

## **Análisis multicriterio para la localización de centrales fotovoltaicas de gran escala**

### *Multicriteria analysis for the location of large-scale photovoltaic plants*

María Quinteros <sup>\*</sup>, Diego Morales 

*Jefatura de Posgrados, Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 010101;  
dmoralesj@est.ucacue.edu.ec*

\* Correspondencia: mariaeugenia.quinteros@est.ucacue.edu.ec

*Recibido 18 octubre 2020; Aceptado 19 noviembre 2020; Publicado 01 diciembre 2020*

**Resumen:** La matriz energética del Ecuador supera el 75% de energía renovable, sin embargo, la fuente principal es la energía hidroeléctrica. Como primer paso hacia la obtención de una matriz más amigable con el ambiente y más diversa es fundamental identificar zonas con potencial para la instalación de energías renovables no convencionales, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son de gran ayuda para identificar zonas con este potencial. En este estudio se identifican los posibles sitios para la implantación de centrales solares fotovoltaicas (CSF) en la Provincia del Azuay mediante los SIG y la Evaluación Multicriterio (EM). Para valorar la importancia de los criterios se empleó el Método Analítico Jerárquico (MAJ). Para la obtención de un modelo de capacidad de acogida (MCA) se integró el modelo de aptitud (MA) en el que se analizaron criterios económicos y técnicos; y un modelo de impacto (MI) que analizó variables ambientales. Al integrar los modelos esta metodología permitió la identificación de zonas para el emplazamiento de estaciones que permitan el monitoreo de los recursos y el análisis del comportamiento previo a la implementación de las CSF. Una vez ejecutada la metodología propuesta se obtiene como resultado dos posibles sitios con características medias para el emplazamiento de CSF. Como conclusión en base a los indicadores analizados el Azuay no cuenta con una zona potencialmente adecuada para la instalación de esta tecnología.

**Palabras clave:** Análisis multicriterio, central solar fotovoltaica, energía renovable, método analítico jerárquico, sistema de información geográfico.

**Abstract:** *Ecuador's energy matrix exceeds 75% of renewable energy; however, hydroelectric energy is the primary source. As a first step towards obtaining a more environmentally friendly and diverse matrix, it is essential to identify areas with potential for installing non-conventional renewable energies. Geographic Information Systems (GIS) are of great help to identify areas with this potential. In this study, the possible sites for implementing photovoltaic solar power plants (PSPP) in the Azuay Province are identified utilizing GIS and Multicriteria Evaluation (ME). The Hierarchical Analytical Method (HAM) was used to assess the criteria's importance. To obtain a host capacity model (HCM), the aptitude model (AM) was integrated. Economic and technical criteria were analyzed; an impact model (IM) allowed the analysis of environmental variables. By integrating the models, this methodology allowed identifying areas for the stations' location that allow the monitoring of resources and behavior analysis before implementing the PSPPs. Once the proposed methodology has been executed, two possible sites with average characteristics are obtained for the PSPP's location. In conclusion, based on the indicators analyzed, Azuay does not have a potentially suitable area for installing this technology.*

**Keywords:** *Hierarchical analytical method, geographical information systems, multicriteria analysis, photovoltaic solar farm, renewable energy.*

## 1 Introducción

Las Energías Renovables (ER) actualmente se consideran una opción para el reemplazo de combustibles fósiles (Aydin, Kentel, & Sebnem Duzgun, 2013). Estas son favorables en el cuidado del medio ambiente debido a que ayudan a disminuir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que deterioran la capa de ozono del planeta (Aydin *et al.*, 2013).

Las ER están vinculadas a las condiciones globales y el desarrollo. Para la ejecución de estos proyectos se deben analizar los criterios económicos, sociales y ambientales (Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018; Rediske *et al.*, 2020; Sánchez-Lozano, Antunes, García-Cascales, & Dias, 2014; Xu, Wei, Ji, Wang, & Gao, 2019).

En Latinoamérica, hasta el año 2017, Costa Rica, Brasil y Uruguay han alcanzado una matriz energética renovable dado que más del 80% de su energía proviene de fuentes renovables.

Cabe destacar que estos tienen implementadas varias tecnologías que obtienen ER de diferentes fuentes. En otros varios países, gracias a las políticas públicas de estado, se han empezado a implementar ER, no obstante, se enfocan principalmente en la energía hidroeléctrica considerada una ER convencional, descuidando otras fuentes (Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018; Koengkan, Poveda, & Fuinhas, 2019; Xu *et al.*, 2019).

Con relación a lo anterior, el Ecuador siendo un país rico en recursos naturales, ha podido usarlos para producir electricidad durante décadas (Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018). El gobierno ha impulsado varias regulaciones que pretenden incentivar el uso de ER en diferentes escalas (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2015, 2018, CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad), 2011, 2013). Según el Balance Nacional de Energía Eléctrica de febrero de 2020 el país alcanzó el 76.68% de energía hidroeléctrica, 1.30% de biomasa, 0.26% eólica, 0.13% biogás y 0.11% fotovoltaica, lo que da un total de 78.48% de energía renovable (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2020).

Como se evidencia, el Ecuador cuenta con más del 75% de ER proveniente del recurso hídrico. Un inconveniente de esta situación es que la generación continua de energía no es posible mediante el uso de un solo tipo de tecnología (hidroeléctrica) puesto que los recursos varían según el clima y la ubicación de la zona (Aydin *et al.*, 2013).

La Energía Solar (ES) crece de manera acelerada, es abundante, gratuita y limpia, además, no produce contaminación hacia el medio ambiente (Fang, Li, & Song, 2018).

