



**FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**“SELECCIÓN DE SITIOS IDÓNEOS PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS  
SOLARES FOTOVOLTAICOS DE GRAN ESCALA MEDIANTE ANÁLISIS  
MULTICRITERIO AHP - GIS”**

Tesis para optar el grado de:

**INGENIERO AMBIENTAL**

Presentado por:

**Bach. Roberts Anthony Rios Pereyra**

Número ORCID: 0000-0003-3168-0857

Asesor:


**Ing. Adolfo Rojas Álvarez**

Número ORCID: 0000-0003-4441-7839

Lima – Perú

2020

- Acta de Sustentación de Tesis



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

Lima, 21 de julio de 2020.

Los integrantes del Jurado de tesis:

Presidente: Mg. Franco Canziani Amico	<input type="checkbox"/>
Miembro: Mg. Ximena Guardia Muguruza	
Miembro: Ing. Aldo Manuel Rosas Gallegos	

Se reúnen para evaluar la tesis titulada:  
**SELECCIÓN DE SITIOS IDÓNEOS PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS SOLARES FOTOVOLTAICOS DE GRAN ESCALA MEDIANTE ANÁLISIS MULTICRITERIO AHP - GIS**

Presentada por el magister:

- Roberts Anthony Rios Pereyra

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental


Asesorado por:

- Ing. José Adolfo Rojas Alvarez

Luego de haber evaluado el informe final de tesis y evaluado el desempeño del estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental en la sustentación, concluyen de manera unánime ( X ) calificar a:


Tesis: Roberts Anthony Rios Pereyra	Nota (en letras): diecisiete
Aprobado ( )	Aprobado - Muy buena ( X )
Aprobado - Sobresaliente ( )	Desaprobado ( )

Los miembros del jurado firman en señal de conformidad.





---

**Mg. Franco Canziani Amico**  
Presidente del Jurado





---

**Ing. José Adolfo Rojas Alvarez**  
Asesor




---

**Mg. Ximena Guardia Muguruza**  
Miembro 1




---

**Ing. Aldo Manuel Rosas Gallegos**  
Miembro 2

T// (SIT) 610 6738  
 informes@cientificadupes.edu.pe  
 cientificadupes.edu.pe

## AGRADECIMIENTOS

Dedico y agradezco profundamente a mi familia (Roberts, Ivana, Elizabeth y Sahra), los cuales me apoyaron y alentaron siempre, con la paciencia y comprensión que ameritaba el caso. A mi abuela Myrna, la cual con su incondicional soporte y persistentes reclamos me empujó a culminar este trabajo. Promesa cumplida familia.

Agradezco a mi asesor Adolfo Rojas, el cual me brindó una chance de presentarle el proyecto y reconoció el potencial del mismo, ofreciéndose a asesorarme. Sus revisiones y consejos contribuyeron siempre. Un sincero agradecimiento a Ximena Guardia y a Abilio Solorzano, los cuales me apoyaron en las revisiones iniciales del proyecto. Por parte de la universidad, agradezco especialmente a Gonzalo Flores, por su constante aliento y predisposición a apoyar, así como a Susan Medina, Mirtha Nazario, Franco Canziani, Ingrid Rabitsch, Yesenia Huaripata y Yanina Calderón, quienes me brindaron su ayuda las veces que fueran necesarias.

Un especial agradecimiento a mi colega y prima Sandra Duarte, la cual hizo suyo el proyecto y me apoyó siempre en nuestras sesiones de coworking mediante la recopilación de información y en el modelamiento del proyecto.

## Contenidos

RESUMEN.....	3
ABSTRACT .....	4
ARTICULO ENVIADO A PUBLICAR .....	5
1. Introduction.....	9
2. Methods.....	11
3. Results and Discussion.....	33
4. Conclusions.....	56
ARTICULO ENVIADO A PUBLICAR (TRADUCCIÓN).....	67
1. Introducción.....	71
2. Métodos.....	74
3. Resultados y Discusión .....	93
4. Conclusiones.....	117
ANEXOS.....	128

## RESUMEN

El presente artículo detalla la metodología para la obtención de sitios idóneos para el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos de gran escala, mediante la combinación del análisis multicriterio y los sistemas de información geográfica (GIS) siendo esta la primera experiencia en el tema a nivel nacional. Se identificó y sistematizó información referente a 33 factores de restricción y 7 criterios, siendo estos últimos analizados mediante el método analítico jerárquico (AHP). Para la ponderación relativa de cada criterio se diseñó una encuesta, la cual fue administrada a expertos nacionales relacionados a las energías renovables y a la ejecución de proyectos solares.

El mapa final de idoneidad fue agrupado en cinco categorías: “Altamente Adecuado”, “Muy Adecuado”, “Adecuado”, “Marginalmente Adecuado” e “Inadecuado”. Como resultado, se obtuvo que el 69.52% del país fue excluido del análisis AHP, con alrededor del 22 257 km<sup>2</sup> del área restante consideradas zonas de alto potencial al ser “Altamente Adecuadas” (0.09%) o “Muy Adecuadas” (5.55%), ubicándose en zonas adyacentes al sistema de transmisión en la región sur, así como en la costa norte y central del país. El contraste con la ubicación de las instalaciones fotovoltaicas de gran escala ya operativas y los análisis de sensibilidad realizados brindaron confianza a los resultados. La metodología utilizada permite su mejora en el tiempo, así como la intervención de grupos de interés y su replicabilidad para otros sistemas energéticos renovables.

## ABSTRACT

This article details the methodology for obtaining suitable sites for the development of large-scale photovoltaic solar projects, through the combination of multi-criteria analysis and Geographic Information Systems (GIS), being this the first experience on the subject nationwide. Information regarding 33 restriction factors and 7 criteria were identified and systematized, with the criteria being analyzed using the Analytical Hierarchy Process (AHP). To obtain the relative weight of each criterion, a survey was designed, which was administered to national experts related to renewable energies and solar projects.

The final suitability map was grouped into five categories: “Highly Adequate”, “Very Adequate”, “Adequate”, “Marginally Adequate” and “Inadequate”. As a result, it was obtained that 69.52% of the country was excluded from the AHP analysis, with around 22 257 km<sup>2</sup> of the remaining area considered areas of high potential as “Highly Adequate” (0.09%) or “Very Adequate” (5.55%), being located in areas adjacent to the transmission system in the southern region, as well as in the north and central coast of the country. The comparison with the location of the large-scale photovoltaic installations already operational and the sensitivity analysis performed gave confidence to the results. The methodology used allows its improvement over time, as well as the intervention of stakeholders and its replicability for others renewable energy systems.

## ARTICULO ENVIADO A PUBLICAR

### Selection of Ideal Sites for the development of Solar Photovoltaic projects through Analytical Hierarchical Process (AHP) – GIS in Peru

Roberts Rios Pereyra<sup>1\*</sup>, Sandra Duarte Guardia<sup>1,2</sup>

1. Universidad Científica del Sur, Facultad de Ciencias Ambientales, Panamericana Sur Km 19, Villa, Lima, Perú.
2. Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA), (9400) Río Gallegos, Santa Cruz, Argentina

Journal: Renewable & Sustainable Energy Reviews

Journal Link: <https://www.journals.elsevier.com/renewable-and-sustainable-energy-reviews>

\*Corresponding author: roberts.rios.p@gmail.com

#### Abstract

Considering the growing energy demand and the effects of climate change, the proper selection of sites for the installation of clean technology projects takes on a special importance, especially in Peru, a mega-diverse country with high potential for the exploitation of renewable resources and with the urgent need of protecting their natural heritage.

