *Progress in Photovoltaics*, 16, 307-315. <https://doi.org/10.1002/pip.813>
- Flores, S. (2022). Planta solar en Puerto Peñasco, Sonora: Datos clave del proyecto eléctrico y las dudas que genera. *Animal Político*. <https://animalpolitico.com/verificacion-de-hechos/te-explico/planta-solar-en-puerto-penasco-sonora-claves-proyecto-dudas>
- GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit). (2018). New investment opportunities: Solar Energy Investment in Mexico. Context, perspectives and trends. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). https://energypedia.info/images/archive/0/00/20180903193554%21Investment_Opportunities_Solar_2018.pdf
- González García, M. A., Cárdenas, V., y Álvarez, R. (2019). Inversores inteligentes en sistemas de energía solar fotovoltaica. *Universitarios Potosianos*, 16(238), 24-29. Anteriormente disponible en: <https://www.uaslp.mx/Comunicacion-Social/Documents/Divulgacion/Revista/Dieciseis/universitarios%20potosianos%20238.pdf#page=26>
- Hernández, E. (2022). CRE da luz verde a la planta solar de Puerto Peñasco. *Forbes México*. <https://www.forbes.com.mx/cre-da-luz-verde-a-la-planta-solar-de-puerto-penasco/>
- Howell, B. (2021). Solar Panel Output: How Much Electricity Do They Produce? The EcoExperts. <https://www.theecoexperts.co.uk/solar-panels/electricity-power-output>
- Huld, T., y Gracia Amillo, A. M. (2015). Estimating PV Module Performance over Large Geographical Regions: The Role of Irradiance, Air Temperature, Wind Speed and Solar Spectrum. *Energies*, 8, 5159-5181. <https://doi.org/10.3390/en8065159>
- INEGI. (2009). Hidrología. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrologia/#Descargas>
- INEGI. (2016). Manchas urbanas y rurales, 2015. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/murinegi15gw.xml?_httpcache=yesy_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsly_indent=no
- INEGI. (2016a). Carta catastral. Estado de Sonora. 1:1 200 000. INEGI. Anteriormente disponible en: www.inegi.org.mx
- INEGI. (2017). Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI. Conjunto Nacional Información de Interés Nacional. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598459>
- INEGI. (2020). Vías de comunicación. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/viascomunicacion/#Descargas>
- INEGI. (s.f.). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change- (2012). Renewable energy sources and climate change mitigation. Summary for policymakers and technical summary. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN_FD_SPM_final-1.pdf
- IPCC. (2021). Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

- www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf
- IRENA. (2015). Renewable Energy Prospects: Mexico. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_REmap_Mexico_report_2015.pdf?la=en&hash=8A259915297B04B0D50A422EDF48AD87007B56B1
- IRENA. (2018). A road map to 2050. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf
- IRENA. (2019). Future of solar photovoltaic. Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects. IRENA. <https://www.irena.org/publications/2019/Nov/Future-of-Solar-Photovoltaic>
- Jenks, G. F. (1967). The Data Model Concept in Statistical Mapping. *International Yearbook of Cartography*, 7, 186-190.