La ES puede cubrir la demanda anual de energía con un promedio de 1.6 MWh/m<sup>2</sup> por año, aunque la

radiación anual a nivel mundial varía según la localización geográfica (Siksnyte-Butkiene, Zavadskas, & Streimikiene, 2020). La energía solar fotovoltaica se basa en la utilización de células solares fabricadas con materiales semiconductores cristalinos que por efecto fotovoltaico, generan corriente eléctrica cuando incide sobre los mismos radiación solar (Ghenai, Albawab, & Bettayeb, 2020). Mediante la “teoría del balance” desarrollada por Schockley y Queisser se puede determinar la eficiencia máxima de un panel, la cual está basada en la capacidad de conversión de energía luminosa a eléctrica (Torres-Pacheco, Jurado-Pérez, Granados-Lieberman, & Lozano-Luna, 2018). La eficiencia de una celda fotovoltaica se encuentra entre 13 y 16% para paneles policristalinos y puede alcanzar el 20% en paneles monocristalinos (Ghenai *et al.*, 2020). Un factor importante para el análisis de la eficiencia de un panel es la temperatura ambiente, existe menor producción de energía mientras más alta sea la temperatura (Hashemizadeh, Ju, & Dong, 2020), la eficiencia aumenta a medida que la temperatura se mantiene menor a los 25°C (Hashemizadeh *et al.*, 2020; Torres-Pacheco *et al.*, 2018).

Las centrales solares fotovoltaicas (CSF) del país han demostrado gran eficiencia por su ubicación privilegiada con respecto al sol, por lo que es importante promocionar estas tecnologías (Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018). El país cuenta con el recurso primario; sin embargo, el desarrollo de nuevas tecnologías se ha visto frenado por la ausencia de políticas públicas, las cuales se deben a las fluctuaciones económicas y el lento desarrollo del país (Xu *et al.*, 2019).

Para la instalación de una central fotovoltaica algunos criterios deben ser tomados en cuenta, como la ubicación, minimización de costos con respecto a la cercanía de infraestructura eléctrica, la potencia generada, los impactos ambientales, el uso de suelo, áreas pobladas, entre otros (Al Garni & Awasthi, 2017).

Cevallos (Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018) realizó una Evaluación Multicriterio (EM) en el Ecuador para encontrar la localización de centrales eólicas, fotovoltaicas y solares. Se concluye que las CSF tienen gran potencial en el país, existe mayor potencial en la Región Andina y la Cordillera de los Andes. Sin embargo, no existe un análisis específico para la provincia del Azuay que permita establecer con más precisión estos sitios maximizando el recurso; en consecuencia, la potencia en las plantas y minimizando costos.

Debido a las razones expuestas anteriormente, el objetivo de esta investigación fue determinar la ubicación adecuada para el emplazamiento de CSF en la provincia del Azuay a partir de criterios económicos, ambientales, sociales y técnicos. Para que en un futuro este trabajo sirva de guía y posibilite a los organismos competentes para la toma adecuada

de decisiones en referencia al uso del recurso solar y las ER en general.

## 2 Metodología

El área de estudio está ubicada en la Provincia del Azuay, en Ecuador. Al sur de la región interandina, entre las cordilleras Occidental y Oriental. Mismas que dan lugar a la formación de valles entre la cuenca del Río Paute y en la cuenca del Río Jubones. Es el sitio en el cual se encuentran asentados los centros poblados desde la época colonial, inclusive previamente a ellos. Aproximadamente tiene una superficie de 8632.01 km<sup>2</sup> y una altura que oscila entre los 37 m.s.n.m. en la zona costanera de Camilo Ponce Enríquez y 4.482 m.s.n.m. en la zona alta del parque nacional «El Cajas» (Consejo Provincial del Azuay, n.d.). La provincia está integrada por 15 cantones:

Camilo Ponce Enríquez, Chordeleg, El Pan, Girón, Guachapala, Gualaceo, Nabón, Oña, Paute, Pucará, San Fernando, Santa Isabel, Sevilla de Oro, Sígsig y su capital el cantón Cuenca. Además, cuenta con 61 parroquias rurales (Consejo Provincial del Azuay, n.d.).

La metodología planteada inició con la revisión bibliográfica de la literatura en bases científicas que guíen en la selección de criterios y subcriterios significativos. Los cuales sirvieron para establecer las variables que determinen la factibilidad de la localización de CSF dentro de la provincia.

Consecuentemente se procedió, en las bases de datos de las páginas oficiales del país, con la obtención de información en formato shape (.shp) y ráster (.tif). Los cuales son compatibles para el análisis y geoprocesamiento en los SIG.