This article details the methodology for obtaining suitable sites for the development of large-scale photovoltaic solar projects, through the combination of multi-criteria analysis and Geographic Information Systems (GIS), being this the first experience on the subject nationwide. Information regarding 33 restriction factors and 7 criteria were identified and systematized, with the criteria being analyzed using the Analytical Hierarchy Process (AHP). To obtain the relative weight of each criterion, a survey was designed, which was administered to national experts related to renewable energies and solar projects.

The final suitability map was grouped into five categories: “Highly Adequate”, “Very Adequate”, “Adequate”, “Marginally Adequate” and “Inadequate”. As a result, it was obtained that 69.52% of the country was excluded from the AHP analysis, with around 22 257 km<sup>2</sup> of the remaining area considered areas of high potential as “Highly Adequate” (0.09%) or “Very Adequate” (5.55%), being located in areas adjacent to the transmission system in the southern region, as well as in the north and central coast of the country. The comparison with the location of the large-scale photovoltaic installations already operational and the sensitivity analysis performed gave confidence to the results. The methodology used allows its improvement over time, as well as the intervention of stakeholders and its replicability for others renewable energy systems.

**Highlights:**

- First experience identifying suitable sites for PVPP in Peru with MCDM technique
- AHP combined with GIS used to asses climate, topographic, and technical criteria
- 69.52% of Peru was considered restricted area as a way to protect the ecosystems
- Approximately 22 257 km<sup>2</sup> were high potential areas for large scale PVPP
- Good correlation between potentially suitable areas and current PVPP installations

**Keywords:** *Analytical hierarchy process; Geographic information system; Multi-criteria decision making; Site selection; Photovoltaic solar plant; Renewable energy; Peru*

**Word Count:** 6265

**List of acronyms including units and nomenclature:**

AHP: Analytical Hierarchical Process

ANA: National Water Authority of Peru

AVNB: Non-forested Plant Associations

CGIAR-CSI: CGIAR Consortium for Spatial Information

CO<sub>2</sub>: Carbon Dioxide

DEM: Digital Elevation Model



DHI: Diffuse Horizontal Irradiance

DNI: Direct Normal Irradiance

ESMAP: Energy Sector Management Assistance Program

GHI: Global Horizontal Irradiance

GIS: Geographic Information System

Gt: Gigatonne

GWh/year: Gigawatt-hour per year

IDEP: Space Data Infrastructure of Peru

IGN: National Geographical Institute of Peru

INGEMMET: Geological Mining and Metallurgical Institute of Peru

IRENA: International Renewable Energy Agency

kWh/m<sup>2</sup>: Kilowatt-hour per meter square

m<sup>2</sup>: Meters square

MCDM: Multi-Criteria Decision Making

MINAM: Ministry of Environment of Peru

MINCUL: Ministry of Culture of Peru

MINEM: Ministry of Energy and Mines of Peru

MTC: Ministry of Transportation and Communications of Peru

MW: Megawatt

NIMBY: Not In My Backyard

NREL: US National Renewable Energy Laboratory

OSINERGMIN: Supervisory Agency of Investment of Energy and Mining of Peru

PFDM: Different Forest products from Wood

PIACI: Native or Indigenous People in Isolation and Initial Contact

PVPP: Photovoltaic Power Plant

RER: Renewable Energy Resource

SEIN: National Interconnected Electric System of Peru

SERFOR: National Forestry and Wildlife Service of Peru

SERNANP: National Service of Natural Areas Protected by the State of Peru

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

## 1. Introduction

Historically, energy generation in the world has been conditioned on the extraction and usage of natural resources provided by the environment, especially petroleum-derived products, which since the 1960s have been the source of 80% of the global energy produced [1].

However, the accelerated and rampant increase in global energy demand, which projects to require 25% more energy by 2040 [2], as well as negative externalities attributed to climate change, related to greenhouse gas emissions (with a growth of 2.7% reaching the historical record of  $37.1 \pm 2$  Gt of CO<sub>2</sub> in 2018) [3] and global temperature (Nine of the ten warmest years ever recorded having occurred since 2005, and the years between 2014 and 2018 being the warmest recorded) [4]; and the gradual and sustained depletion of non-renewable fossil resources, with sufficient proven reserves (as of 2017 and ensuring the same levels of global production) of oil, natural gas and coal to supply 50.2, 52.6 y 134 years , respectively [5], have forced our society to question the current model regarding the management of natural and energy resources.

At the national level this is no exception. While the average annual share of renewable energy resources exceeded 5% of electricity production in Peru for the first time since 2017 [6], complying with current national regulations; it is important to recognize the need to accelerate the process of energy matrix diversification [7] [8], further developing projects associated with clean and renewable technologies (which should reach up to 20% of the supply of energy generation by 2040) [1], which would allow us to reduce our dependence on fossil fuels harmful to the environment.

Taking into account Peru's enormous renewable energy potential [9], especially those related to the use of solar energy, photovoltaic systems are becoming increasingly attractive to both investors and the government sector, considering a) its low CO<sub>2</sub> emissions throughout its lifecycle and the pollution and mortality levels associated with this [10], b) continued advances and technology's maturity [11], c) the advancement of economies of scale in manufacturing processes [12] and d) their continued price reduction [13], which currently allow them to be

directly competitive with electricity production costs (at or in some cases below) from conventional sources [14] [15] [16].

Within the framework of large-scale photovoltaic solar plants (usually at least 5 MW), siting or site selection is a complex and decisive step in ensuring the viability of the project [17], being one of the first tangible steps in the investment of the project. Commonly, it proceeds to identify possible restrictions and analyze multiple factors in the selected area and their impacts on the cost of electricity to be generated, taking into account physical, environmental and socioeconomic considerations [18] such as climate and local irradiance, land availability, network-accessible interconnections, national regulatory framework, among others; allowing us to determine the total available area with the maximum annual electricity possible production and profitability [19].

One of the most recently used tools for analysis and planning of energy resources is the mapping of areas through Geographic Information Systems (GIS), since it facilitates the management and visualization of multiple spatial patterns simultaneously, optimizing the beneficial characteristics of the selected sites and minimizing the negatives ones [20] [21] [22].

In turn, and considering that it is necessary to use various criteria for project site selection, the application of GIS in combination with Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods has gained popularity in the management of energy projects. Reviews of the different MCDM techniques for applications related to sustainable and energy development have been carried out in several researches [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31], especially in the case of photovoltaic solar plants [32] [33] [34], considering the Analytical Hierarchical Process (AHP) one of the most important and used techniques for the selection of areas with the greatest usable solar potential [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44] [45] [46].