- Khemiri, W., Yaagoubi, R., y Miky, Y. (2018). Optimal Placement of Solar Photovoltaic Farms Using Analytical Hierarchical Process and Geographic Information System in Mekkah, Saudi Arabia. 1st International Congress on Solar Energy Research, Technology and Applications (ICSERTA 2018). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/1.5084998>
- Koc, A., Turk, S., y Şahin, G. (2019). Multi-criteria of wind-solar site selection problem using a GIS-AHP-based approach with an application in Iğdir Province/Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 32298-32310. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06260-1>
- Koehl, M., Heck, M., Wiesmeier, S., y Wirth, J. (2011). Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95, 1638-1646. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.020>
- Knier, G. (2021). How do Photovoltaics Work? NASA. <https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells>
- Kyriakopoulos, G. L., Streimikiene, D., y Baležentis, T. (2022). Addressing Challenges of Low-Carbon Energy Transition. *Energies*, 15, 5718. <https://doi.org/10.3390/en15155718>
- Lane, C. (2021). How much energy does a solar panel produce? *SolarReviews*. <https://www.solarreviews.com/blog/how-much-electricity-does-a-solar-panel-produce>
- Limón Portillo, A. (2017). Energía fotovoltaica en México: su potencial y aprovechamiento. CIEP. <https://ciep.mx/energia-solar-en-mexico-su-potencial-y-aprovechamiento/>
- Magar, V., Peña, A., Hahmann, A. N., Pacheco-Rosas, D. A., García-Hernández, L. S., y Goss, M. S. (2023). Wind Energy and the Energy Transition: Challenges and Opportunities for Mexico. *Sustainability*, 15(6), 5496. <https://doi.org/10.3390/su15065496>
- Malczewski, J. (2000). On the Use of Weighted Linear Combination Method in GIS: Common and Best Practice Approaches. *Transactions in GIS*, 4(1), 5-22. <https://doi.org/10.1111/1467-9671.00035>
- Malemnganbi, R. y Shimray, B. A. (2020). Solar Power Plant Site Selection: A Systematic Literature Review on MCDM Techniques Used. En P. K. Mallick, Meher, P., Majumder, A., Das, S. K. (Coord.) *Electronic Systems and Intelligent Computing. Lecture Notes in Electrical Engineering* (pp. 37-48). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7031-5_5
- Merrouni, A. A.; Mezrhab, A., y Mezrhab A. (2016). PV sites suitability analysis in the Eastern region of Morocco, Sustain. *Energy Technol. Assess*, 18, 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.09.006>
- Nagarajan, R., Roy, A., Vinod Kumar, R., Mukherjee, A., y Khire, M. V. (2000). Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58, 275-287. <https://doi.org/10.1007/s100649900032>
- Noorollahi, E., Fadai, D., Akbarpour Shirazi, M., y Ghodspour, S.H. (2016). Land suitability analysis for solar farms exploitation using GIS and fuzzy analytic hierarchy process (FAHP): A case study of Iran. *Energies*, 9(8), 643. <https://doi.org/10.3390/en9080643>
- Obukhov, S. G.; Plotnikov, I. A.; Surzhikova, O. A., y Savkin, K. D. (2017). *Method for Prediction of the Power Output from Photovoltaic Power Plant under Actual Operating Conditions*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 189. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/189/1/012008/pdf>
- Omran, W. (2010). Performance Analysis of Grid-Connected Photovoltaic System. UWSpace. <http://hdl.handle.net/10012/4943>
- Ozdemir, S., y Sahin, G. (2018). Multi-criteria decision-making in the location selection for a solar PV power plant using AHP. *Measurement*, 129, 218-226. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.020>
- Pardeshi, S. D., Autade, S. E., y Pardeshi, S. S. (2013). Landslide hazard assessment: recent trends and techniques. *SpringerPlus* 2, 523. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-523>
- Piazana, H. (1996). The effect of altitude upon the solar UV-B and UV-A irradiance in the tropical Chilean Andes. *Solar Energy*, 57(2), 133-140. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(96\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00049-7)
- ProMéxico. (s.f.). Sector de Energías renovables en México. Anteriormente disponible en: <http://mim>.