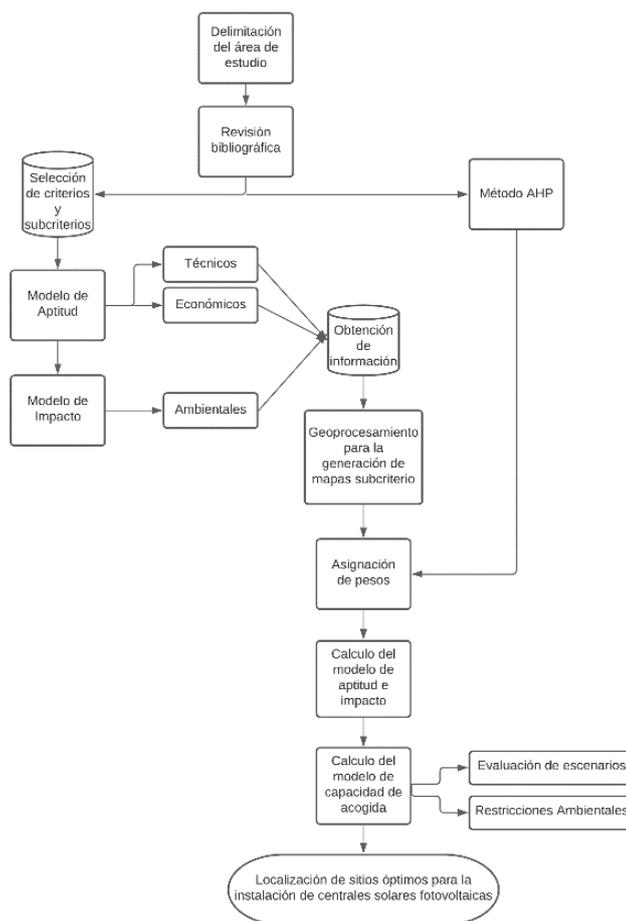


Figura 1: Diagrama de flujo para la localización de CSF mediante el método de EM.

A continuación, se elabora los mapas multi criterio mediante el geoprocesamiento de la información en el SIG. Mediante el MAJ (Aggarwal & Singh, 2013) se realizó la asignación de pesos para cada subcriterio. Con los pesos obtenidos se procedió a realizar el cálculo del MA y MI.

Posteriormente, se calculó el MCA integrando los modelos anteriores, se realizó la asignación de diferentes pesos y se evaluó los diferentes escenarios para evitar la subjetividad de los resultados.

Finalmente, a partir del MCA se puede definir alternativas para la localización de CSF en la provincia del Azuay. En la figura 1 se puede visualizar el flujo de actividades realizadas en el presente estudio.

## 2.1 Revisión bibliográfica

En la tabla 1 se realiza la síntesis de la información recolectada a partir de la revisión bibliográfica para seleccionar los criterios y subcriterios relevantes para la localización de CSF.

La EM es un método alternativo que utiliza un gran número de criterios involucrados en la toma de decisiones (económicos, ambientales y sociales) de manera estructurada y objetiva (de Paula et al., 2020).

Varios estudios indican el uso de métodos de EM mediante SIG. Sintetizando los autores, proponen modelos capaces de indicar la mejor ubicación para la implementación de CSF a gran escala usando MAJ mediante EM en países como Brasil, Arabia Saudita, España y Tanzania (Al Garmi & Awasthi, 2017; Aly et al., 2017; Gutiérrez & Velazquez, 2018; Rediske et al., 2020). En Turquía, Aydin et al. (2013) analizó la ubicación de plantas solares y eólicas mediante la metodología Ordered Weighted Averging (OWA). Charabi & Gastli (2011) realizaron la comparación de las metodologías (OWA) en Omán. En Ecuador, Cevallos-Sierra y Ramos-Martin (2018) realizaron una EM para analizar los sitios óptimos para el emplazamiento de CSF y eólicas mediante SIG. En China se usó el método Best-Worst Method para encontrar la mejor ubicación para proyectos solares fotovoltaicos (Hashemizadeh et al., 2020).

Tabla 1: Criterios para la localización de CSF.

Criterio	Subcriterio	Referencia
Técnico	Pendiente (%)	(Aydin et al., 2013; Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018; Gutiérrez & Velázquez, 2018; Rediske et al., 2020; Sánchez-Lozano et al., 2014; Aly, Jensen & Pedersen, 2017)
Técnico	Radiación (kWh/m <sup>2</sup> día)	(Aydin et al., 2013; Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018; Gutiérrez & Velázquez, 2018; Al Garmi & Awasthi, 2017; Rediske et al., 2020; Charabi & Gastli, 2011; Sánchez-Lozano et al., 2014; Aly et al., 2017)
Económico	Vías de comunicación (km)	(Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018; Gutiérrez & Velázquez, 2018; Al Garmi & Awasthi, 2017; Rediske et al., 2020; Sánchez-Lozano et al., 2014; Aly et al., 2017)
Económico	Conexión a redes eléctricas (km)	(Aydin et al., 2013; Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018; Gutiérrez & Velázquez, 2018; Al Garmi & Awasthi, 2017; Rediske et al., 2020; Charabi & Gastli, 2011; Sánchez-Lozano et al., 2014; Aly et al., 2017)
Ambientales	Hidrología (km)	(Aydin et al., 2013; Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018; Gutiérrez & Velázquez, 2018; Charabi & Gastli, 2011; Aly et al., 2017)
Ambientales	Uso de suelo	(Aydin et al., 2013; Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018; Gutiérrez & Velázquez, 2018; Rediske et al., 2020; Charabi & Gastli, 2011; Sánchez-Lozano et al., 2014; Aly et al., 2017)
Ambientales	Centros poblados (m)	(Aydin et al., 2013; Al Garmi & Awasthi, 2017; Rediske et al., 2020; Sánchez-Lozano et al., 2014; Aly et al., 2017)
Ambientales	Áreas protegidas	(Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018; Gutiérrez & Velázquez, 2018; Al Garmi & Awasthi, 2017; Charabi & Gastli, 2011; Aly et al., 2017)

## 2.2 Obtención de información

Se recopiló información cartográfica de los criterios y subcriterios de las páginas oficiales GeoPortal del Instituto Geográfico Militar, Ministerio de Agricultura y Ganadería, Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES), Atlas Solar Global para ser geoprocesados en los puntos 2.4 al 2.6.