While such studies have become more popular and have been conducted more frequently, they have been concentrated in Europe, North America, the Middle East and Asia [27] [28] [29] [42], being mostly applied to small geographic areas of study (from regions to districts within provinces) [38]. In South America, studies using MCDM methodologies have been conducted in Ecuador [47] [48] [49], Colombia [50] [51] and Chile [52]. In addition, the International

Renewable Energy Agency (IRENA), under the context of finding investment opportunities at continental levels in 2016 [53] [54], developed an suitability approach for solar and wind systems, recommending to replicate this type of analysis at the country level with more detailed local information. Our literature review does not reveal studies based on GIS-AHP techniques for the selection of suitable investment zones in renewable technologies at any geographical level in Peru, becoming this research its first contribution in the subject.

In addition, the study will contribute to strengthening the energy knowledge in the country through the implementation of a methodology which is replicable for this and other renewable technologies (whenever the respective constraints, criteria and hierarchical weights are identified), as well as applicable at different geographical levels; providing relevant information to public officials and decision makers for strategic resource planning in their localities, and to project formulators, allowing them to focus their efforts on appropriate areas that already have systematized and analyzed information.

In this article, we first proceed to systematize a database of GIS layers or shapefiles, acquired through public access portals of national government organizations, and in some specific cases, from international organizations. The restriction factors (33) and criteria (7) are then selected, the latter being processed through the AHP methodology. Finally, using the GIS tools and the hierarchical criteria, a final suitability map was created, in which areas in the national territory are differentiated as "Highly Adequate", "Very Adequate", "Adequate", "Marginally Adequate" and "Inadequate" for the development of large-scale photovoltaic solar projects.

## **2. Methodology**

### **2.1. Study Area**

Located in the central western part of South America, between the parallels  $0^{\circ} 01' 48''$  y  $18^{\circ} 21' 03''$  south latitude and meridians  $68^{\circ} 39' 27''$  y  $81^{\circ} 19' 05''$  west latitude, and with an extension of  $1\,285\,215.60\text{ km}^2$ , Peru is a country of contrasts, privileged in diversity of landscapes, biomes and ecosystems throughout its territory due to the interrelationship of geographical, oceanographic, climatic, ecological factors, among others [55].

Thus, the country is characterized by the presence of a coastal region (11.74% of the national territory) deserted, semi-arid, relatively flat and rising up to an altitude limit of approximately 1000 meters; the sierra region, containing the world's longest tropical mountain range with elevations of up to more than 6000 meters, with inter-andean valleys, plateaus, punas, slopes and snowfall typical in the area, as well as significant mineral deposits (28% of the national extension); and the Amazon rainforest, the widest region (58.9% of the national total) and rich in oil and forest resources, constituted of flat territory with forest-covered slopes, eastern slopes and Andean buttresses, with altitudes from 500 to 2500 meters above sea level (high forest) or plains below 500 meters (low forest) [55] [56].

Due to its proximity to the equatorial line, Peru has a high exposure to solar irradiation, evidenced by the levels received throughout the year which in most of the territory reach  $5 \pm 1$  kWh/m<sup>2</sup> daily, with the southern coast being (16° to 18° S) the area of greatest potential with 6 - 6,5 kWh/m<sup>2</sup> on average [57]. As of 2018, national energy auctions have allowed the installation of 7 photovoltaic solar power plants with a total nominal installed power of 280.48 MW, generating 745.2 GWh/year (corresponding to 20% of the country's renewable energy share or 1.47% of the national's electricity production) [58].

Thus, while Peru's geography presents enormous challenges to the establishment of energy investment projects due to their particular characteristics, it also reflects a huge potential for growth and development in the solar sector, provided that the selection of sites is carried out systematically, with specific information, at scale and representative of its reality.

## 2.2. Analytical Hierarchical Process (AHP)

Scientists and researchers have used the AHP method, based on its multiple advantages [59] to solve complex operations, selecting appropriate alternatives that consider different criteria and restrictions specific to the area and/or sector studied. Thus, it can be seen as a formal, robust and flexible method for decision-making, using the information and experiences acquired by different participants (stakeholders, politicians, project managers, experts, among others), under a rational and explicit process [60].

First developed by Thomas L. Saaty in 1971-1975 [61] [62], this mathematical model determines the relative importance or preference of multiple variables through so-called "pairwise comparisons", further allowing to validate the consistency of the decision taken and reduce any bias and inconsistency incurred in the process.

The following are the steps required to carry out an AHP analysis for  $n$  criteria:

- (1) In the first stage of "Modeling", the goal of the study, criteria and restrictions are defined. The criteria should represent the problem in the most complete way possible [59], being able to be measured and quantified (either numerically or subjectively).
- (2) Secondly, a "Valuation" process is carried out, in which each of the selected criteria is sorted and weighted according to their assigned importance. This is done through a pairwise comparison matrix which is defined by  $(n \times n)$ , in which each criterion  $i$  is compared in relation to each criterion  $j$  as shown in Table 1. For the comparisons, the value scale suggested by Saaty [62] is used, applying the nine integer values presented in Table 2.

**Table 1**  
Comparison Pairwise Matrix of selected criteria

	Criterion i	Criterion j	Criterion k
Criterion i	1	Criterion ij	Criterion ik
Criterion j	Criterion ji	1	Criterion jk
Criterion k	Criterion ki	Criterion kj	1

**Table 2**  
Preference score according to Saaty's scale [63]

Intensity	Definition	Explanation
1	Same importance	Two criteria contribute equally to the objectives
3	Weak/moderate importance	Experience and judgement slightly favor one criteria above the other
5	Essential/strong importance	Experience and judgement strongly favor one criteria above the other
7	Very strong or shown importance	One criteria is favored very strongly above the other; its dominance is demonstrated in practice
9	Absolute importance	The evidence favoring one criteria above the other is of the highest possible order of affirmation
2, 4, 6, 8	Intermediate values	Represent compromise when needed
	Reciprocal values	If criteria $i$ has an assigned number compared to criteria $j$ , then $j$ will have the reciprocal value when compared to criteria $i$

(3) In the process of "Prioritization and Synthesis", the importance or priority of each element is processed. For this, it is necessary to create a normalized pairwise comparison matrix, which is achieved using Equation 1 for each input in the matrix, with  $n$  being the number of criteria selected.

**Equation 1**

$$\overline{Criterion}_{ij} = \frac{Criterion_{ij}}{\sum_{i=1}^n Criterion_{ij}}$$

Next, the average of each row is tallied using Equation 2 to get the priority vector or relative criteria weight ( $w$ ). Thus, the priority vector for each element would be a value within 0-1; where a value close to the unit demonstrates a higher impact of a criterion on the choice of site for a photovoltaic installation.



**Equation 2**

$$w_i = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{\text{Criterion}_{ij}}}{n}$$

Finally, Equation 3 is used to obtain the suitability scores. Thus, for each pixel of the study area, a criterion value ( $x_i$ ) is assigned in an appropriate scale, which is multiplied by each relative weight ( $w_i$ ) of the identified criteria. The summation of all the suitability scores data would depict the suitability map.