- promexico.gob.mx/swb/mim/Perfil_del_sector_energias_renovables/_lang/es
- ProMéxico. (2017). La industria solar fotovoltaica y fototérmica en México. ProMéxico. Anteriormente disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/data/file/428621/La_industria_solar_fv_y_ft_en_Mexico-compressed.pdf
- PurePoint Energy. (2020). Tips for installing a Solar Ground Mount. PurePoint Energy. Anteriormente disponible en: <https://www.purepointenergy.com/blog/2020/february/tips-for-installing-a-solar-ground-mount/>
- pvlb Python. (s.f.). pvlb temperature faiman. Pvlb Python. Anteriormente disponible en: <https://pvlb-python.readthedocs.io/en/stable/generated/pvlb.temperature.faiman.html>
- PVPMC. (2018). Faiman module temperature model. PV-Performance Modelling Collaborative. <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/module-temperature/faiman-module-temperature-model/>
- Rinner, C., y Voss, S. (2013). MCDA4ArcMap – An Open-Source Multi-Criteria Decision Analysis and Geovisualization Tool for ArcGIS 10. Toronto Metropolitan University. Journal contribution. <https://doi.org/10.32920/ryerson.14637438.v1>
- Ropp, M. E., Begovic, M., y Rohatgi, A. (1997). Determination of the curvature derating factor for the Georgia Tech Aquatic Center photovoltaic array. Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1997. <https://doi.org/10.1109/PVSC.1997.654326>
- Sánchez-Lozano, J. M.; Teruel-Solano, J.; Soto-Elvira, P. L., y Socorro García-Cascales, M. (2013). Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 544–556. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.019>
- SIAFESON. (s.f.). ¿Quiénes Somos? SIAFESON CESAVE Sonora. [online] <http://ftp.siafeson.com/index.php/quienessomos#:~:text=El%20Sistema%20de%20Alerta%20Fitosanitaria%20del%20Estado%20de,de%20plagas%20y%20Fo%20enfermedades%20en%20los%20cultivos%20C%20etc.%29>
- Solangi, Y. A., Shah, S. A. A., Zameer, H., Ikram, M., y Saracoglu, B. O. (2019). Assessing the solar PV power project site selection in Pakistan: based on AHP-fuzzy VIKOR approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 30286–30302. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06172-0>
- Solargis. (2017). Mapas de recursos solares de Mexico. The World Bank. <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/mexico>
- Stenhouse, E. (2021). Solar Panel Output: How Much Power Does a Solar Panel Produce? Treehugger <https://www.treehugger.com/how-much-electricity-does-a-solar-panel-produce-5194148>
- Suprova, N. T., Zidan, A. R., y Harunur Rashid, A. R. M. (2020). Optimal Site Selection for Solar Farms Using GIS and AHP: A Literature Review. *Proceedings of the International Conference on Industrial and Mechanical Engineering and Operations Management*. Dhaka, Bangladesh. <http://www.iomsociety.org/imeom/253.pdf>
- Svarc, J. (2022). Most efficient solar panels 2022. Clean Energy Reviews. <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels>
- Taddei Bringas, J. L., Navarrete Hinojosa, M. de los A., Taddei Arriola, P. D., y Cabanillas López, R. (2014). Estimación del potencial de energías renovables en el Estado de Sonora. *EPISTEMUS*, 17(8), 88-94. Anteriormente disponible en: http://www.epistemus.uson.mx/revistas/articulos/17-13ENERGIAS_RENOVABLES_EN_SONORA.pdf
- Taibi, A., y Atmani, B. (2017). Combining Fuzzy AHP with GIS and Decision Rules for Industrial Site Selection. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, 4(6), 60-69. <https://doi.org/10.9781/ijimai.2017.06.001>
- Teknomo, K. (2006). Analytic hierarchy process (AHP) tutorial. NALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP) TUTORIAL. [online] <https://people.revoledu.com/kardi/tutorial/AHP/> consultado el 20 de septiembre de 2023.
- The European Space Agency (s.f.). Level-2A. The European Space Agency. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types/level-2a>
- Universidad de Sonora. (s.f.). Potencial de Energías Renovables Para el Estado de Sonora. Comisión de Energía del Estado de Sonora. <https://coees.sonora.gob.mx/images/descargas/Energias-Renovables/Potencial-de-Energias-Renovables-Sonora.pdf>
- USGS -United States Geological Survey. (s.f.). Landsat Missions. USGS. <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat>
- Wong, M. A., Zhu, R., Liu, Z., Lu, L., Peng, J., Tang, Z., Ho Lo, C., y Chan, W.K. (2016) Estimation of Hong Kong's solar energy potential using GIS and remote sensing technologies. *Renewable Energy*, 99, 325-335. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.003>
- Vaidya, O. S., y Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 169(1), 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028>
- Zarco, J. (2022). Central fotovoltaica Puerto Peñasco. *PV Magazine*. <https://www.pv-magazine-mexico>

[com/2022/06/14/central-fotovoltaica-puerto-penasco/](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.014)
Zoghi, M., Houshang Ehsani, A., Sadat, M., Javad Amiri, M., y Karimi, S. (2017). Optimization solar site selection by fuzzy logic model and weighted-

linear combination method in arid and semi-arid region: A case study Isfahan-IRAN. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 986–996. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.014>