## 2.3 Asignación de pesos

En este punto, aplicando el MAJ descrito por Saaty en 1980 (Aggarwal & Singh, 2013), se asignaron los

pesos según la importancia de los criterios seleccionados anteriormente.

El MAJ descompone un problema principal en jerarquías. Se divide en tres grupos ordenados jerárquicamente: objetivo o meta, criterios-subcriterios y alternativas. Estructurando piramidalmente la meta se ubica en la cima, los criterios y subcriterios en la mitad y las alternativas de decisión en la base (Aggarwal & Singh, 2013). Los elementos son evaluados en pares con respecto al nivel anterior. Este método usa una escala del 1 al 9 para evaluar la relación entre los elementos pares (Pohekar & Ramachandran, 2004; Saaty, 1987).

Los subcriterios seleccionados se contrastaron con un grupo de cuatro expertos según la importancia que representaba para ellos cada subcriterio con respecto al anterior, determinando así, establecer los pesos para cada uno.

## 2.4 Cálculo del modelo de aptitud

En esta fase se seleccionaron los subcriterios correspondientes a los criterios técnicos y económicos. Este modelo sirvió como base para identificar las alternativas con cada posible localización para el emplazamiento de CSF en el sitio de estudio, es decir, brinda una idea preliminar. Para la construcción de este modelo se escogieron 4 subcriterios significativos, cada subcriterio se presenta a continuación:

**SC1-Pendiente (%):** Para la construcción de CSF se debe evitar pendientes altas, ya que contribuirán al aumento de costos durante la fase de construcción. Las pendientes planas o bajas facilitarían la instalación de los paneles solares.

**SC2-Radiación Solar (kWh/m<sup>2</sup>día):** La cantidad de radiación solar es un criterio técnico considerado para el análisis del emplazamiento de dichas centrales. Este valor indica la cantidad de energía solar que irradia sobre alguna superficie durante cierto periodo de tiempo. Para que un proyecto de generación eléctrica fotovoltaica se considere viable es de vital importancia niveles altos de radiación solar.

**SC3-Cercanía a vías de comunicación (km):** La cercanía a carreteras es un subcriterio analizado. El acceso de vehículos hacia la central contribuiría en la reducción de costos durante la fase de construcción, operación y mantenimiento, evitando gastos adicionales como la construcción de nuevas vías para el acceso.

**SC4-Cercanía a redes eléctricas (km):** Este subcriterio está considerado dentro del criterio económico. Si no

se cuentan con líneas de transmisión cercanas será necesario realizar las instalaciones para llegar a la red, lo cual contribuirá en el aumento de los costos de construcción e inversión.

El geoprocésamiento de la cartografía obtenida anteriormente se realiza en el software ArcMap 10.3 (<http://www.esri.com/software/arcgis>). El sistema de coordenadas usado es WGS84 zona 17 S y el tamaño del píxel será de 15x15 teniendo en cuenta que el tiempo de procesamiento de los datos es el más eficaz.

Para la obtención de los mapas-multi criterio se clasificaron primeramente los subcriterios en una escala del 0 al 15 en intervalos de 5 desde no adecuado hasta altamente adecuado. Este resultado refleja el grado de cumplimiento según las características necesarias para la localización de CSF. A continuación, en la tabla 2 se puede analizar los subcriterios con las respectivas restricciones establecidas en este estudio.

Al establecer la escala planteada fue necesario normalizar los datos en una escala entre 0 y 1 donde el valor de 0 indicó los sitios no adecuados y 1 los altamente adecuados. Esta normalización fue necesaria para poder geo procesar todos los subcriterios en base a una misma escala.

Estas capas se integraron mediante la asignación de pesos a cada subcriterio según su importancia mediante el MAJ. Se realizó la multiplicación de cada peso por el subcriterio respectivo y luego se sumó cada uno de los resultados obtenidos para establecer el MA como se indica en la ecuación 1.

$$MA = \omega_1 * SC_1 + \dots + \omega_4 * SC_4 \quad (1)$$

A partir del geoprocésamiento, a cada píxel se le asignó un valor según el grado de aptitud que representó cada área en el mapa multicriterio.

Tabla 2: Criterios técnicos y económicos.

Escala	Significado	SC1-Pendiente (%)	SC2-Radiación (kWh/m <sup>2</sup> día)	SC3-Cercanía a carreteras (m)	SC4-Cercanía a redes eléctricas (m)
0	No adecuado	> 20	< 3.8	0-240 > 10000	0-300 > 20000
5	Menos adecuado	10 a 20	3.8-4.5	6000-10000	15000-20000
10	Adecuado	5 a 10	4.5-5	3500-6000	6500-15000
15	Altamente adecuado	0 a 5	> 5	240-3500	300-6500

## 2.5 Cálculo del modelo de impacto

En esta fase se seleccionó criterios correspondientes a las características ambientales que resultan determinantes para valorar el impacto causado por el emplazamiento de CSF. Las alternativas que produzcan un menor impacto ambiental serán

consideradas como las óptimas para su implementación. Para la construcción de este modelo se escogieron 3 subcriterios significativos, cada subcriterio se presenta a continuación:

**SC5-Cercanía al recurso hídrico (km):** La cercanía al recurso hídrico puede facilitar el mantenimiento y la construcción de la planta, en contraposición, puede

contribuir a la contaminación del medio ambiente. Por lo que un punto medio sería considerado la mejor opción.