**Equation 3**

$$\text{Suitability Score} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i$$

- (4) Considering the inconsistencies due to the participation of various value judgments, Saaty developed a method of evaluating them through the "Consistency Analysis". First, the consistency index ( $CI$ ) is determined using Equation 4, where  $\lambda_{max}$  is the maximum eigenvalue of the pairwise comparison matrix and  $n$  being the matrix size.  $\lambda_{max}$  is determined by the consistency vector, which is calculated by dividing the weighted sum vector (by multiplying the priority vector with each result in the pairwise matrix) by its own criterion weight [64].

**Equation 4**

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

Lastly, the consistency ratio ( $CR$ ) is resolved through Equation 5, where  $RI$  (Table 3) is a random consistency value which varies according to the size of the matrix. If  $CR$  is below 10% ( $CR < 0.10$ ), the pairwise comparison matrix complies with the consistency analysis and can be taken into account.

**Equation 5**

$$CR = CI/RI$$

**Table 3**  
Random Index values for different values of matrix size [62]

Matrix size	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

### 2.3. Process Description

The proposed methodology for the study is detailed in Figure 1. The layer or shapefile information was acquired from various free sources, taking priority those obtained from national government entities, either through their institutional web portals (through public access) or requests to officials who manage this information. If a particular layer deemed necessary was not accessible at the time of the study, the search and usage of relevant information from international organizations or other sources of information was carried out.

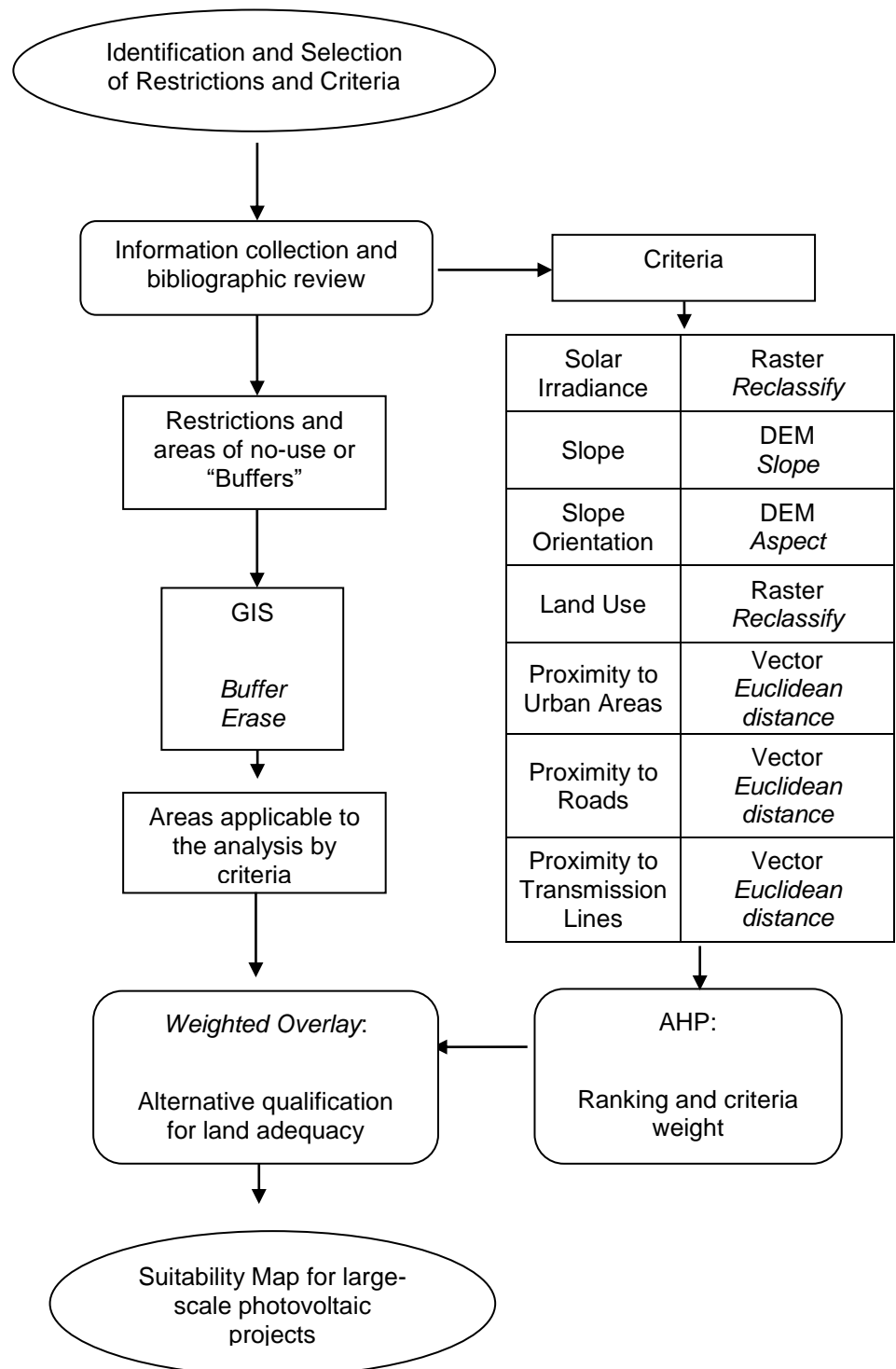


Fig.1. Proposed methodology for the study

A four-stage analysis process was used [36]:

- (1) In the first stage, different layers of restrictions are applied to a national territory base-map with GIS, determining the areas to be excluded as well as the remaining ones in which photovoltaic projects can be developed.
- (2) The AHP technique is applied to the criteria at the second stage to determine its influence and establish a ranking among each other. Considering the need to reduce conflicts of interest and personal prejudice [37] [65], a survey was designed and administered to specialists related to solar energy and energy projects, with the aim of incorporating their knowledge and expertise in the AHP method, specifically in the relative weighting of criteria through the filling of paired comparison matrix.

Seeking to assess the degree of consistency between expert opinions, Kendall's concordance coefficient is used [66]. The coefficient  $W$  is between zero and the unit, with values from 0 to 0.2 being non-consistent opinions, from 0.2 to 0.4 poorly consistent conclusions, from 0.4 to 0.6 moderately consistent results, from 0.6 to 0.8 fairly consistent, from 0.8 to 0.9 highly consistent and from 0.9 to 1 entirely consistent [64].

In Equation 6,  $S$  represents the square sum of the values  $R_i$ , with  $\bar{R}$  being the average value of  $R_i$  (Equation 7);  $m$  is the number of respondents,  $n$  the number of criteria surveyed and  $T$  the correction factor when we encounter identical opinions, where  $t_k$  is the number of rankings matched in each ( $k$ ) of  $g$  groups of connected factors or pairs (Equation 8).

**Equation 6**

$$W = \frac{12 S}{m^2(n^3 - n) - mT}$$

**Equation 7**

$$S = \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2$$

**Equation 8**

$$T = \sum_{k=1}^g (t_k^3 - t_k)$$

The results of the surveys are consolidated into a general matrix, which was used for the next stages of the AHP analysis. The final survey submitted (in Spanish) is presented in Annex 1.