SC6-Uso de suelo: Este subcriterio puede afectar al factor ambiente tanto como al factor económico. Se debe tener en cuenta que árboles de gran altura pueden provocar sombra lo que no permitirá el paso de radiación solar. Suelos aptos para cultivo pueden afectar a la economía del agricultor de la zona. Suelos erosionados y vegetación arbustiva pueden ser usados para la construcción de actividades de generación eléctrica.

SC7-Cercanía a centros poblados (km): Este subcriterio se considera controversial, ya que, la cercanía a centros poblados puede disminuir los costos de conexión a la red y reducir las pérdidas, no obstante, al mismo tiempo puede causar un impacto visual o malestar a la población por la cercanía.

En consecuencia, para la obtención del MI se realizó el geoprocesamiento siguiendo la metodología del modelo anterior.

Inicialmente, para la obtención de los mapas-multicriterio los SC5 y SC7 se clasificaron en una escala booleana, en donde 0 corresponde a un mayor impacto y 1 menor impacto, respectivamente como se observa en la tabla 3.

Tabla 3: Criterio de impacto ambiental.

Escala	SC5-Cercanía a recursos hídricos (m)	SC7-Cercanía a centros poblados (m)
1-mayor impacto	0-500	0-5000
0-menor impacto	> 500	> 5000

Tabla 4: Criterio de impacto ambiental-Uso de suelo.

Escala	SC6-Uso de suelo
1- Mayor impacto	Asentamientos poblados
	Bosque natural
	Cuerpos de agua
	Páramo
0,5-Impacto medio	Plantaciones forestales
	Arboricultura
	Cultivos
0-Menor impacto	Cultivo de ciclo corto
	Cultivo indiferenciado
	Área erosionada
	Pastos naturales
	Pastos plantados
	Vegetación arbustiva

La evaluación del SC6 se dividió en 3, los cuales evaluaron un impacto alto, medio y bajo como se observa en la tabla 4. Luego estos valores se normalizaron para obtener una escala entre 0 y 1.

Todas las capas del MI serán normalizadas en una escala entre 0 y 1 para poder ser integrados. Al igual

que en el modelo anterior, estas capas se integrarán mediante la asignación de pesos a cada subcriterio aplicando la metodología MAJ. Se realizó la multiplicación de cada peso por el subcriterio respectivo y luego se realiza la suma de cada resultado como se muestra a continuación en la ecuación 2.

$$MI = \omega_5 SC_5 + \omega_6 SC_6 + \omega_7 SC_7 \quad (2)$$

A cada píxel del mapa multicriterio obtenido a partir del geoprocesamiento se le asignó un valor entre 0 y 1 evaluando el nivel de impacto ambiental entre alto y bajo.

## 2.6 Modelo de capacidad de acogida

Para encontrar el MCA (ecuación 3) fue necesario integrar el MA y MI, este modelo permitió visualizar las alternativas para las zonas óptimas de localización de CSF.

$$MCA = \beta MA + \alpha MI \quad (3)$$

En este caso para evitar la subjetividad de los datos fue necesario evaluar tres escenarios, variando los pesos de los modelos anteriores:

Escenario 1: Considera a  $\beta$  y  $\alpha$  como pesos iguales.

Escenario 2: Considera al MA más importante por lo que asigna a  $\beta$  el peso equivalente a 0.60 y en el MI a  $\alpha$  el peso de 0.40.

Escenario 3: Considera al MA menos importante por lo que asigna a  $\beta$  el peso equivalente a 0.40 y al de MI  $\alpha$  un peso equivalente a 0.60.

Al realizar la integración de los mapas se obtuvo un valor de píxel en una escala entre -1 y 1 en donde los sitios negativos fueron aquellos que el impacto es mayor que la aptitud y los valores cercanos a 1 los más adecuados para el emplazamiento de CSF.

Tabla 5: Valores normalizados de la matriz pareada criterios técnico y económico-método AHP.

	SC1	SC2	SC3	SC4
SC1	0.07	0.14	0.07	0.17
SC2	0.40	0.17	0.60	0.47
SC3	0.27	0.34	0.17	0.18
SC4	0.26	0.35	0.17	0.18

## 3 Resultados y Discusión

### 3.1 Método analítico jerárquico

Se realizó la asignación de pesos mediante la validación de un grupo de cuatro expertos en el área de interés. Una vez comparados los valores mediante

una matriz pareada se procedió a verificar la consistencia de los datos. En la tabla 5 y 6 se presentan los valores normalizados para los pesos de cada subcriterio analizado.

Tabla 6: Valores normalizados de la matriz pareada criterio ambiental -método MAJ.

	SC5	SC6	SC7
SC5	0.27	0.28	0.35
SC6	0.27	0.28	0.45
SC7	0.45	0.45	0.20

Tras la comprobación de los datos normalizados y la validación de las matrices, en la tabla 7 se pueden observar los pesos para cada subcriterio en el caso del MA y MI, respectivamente.

Tabla 7: Pesos identificados mediante método MAJ.

Modelo	Subcriterio	Pesos
MA	SC1	0.11
	SC2	0.41
	SC3	0.24
	SC4	0.24
MI	SC5	0.3
	SC6	0.33
	SC7	0.37

Como se aprecia en la tabla anterior en el MA, el mayor peso es asignado al SC2 y el menor peso al SC1. En el modelo de impacto el SC7 es considerado como más importante y el SC5 como menos importante con respecto a los impactos ambientales. Estos pesos serán usados posteriormente para la obtención del MA y MI.

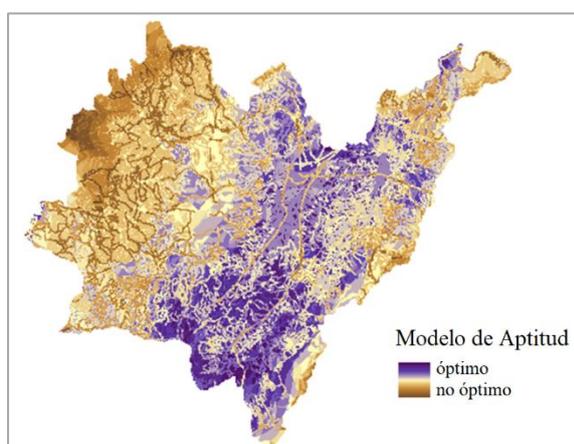


Figura 2: Mapa del modelo de aptitud-Provincia del Azuay.

### 3.2 Modelo de aptitud

En este punto se integraron cuatro subcriterios correspondientes a los criterios técnico y económico. Mediante el geoprocesamiento de los mapas multicriterio y la calculadora ráster se obtiene las siguientes posibles localizaciones para CSF dentro de la provincial del Azuay, como se observa en la figura 2.

Cada píxel del mapa representa un valor ponderado en una escala entre 0 y 1. En este punto los píxeles en color morado (1) son los sitios más adecuados para la localización de CSF, los puntos de color marrón (0) son los puntos menos adecuados.

### 3.3 Modelo de impacto

En este punto se integran 3 subcriterios correspondientes directamente al impacto ambiental que pueden ocasionar el emplazamiento de estos proyectos. Como en el punto anterior se obtiene un mapa en el que cada píxel representa un valor entre 0 y 1. Los posibles impactos se pueden apreciar en la figura 3.

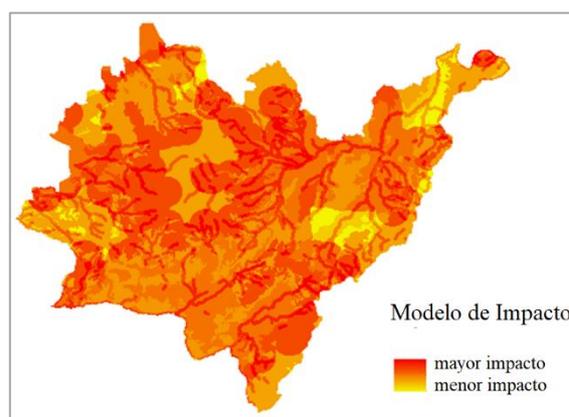


Figura 3: Mapa del modelo de impacto-Provincia del Azuay.

Evaluando los 3 subcriterios correspondientes al impacto ambiental se puede observar que los sitios en color rojo son los que presentan mayor impacto (1) para el emplazamiento de CSF, los colores en amarillo representan los sitios con menor impacto ambiental (0).

### 3.4 Modelo de capacidad de acogida

En este caso se integraron los modelos anteriores MA y MI; como resultado se obtuvo un modelo que cumpla con las condiciones óptimas para el emplazamiento de CSF, eliminando los sitios con mayor impacto ambiental.

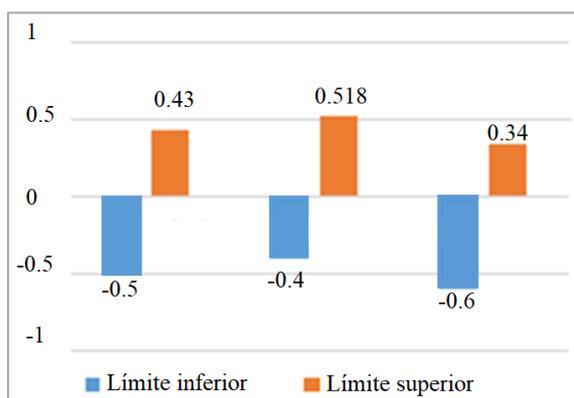


Figura 4: Evaluación de escenarios del modelo de capacidad de acogida.

Como se observa en figura 4, se evaluaron tres escenarios variando los pesos a los MA y MI para evitar la subjetividad de los datos. En el primer escenario como resultado los valores oscilan en un rango de -0.5 a 0.43; en el segundo escenario los valores se encuentran en el rango de -0.4 a 0.518 y en el tercer escenario desde -0.6 a 0.34.

Al analizar los diferentes escenarios, el segundo nos brinda mayor proporción de valores positivos (Asignando al MA  $\beta = 0.60$  y el MI  $\alpha = 0.40$ ). Por lo que este escenario nos servirá para obtener un mayor número de ubicaciones posibles para el objetivo del estudio, en este caso las aptitudes del terreno superan los impactos que son generados por la actividad.

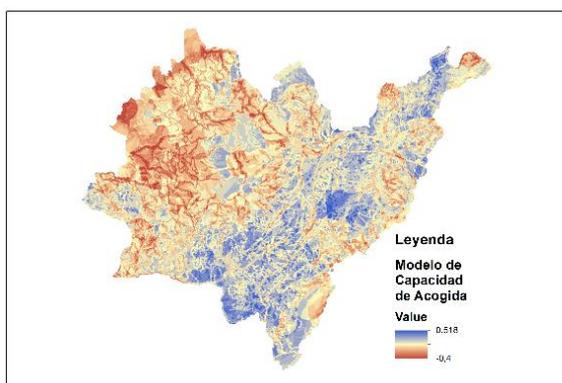


Figura 5: Mapa del modelo de capacidad de acogida-Provincia del Azuay.