- (3) In the third stage, the weighted overlay function in GIS is used, in which the different numbering ranges of the criteria are homogenized, taking into account the input values of the criteria and the importance of each of them. Thus, the process reclassifies the input values to an alternative or preferred scale ranging from 1 to 5 according to Table 4, multiplies these cell values by the relative weights of the criteria obtained in the AHP method, and finally sums the cell values to produce an integrated output raster.

**Table 4**  
Suitability map scale

Scale (x <sub>i</sub> )	Category
1	Inadequate
2	Marginally Adequate
3	Adequate
4	Very Adequate
5	Highly Adequate

- (4) Considering the final map of restrictions and its viable remaining areas, a suitability map is developed, in order to picture graphically the spatial distribution of potential sites at the national level for the installation of large-scale photovoltaic projects. Finally, to delimit specific polygons with the area required for the aforementioned installation, it is assumed that 18 000 m<sup>2</sup> are needed to produce approximately 1 MW of power as used in Al Garni & Awasthi [36]; and that with the exception of one, all solar power plants

(belonging to the designation of renewable energy resources or RER) that are in operation nationwide have at least 16 MW of effective power [67], projects of 100 MW will be considered according to its viability by economy of scale, as well as by the statistics of applications for temporary concessions for photovoltaic projects over the past 5 years [68].

In this study, ESRI's ArcGIS version 10.5 (which supports vector and raster-level information) was used to display the information obtained, as well as to derive, process, edit, and/or generate new information in the form of layers, through the use of ArcToolbox.

### **2.3.1. Restrictions**

They represent areas in which the installation and development of large-scale photovoltaic projects is not possible, these being excluded from the suitability analysis due to their special protection, their use for purposes considered more important or due to their nature that cannot be considered for the construction of infrastructure [39], among others to be considered according to the specific characteristics of the study area.

The choice of restrictions was made through the bibliographic review carried out, interviews with national specialists, and additionally, if applicable, the provisions of the current national regulations. In addition, consideration was made of both the availability of information as well as the geographical scope of the layers available.

For most layers of restrictions (environmental, social and technical in nature) in the study were taken into account additional restricted areas or "buffers" immediate to their borders, choosing their extension according to a conservative analysis (the largest extent found) of the bibliographic review and conversations with experts in the respective subject matter.

Table 5 details the variables, sources, as well as the research that underpins these restrictions and which were taken in this study as references.

### 2.3.2. Criteria

They are defined as observable and measurable aspects of nature, making them possible to be characterized, and in turn quantify alternatives with them [63]. It is the set of information that influences the proper location of photovoltaic projects.

Like the restrictions, the criteria were carefully selected considering the literature review, being reaffirmed through interviews and surveys of local experts in the field of renewable energies (especially solar photovoltaic) and the design and implementation of investment projects. Thus, seven criteria classified in climate, topographic and technical-economic were defined to solve the problem, which are detailed in Table 6.

Yushchenko *et al.* [42] conclude that while there is little variation in the choice of restrictions, the selection of criteria and their hierarchy differs considerably between studies, detailing the particular characteristics of each area, the criterion of the evaluators and the availability of information as some of the reasons.

**Table 5**  
Restrictions used in the study

Category	Variable (Layer)	Buffer	Source	References
Environmental	Natural Protected Areas, Regional Conservation Areas, Private Conservation Areas, Buffer Zones	-	Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP)  <a href="http://geo.sernanp.gob.pe/geoserver/principal.php">http://geo.sernanp.gob.pe/geoserver/principal.php</a>	[32], [35], [37], [40], [44], [62], [63], [71]
	Fragile Ecosystems	No less than 1000 m.		
	Permanent Production Forests	No less than 1000 m.		
	Protecting Forest	No less than 1000 m.	Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR)  <a href="https://geo.serfor.gob.pe/visor/">https://geo.serfor.gob.pe/visor/</a>	[32], [35], [37], [40], [44], [62], [63], [71]
	Forest Concessions	-		
	Local Forest	-		
	Reserve Forest Cover	-		



Land-use Change for Agricultural purposes	-		
Forest Permits	-		
Transfers in Use	-		
Authorizations of PFDM in AVNB	-		
Autoridad Nacional del Agua (ANA)			
Water bodies (Lotic and lentic)	No less than 1000 m.	<a href="http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/364c4775-cf00-4e16-9d34-b48341fce30e">http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/364c4775-cf00-4e16-9d34-b48341fce30e</a> <a href="http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/7edf9bc8-98c5-4cbd-9727-afbdeee5b9ce">http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/7edf9bc8-98c5-4cbd-9727-afbdeee5b9ce</a>	
Autoridad Nacional del Agua (ANA)			
Glaciers and glacial lagoons	No less than 1000 m.	<a href="http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/1099ce9e-bd97-49c1-a32a-2eccb35fcf79">http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/1099ce9e-bd97-49c1-a32a-2eccb35fcf79</a> <a href="http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/6d825533-5346-421a-9c2b-308c10d3422f">http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/6d825533-5346-421a-9c2b-308c10d3422f</a>	[32], [37], [40], [69], [72], [73], [74]
Wetlands	No less than	Autoridad Nacional del Agua (ANA)	

		1000 m.	<a href="http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/1d4a7f3a-585a-49f5-85a7-6b652f8cc80d">http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/1d4a7f3a-585a-49f5-85a7-6b652f8cc80d</a>	
Social	Pre-Hispanic Archaeological Monuments	No less than 1000 m.		
	World Heritage sites	No less than 1000 m.	Ministerio de Cultura (MINCUL) <a href="https://geocultura.cultura.gob.pe/#">https://geocultura.cultura.gob.pe/#</a>	[32], [36,44,70]
	PIACI Reserves	-		
	Urban Areas	No less than 1000 m.	Instituto Geográfico Nacional (IGN) <a href="https://www.idep.gob.pe/geovisor/DatosFundamentales/">https://www.idep.gob.pe/geovisor/DatosFundamentales/</a>	[32], [36], [37], [38], [40], [42], [44], [45], [69], [70], [74], [75]
Technical	Roads (National Road Network)	No less than 1000 m.		
	Roads (Departmental Road Network)	No less than 1000 m.	Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) <a href="https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/descarga.html">https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/descarga.html</a>	[32], [35], [36], [37], [40], [69], [75], [70], [73], [74]
	Roads (Local Road Network)	No less than 1000 m.		

---

Ground Transportation Terminals, Rail Lines and Stations, Port Facilities	No less than 1000 m.
---	-------------------------

---

Airfields	No less than 5000 m.
-----------	-------------------------

---

Camisea Gas Infrastructure	No less than 1000 m.
----------------------------	-------------------------

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET)

---

Nor Peruvian Pipeline	No less than 1000 m.
-----------------------	-------------------------

---

<http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>

**Table 6**  
Criteria selected for the installation of photovoltaic projects

Category	Criteria	Source	Scale	Adequacy Ranking	References
Climate	Solar Irradiance (kWh/m <sup>2</sup> /day)	World Bank – Solargis Project  <a href="https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/peru">https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/peru</a>	1 km	(5) > 6.4	[32], [35], [37],
				(4) 5.6 - 6.4	[38], [39], [40],
				(3) 4.8 - 5.6	[42], [45], [46],
				(2) 4 - 4.8	[52], [71], [69],
				(1) < 4	[75], [76], [77], [73], [78]
Topographic and Land Use	Slope (%)	Digital Elevation Model (DEM)  CGIAR CSI SRTM – NASA  <a href="http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/">http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/</a>	90 m	(5) < 1	[32], [35], [37],
				(4) 1 - 3	[39], [40], [41],
				(3) 3 - 5	[45], [69], [70],
				(2) 5 - 10	[76], [77], [73],
				(1) > 10	[79]
	Slope		(5) North	[35], [39], [40],	
	Orientation (Aspect)		(4) Northeast and Northwest	[41], [45], [46], [79]	

				(3) East and West	
				(2) Southeast y Southwest	
				(1) South	
				(5) Protection Lands "X"	
				(4) Pasture Land "P"	
				(3) Mosaics "AP" y "AX"	[32], [35], [37],
				(2) Land Suitable for Clean Cultivation "A" and Mosaics with Land Suitable for Permanent Crops "AC"	[38], [39], [40], [45], [52], [70], [76], [79]
				(1) Land for Forest Production "F"	
				(5) < 1	[37], [38], [40],
				(4) 1 - 5	[41], [42], [45],
				(3) 5 - 10	[46], [52], [69],
				(2) 10 - 20	[75], [70], [77],
				(1) > 20	[73]
Land Use (Type)	Ministerio del Ambiente (MINAM) y Ministerio de Agricultura (MINAGRI) Mapa de Capacidad de Uso Mayor (Land Use Map)		National		
Technical - Economical	Proximity to Urban Areas (km)	Instituto Geográfico Nacional (IGN) <a href="https://www.idep.gob.pe/geovisor/DatosFundamentales/">https://www.idep.gob.pe/geovisor/DatosFundamentales/</a>	National		

Proximity to Roads (km)	Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC)  <a href="https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/descarga.html">https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/descarga.html</a>	National	(5) < 0.1	[32], [35], [37],
			(4) 0.1 - 1	[38], [40], [41],
			(3) 1 - 3	[42], [45], [46],
			(2) 3 - 5	[52], [69], [75],
			(1) > 5	[70], [76], [77], [73]
Proximity to Transmission Lines (km)	Ministerio de Energía y Minas (MINEM)  <a href="https://www.osinergmin.gob.pe/newweb/uploads/Publico/MapaSEIN/">https://www.osinergmin.gob.pe/newweb/uploads/Publico/MapaSEIN/</a>	National	(5) < 1	[32], [35], [37],
			(4) 1 - 2	[38], [40], [41],
			(3) 2 - 3	[42], [46], [52],
			(2) 3 - 5	[69], [75], [70],
			(1) > 5	[76], [77], [73]

### 2.3.2.1. Climate Criteria

Most cases studying solar projects consider solar irradiance as one of the most important selection criteria, being widely known that the higher irradiance available, the greater the possibility of electrical production. To ensure the economic solvency of photovoltaic installations, values between 4.6 kWh/m<sup>2</sup> [38] and 4.9 kWh/m<sup>2</sup> [35] of daily annual average have been considered ideal, varying according to different studies and/or regions [71].

Thus, global horizontal irradiance (GHI), defined as the total amount of radiation received horizontally on a surface, is profiled as the ideal criterion for projects comprising photovoltaic technologies, since these work in the presence of both direct normal irradiance (DNI), as well as diffuse horizontal irradiance (DHI) (the GHI being the sum of both components).

In this study, the solar resource information was acquired from Solargis, a project founded by the Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP) which prepared the information for publication by the World Bank. The information for the GHI was calculated with atmospheric and satellite information considering intervals of 10, 15 or 30 minutes (depending on the region), taking into account the effects of the terrain at a nominal spatial resolution of 250 m; and the raster layers were provided with spatial resolution of 1 km and long measurement period (1999 - 2015) [80]. The suitability classification ranges were adopted from the national solar radiation information of the Solar Energy Atlas [57] and Solargis [80], as well as the classification of the US National Renewable Energy Laboratory (NREL) [71].

While the ambient temperature is considered an important variable as it affects the performance of photovoltaic modules (high ambient temperatures increase the temperature of the cells, causing reduction in electricity production) [81] [82], and in regions with high environmental temperatures (greater than 30°C) modules are significantly affected [69], this study didn't consider it a criterion, taking into account that the country's average temperatures do not exceed these limits [83] [84].

### 2.3.2.2. Topographic and Land Use Criteria

Topographic criteria determine the spatial variability of solar irradiance, as changes in elevation, orientation (slope and appearance) and shadow projection have effects on the amount of sunlight received by different locations [75].

The presence of slopes affects the viability of projects by increasing investment costs related to requirements in land mobilization and leveling [17] [85], as well as problems related to stability, erosion and drainage [64]. Thus, flat or low slope areas are generally preferable. In addition, when considering the geographical position of the study area (southern hemisphere), slopes with north orientations are preferable, as they receive more irradiance throughout the year compared to the other cardinal points, in addition to allowing a more dense configuration of panels, without negative effects [86].

Whereas IRENA does not detail a consensual value as a threshold for sloped areas in large-scale photovoltaic projects [69], as well as the diversity of values found in the literature on the subject, with maximum ranges ranging from 3% [70] to 30% [76], a restriction value up to 10% slope has been chosen, with values greater than this unviable for study. In relation to orientation, northern surfaces were considered the most suitable aspect, with the northeast and northwest as the following in importance, until reaching the south orientation classified as inadequate.

The slope and orientation maps are derived from the digital elevation model (DEM) of the current database to date (fourth version) of NASA's Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), obtained from the CGIAR-CSI geoportal [87], applying spatial analysis tools contained in the GIS software. The resolution of the information is 90 m at the equator.

The land use criterion is one that requires further pre-evaluation in solar projects [37]. The vast majority of studies agree on arid and low-productivity lands as the most suitable for solar development [35] [38] [76], taking into account the need to protect areas for forest and agricultural purposes from possible degradation processes.



The provisions on the “Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor” (Regulation for Land Classification in terms of its Greater Use Capacity), approved by Supreme Decree in 2009 were considered [88], which at its highest level of abstraction has five classification categories according to the maximum vocation for land use. Protected lands, which do not meet minimum conditions for sustainable crop production or forest production, have been considered as the ideal classification in the study, as they can be used, among others, for production for the benefit of the state, socially and private. It is followed by pasture-friendly lands; lands suitable for clean and permanent crops (and their mosaics); with lands suitable for forest production the least suitable.

The soil use map was provided by the Ministry of the Environment (MINAM) as a vector layer, which was reclassified and converted into a raster with a resolution of 90 m.

### **2.3.2.3. Technical – Economical Criteria**

The technical-economic criteria in the study are valued based on the location and accessibility of the solar project, as they contribute to the construction and integration of the system to the national electricity grid. The proximity to road infrastructure and transmission systems, as well as its relationship with residential areas, allows to increase the economic viability of the project, considering that large distances to them could incur in higher civil costs and electrical losses [37].