En la figura 5 se puede apreciar que los sitios dentro del escenario 2, en rojo son aquellos que brindan valores negativos en los cuales no es posible el emplazamiento de CSF, en este caso los impactos son mayores que la aptitud. Los sitios en azul son los más adecuados en donde la aptitud es mayor que el impacto que puede generar esta actividad.

A cada valor del píxel se le asigna un valor correspondiente a la escala entre -1 y 1, en este caso el mayor valor corresponde a 0.518. En la Provincia del Azuay no se aprecian zonas cercanas a 1.

La provincia del Azuay tiene una extensión aproximada de 8632.07 km<sup>2</sup>. En la figura 6 se puede apreciar el área obtenida a partir del MCA de los sitios no óptimos, medianamente óptimos y óptimos dentro de la zona de estudio.

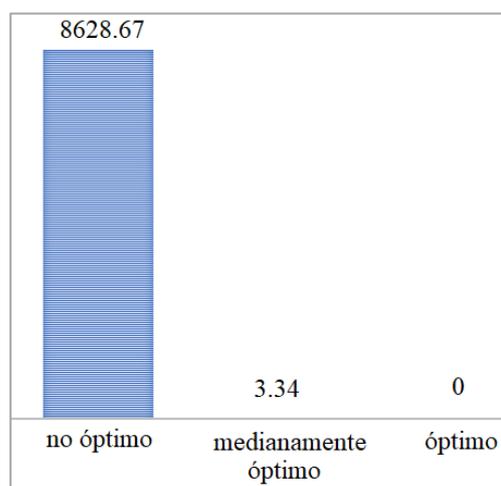


Figura 6: Área para emplazamiento de CSF dentro de la Provincia del Azuay.

Para establecer sitios medianamente óptimos se tomó en cuenta los valores de píxel en un rango entre 0.5 y 0.75 estableciendo como sitios medianamente óptimos. Dentro de los sitios medianamente óptimos se tomó en cuenta las coordenadas del punto medio del área. En la tabla 8 se pueden apreciar los resultados correspondientes al área A y B, con la consideración de los puntos en los que el área es superior a 1 km<sup>2</sup>.

Tabla 8: Resumen de los sitios medianamente óptimos.

punto	longitud	latitud	altura (msnm)	cantón	área (km <sup>2</sup> )
A	727219.88	9656704.31	3002	Cuenca	1.17
B	727999.38	9658243.83	2964	Cuenca	1.67

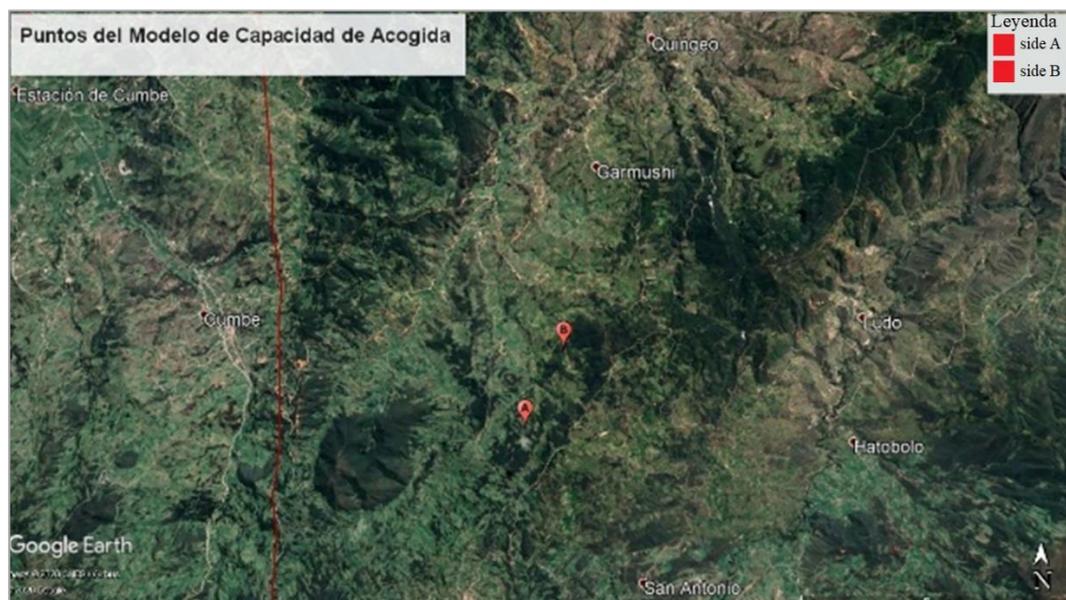


Figura 7. Puntos medianamente óptimos del modelo de capacidad de acogida.

En la figura 7, se observan los sitios medianamente óptimos para el emplazamiento de CSF.

En el presente estudio se puede observar que la Provincia del Azuay no alcanza los criterios necesarios para la instalación de CSF. A pesar que Cevallos y Ramos (Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018) expresan en sus resultados que la Región Andina del Ecuador es un lugar óptimo para el emplazamiento de CSF. Según la metodología planteada en esta investigación, se determina que la Provincia del Azuay no cumple con todas las características necesarias para un despliegue a gran escala de energía fotovoltaica.

## 4 Conclusiones

Al integrar los modelos anteriores se realizó la evaluación de tres escenarios para determinar el mejor MCA. En este caso, el escenario dos presentó como resultado una mayor cantidad de valores positivos en los que existen más opciones positivas. Es decir, más localizaciones potencialmente utilizables para la instalación de CSF. El escenario dos representa valores mayores a 0.5 considerando áreas medianamente optimas; sin embargo, no se obtienen valores mayores a 0.75 considerados como óptimos para el monitoreo y el posterior emplazamiento de CSF. Por lo que se considera que la provincia del Azuay no es un sitio idóneo para la implementación de estas tecnologías.