The project's proximity to the road network avoids costs for the construction of new roads, as well as the environmental impacts derived from these [64], enabling the transport of components and human resources, and facilitating maintenance and repair operations [89]. To determine the level of terrain adequacy in the study, a value of 5 km was concluded as the maximum distance from the buffer set for the roads.

As for the transmission system, its remoteness from the project is associated with high construction costs because of the need for new lines and substations that can handle the high voltages and powers required in these large-scale projects [38] [44]. It was established as the upper limit of the most suitable class 1 km away; whereas a ceiling of 5 km was determined, taking into account the costs associated with each km of transmission line equal and/or greater

than 138 kV, as well as the maximum lengths of the transmission lines between the solar power plants and their supply substations in the country [67], in addition to the revised literature.

Short distances from solar projects to urban centers allow to shorten the distance between supply and electricity demand, thus reducing overloads in transmission and distribution networks, and decreasing losses and costs associated with electricity transportation [41] [45]. However, it is important to take into account the possible impacts that the project could have because of its proximity to the population (environmental pollution, impediment to population growth, NIMBY effect, among others) [40] [64] [77]. This would explain the wide variety of suitability ranges found in the literature. Currently in Peru, the sale of electricity to be consumed is not made directly to end users, being generated in the plants and sold to the National Interconnected Electric System (SEIN) for transmission and distribution. Thus, the study considers that the degree of adequacy of the lands is at maximum at the edge of the given buffer, and minimum 20 km from the buffer.

The vector layers of the national, departmental and local road network were obtained from the Ministry of Transport and Communications (MTC) [90] as of 2018; while information on transmission lines was obtained both from the Supervisory Agency for Investment in Energy and Mines (OSINERGMIN) [91], as well as from the Ministry of Energy and Mines (MINEM). Finally, the data of the urban areas was obtained from the Space Data Infrastructure of Peru (IDEP) [92], belonging to the National Geographical Institute (IGN), with 1:100 000 scale.

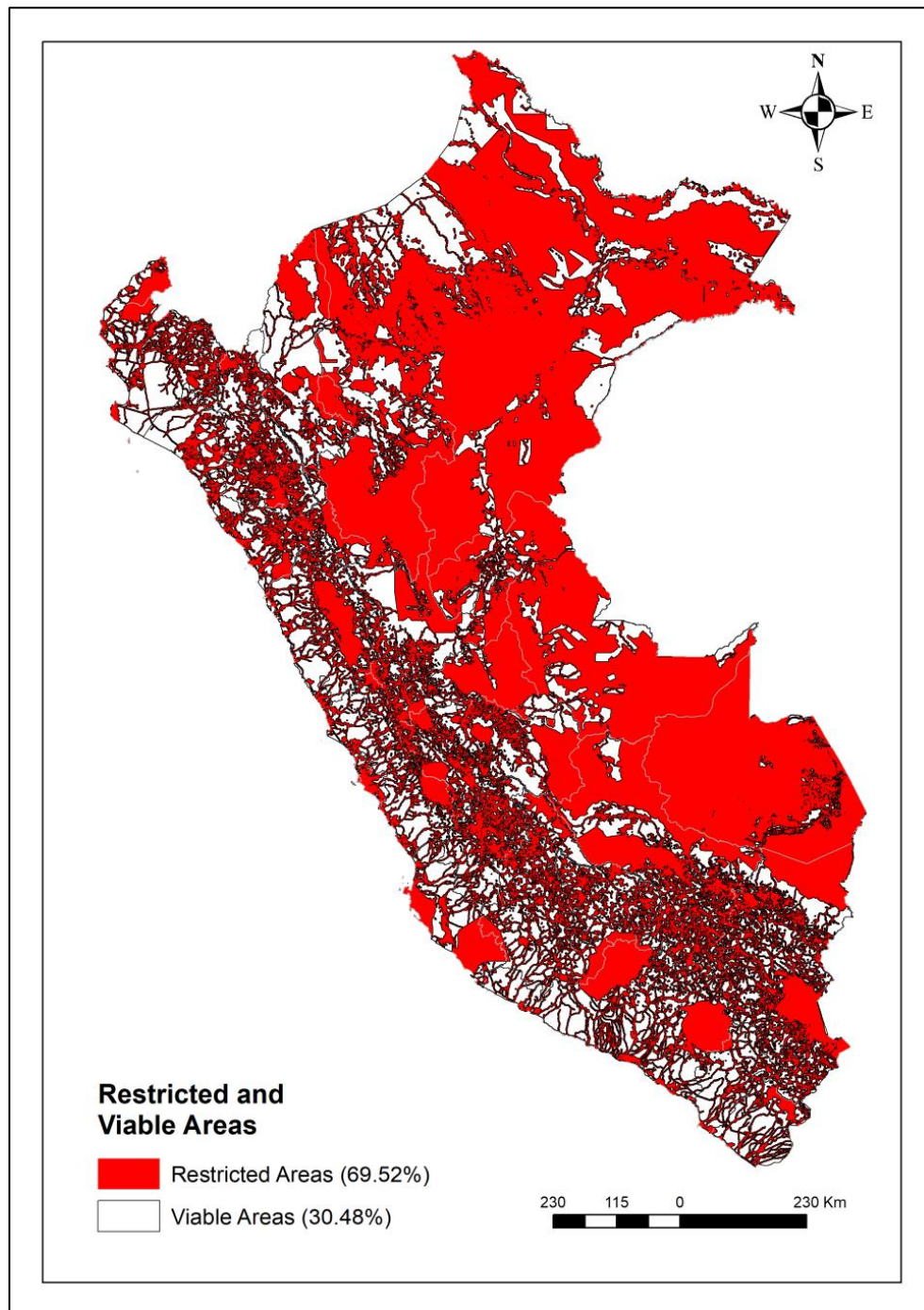
To determine the suitable areas in relation to the proximity and/or distance of the aforementioned structures, the Euclidean Distance operation is used, which describes the relationship of each cell to a given origin (object of interest), based on the distance between them through a straight line.

In relation to the distance to the bodies of water, this criterion was not used in the study because both experts and literature review confirm its minor importance in the choice of sites for photovoltaic projects [44].

### 3. Results and Discussion

#### 3.1 Restricted Areas

The results are shown in Figure 2, while information regarding restricted areas and percentages is detailed in Table 7 and Table 8.