## Conflicto de Interés

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

## Referencias

- Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (2015). *Regulación 004/15*. Recuperado de <http://www.regulacioneolica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/11/004.pdf>
- Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (2018). *Resolución Nro. Arconel-057/18*. Recuperado de <https://www.regulacioneolica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/01/Reforma-a-la-Regulacion-Microgeneracion.pdf>
- Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (2020). *Balance Nacional de Energía Eléctrica*. Recuperado de <https://www.regulacioneolica.gob.ec/balance-nacional/>
- Aggarwal, R., & Singh, S. (2013). AHP and Extent Fuzzy AHP Approach for Prioritization of Performance Measurement Attributes. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, 7(1), 6–11. <https://doi.org/10.1108/IJEM-10-2016-0207>
- Al Garni, H., & 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>
- Aly, A., Jensen, S. S., & Pedersen, A. B. (2017). Solar power potential of Tanzania: Identifying CSP and PV hot spots through a GIS multicriteria decision making analysis. *Renewable Energy*, 113, 159–175. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.077>
- Aydin, N. Y., Kentel, E., & Sebnem Duzgun, H. (2013).

- GIS-based site selection methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from western Turkey. *Energy Conversion and Management*, 70, 90–106. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.02.004>
- Cevallos-Sierra, J., & Ramos-Martin, J. (2018). Spatial assessment of the potential of renewable energy: The case of Ecuador. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1154–1165. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.015>
- Charabi, Y., & Gastli, A. (2011). PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multicriteria evaluation. *Renewable Energy*, 36, 2554–2561. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.10.037>
- CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad). (2011). *Regulación N° 003/11* (p. 14). p. 14. Recuperado de [http://www.conelec.gob.ec/normativa/CONELEC\\_plazos.pdf](http://www.conelec.gob.ec/normativa/CONELEC_plazos.pdf)
- CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad). (2013). *Codificación Regulación 001/13* (pp. 1–23). pp. 1–23.
- Consejo Provincial del Azuay. (n.d.). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Azuay actualizado 2015-2030. Recuperado de [http://app.sni.gob.ec/sn-link/sni/PORTAL\\_SNI/data\\_sigad\\_plus/sigadplusedocumetofinal/0160000190001\\_PDyOT\\_AZUAY\\_2015\\_17-08-2015\\_10-02-34.pdf](http://app.sni.gob.ec/sn-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusedocumetofinal/0160000190001_PDyOT_AZUAY_2015_17-08-2015_10-02-34.pdf)
- de Paula, J., Salvador, R., Barros, M., Piekarski, C., da Luz, L., & de Francisco, A. (2020). A review on Multi-criteria Decision Analysis in the Life Cycle Assessment of Electricity Generation Systems. *International Business, Trade and Institutional Sustainability*, 575–590. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-26759-9\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26759-9_20)
- Fang, H., Li, J., & Song, W. (2018). Sustainable site selection for photovoltaic power plant: An integrated approach based on prospect theory. *Energy Conversion and Management*, 174, 755–768. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.092>
- Ghenai, C., Albawab, M., & Bettayeb, M. (2020). Sustainability indicators for renewable energy systems using multicriteria decision-making model and extended SWARA/ARAS hybrid method. *Renewable Energy*, 146, 580–597. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.157>
- Gutiérrez, J., & Velázquez, J. (2018). Metodología para la localización óptima de instalaciones de energía solar fotovoltaica en la Isla de Tenerife, España. *Congreso Nacional de Medio Ambiente 2018*. Madrid. España.
- Hashemizadeh, A., Ju, Y., & Dong, P. (2020). A combined geographical information system and Best–Worst Method approach for site selection for photovoltaic power plant projects. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17, 2027–2042. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02598-8>
- Koengkan, M., Poveda, Y. E., & Fuinhas, J. A. (2019). Globalisation as a motor of renewable energy development in Latin America countries. *GeoJournal*, 85, 1591–1602. <https://doi.org/10.1007/s10708-019-10042-0>
- Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multicriteria decision making to sustainable energy planning: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8, 365–381. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007>
- Rediske, G., Siluk, J. C. M., Michels, L., Rigo, P. D., Carmen, B., & Cugler, G. (2020). Multicriteria decision-making model for assessment of large photovoltaic farms in Brazil. *Energy*, 197. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.energy.2020.117167>
- Saaty, R. (1987). The analytic hierarchy process - what and how it is used. *Math Modelling*, 9, 161–176. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Sánchez-Lozano, J. M., Antunes, H., García-Cascales, M. S., & Días, L. C. (2014). GIS-based photovoltaic solar farms site selection using Electric-Tri: Evaluating the case for Torre Pacheco, Murcia, Southeast of Spain. *Renewable Energy*, 66, 478–494. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.038>
- Siksnylyte-Butkiene, I., Zavadskas, E., & Streimikiene, D. (2020). Multi-criteria decision-making (MCDM) for the assessment of renewable energy technologies in a household: A review. *Energies*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/en13051164>
- Torres-Pacheco, S., Jurado-Pérez, F., Granados-Lieberman, D., & Lozano-Luna, A. (2018). Eficiencia en paneles solares. *Revista Del Diseño Innovativo*, 2(2), 9–21.
- Xu, X., Wei, Z., Ji, Q., Wang, C., & Gao, G. (2019). Global renewable energy development: Influencing factors, trend predictions and countermeasures. *Resources Policy*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101470>