**Fig. 2.** Restricted and Viable Areas

**Table 7**  
 Restricted Areas Information

Category	Official Source	Shapefile Used	Buffer (m)	Remaining Area (km <sup>2</sup> )	Viable Percentage Remaining (%)	Restricted Area Removed (%)	Accumulated Restricted Area (%)
<b>Peru's Area</b>				1294681.07	100	-	-
<b>Environmental</b>	<b>SERNANP</b>	Natural Protected Areas	-	1109787.67	85.72	14.28	14.28
		Reserve Zones	-	1103434.80	85.23	0.49	14.77
		Buffer Zones	-	964356.89	74.49	10.74	25.51
		Regional Conservation Areas	-	934459.08	72.18	2.31	27.82
		Private Conservation Areas	-	931143.59	71.92	0.26	28.08
		<b>Sum SERNANP</b>					<b>28.08</b>
	<b>SERFOR</b>	Fragile Ecosystems	1000	920382.79	71.09	0.83	28.91
		Permanent Production Forests	1000	756563.37	58.44	12.65	41.56
		Forest Concessions	-	743711.38	57.44	0.99	42.56
		Local Forest	-	743216.15	57.41	0.04	42.59

		Protecting Forest	1000	741653.61	57.28	0.12	42.72	
		Reserve Forest Cover	1000	741602.91	57.28	0.0039	42.72	
		Land-use Change for Agricultural purposes	-	741602.91	57.28	0.00	42.72	
		Forrestal Permits	-	741337.51	57.26	0.02	42.74	
		Transfers in Use	-	741336.79	57.26	0.000055	42.74	
		Authorizations of PFDM in AVNB	-	741246.28	57.25	0.0070	42.75	
		<b>Sum SERFOR</b>					<b>14.67</b>	<b>42.75</b>
	ANA	Lotic Bodies	1000	659516.53	50.94	6.31	49.06	
		Lentic Bodies	1000	654113.37	50.52	0.42	49.48	
		Glaciers	1000	651557.45	50.33	0.20	49.67	
		Glacial Lagoons	1000	636719.65	49.18	1.15	50.82	
		Wetlands	1000	552608.95	42.68	6.50	57.32	
			<b>Sum ANA</b>					<b>14.57</b>
<b>Total Environmental</b>							<b>57.32</b>	
<b>Social</b>	MINCUL	Pre-Hispanic Archaeological Monuments	1000	534346.30	41.27	1.41	58.73	

		World Heritage Sites	1000	529954.48	40.93	0.34	59.07		
		PIACI Reserves	-	529948.97	40.93	0.00043	59.07		
		<b>Sum MINCUL</b>					<b>1.75</b>	<b>59.07</b>	
	IGN	Urban Areas	1000	522153.01	40.33	0.60	59.67		
		<b>Sum Urban Areas</b>					<b>0.60</b>	<b>59.67</b>	
<b>Total Social</b>							<b>2.35</b>		
<b>Technical</b>	MTC	National Road Network	1000	500219.38	38.64	1.69	61.36		
		Departmental Road Network	1000	476808.45	36.83	1.81	63.17		
		Local Road Network	1000	397608.89	30.71	6.12	69.29		
		Ground Transportation Terminals	1000	397608.36	30.71	0.000041	69.29		
		Rail Lines	1000	397235.29	30.68	0.029	69.32		
		Rail Stations	1000	397235.09	30.68	0.000015	69.32		
		Port Facilities	1000	397228.49	30.68	0.00051	69.32		
		Airfields	5000	395410.68	30.54	0.14	69.46		
			<b>Sum MTC</b>					<b>9.79</b>	<b>69.46</b>
	INGEMMET	Gas Pipeline	1000	395130.99	30.52	0.022	69.48		
		Oil Pipeline	1000	394563.65	30.48	0.044	69.52		
		<b>Sum INGEMMET</b>					<b>0.065</b>	<b>69.52</b>	
<b>Total Technical</b>							<b>9.85</b>		

**Table 8**  
 Restricted Areas by Departments

Departments	Area (km <sup>2</sup> )	Remaining Area after Restrictions (km <sup>2</sup> )	Remaining Area (%)	Subtracted Area (%)
Amazonas	39574.51	20952.27	52.94	47.06
Ancash	35942.91	16752.48	46.61	53.39
Apurímac	21110.98	8570.65	40.60	59.40
Arequipa	63356.88	29545.65	46.63	53.37
Ayacucho	43534.18	19432.57	44.64	55.36
Cajamarca	33013.53	14425.47	43.70	56.30
Callao	160.92	24.71	15.35	84.65
Cusco	72368.68	18462.10	25.51	74.49
Huancavelica	22065.64	8938.26	40.51	59.49
Huánuco	37069.23	14958.05	40.35	59.65
Ica	21154.06	8483.11	40.10	59.90
Junín	44602.83	15419.86	34.57	65.43
La Libertad	25377.87	10198.71	40.19	59.81
Lambayeque	14373.63	8423.73	58.61	41.39
Lima	32338.36	16815.97	52.00	48.00
Lima Province	2706.08	760.40	28.10	71.90
Loreto	375629.12	84420.38	22.47	77.53
Madre de Dios	84868.03	2309.64	2.72	97.28
Moquegua	15820.77	9862.87	62.34	37.66
Pasco	23955.42	4491.97	18.75	81.25
Piura	36132.74	18970.68	52.50	47.50
Puno	73243.66	24611.92	33.60	66.40
San Martín	50377.72	8396.12	16.67	83.33
Tacna	16111.00	9179.88	56.98	43.02
Tumbes	4680.26	1247.32	26.65	73.35
Ucayali	105112.04	18908.88	17.99	82.01

Considering the different layers of restriction in this study, 69.52% of the country is excluded from further analyses. Peru's position as one of the 17 megadiverse countries in the world, which together host more than 70% of the planet's biodiversity [93] and has 84 life zones out of the 104 globally existing [94], justifies the high percentage of areas restricted at a national level.

The highest restricted area proportion (57.32%) belonged to the environmental category, with the areas protected by the State (in their different modalities and buffer zones) reaching the highest percentage with 28.08%. Areas related to the protection and use of forest or agricultural resources reached 14.67% of all restricted areas, followed by water bodies and their protection buffers that removed 14.57%. The social category (including the urban areas) was responsible for 2.35% of the excluded area; while the technical category totaled 9.85%.

Departments of the Amazon region such as Ucayali (82.01%), San Martín (83.33%) and Madre de Dios (97.28%), along with Pasco (81.25%) had the highest percentage of their total surface area removed by the restrictions. This can be explained by the existence of a diversity of legal mechanisms (such as State Protected Natural Areas and concessions for Permanent Production Forests) for the protection of the Amazon. In contrast, coastal departments such as Moquegua (37.66%), Lambayeque (41.39%) and Tacna (43.02%) showed the fewest percentages of total surface area extracted in this study.

### **3.2 Consistency Coefficient**

The correlation level of the expert's rankings was determined through the consistency coefficient. Thus, five experts provided their answers regarding the categorization of criteria according to their influence on the development of solar photovoltaic projects. An upward valuation scale of 10 was used, with the valuation being able to be repeated between criteria when considered. The results are presented in Table 9.



**Table 9**  
 Expert's Survey Results

Criteria	Experts					Ranking Total Sum	S
	1	2	3	4	5		
Solar Irradiance	10	6	10	10	10	46	229.31
Slope	4	4	3	4	7	22	78.45
Slope Orientation	9	5	3	5	8	30	0.73
Land Use	7	3	8	7	2	27	14.88
Proximity to Urban Areas	5	7	5	3	3	23	61.73
Proximity to Roads	6	8	5	5	4	28	8.16
Proximity to Transmission Lines	8	10	8	5	9	40	83.59
<b>Total Sum</b>	49	43	42	39	43	216	476.86
<b>Average Value</b>	43.2	43.2	43.2	43.2	43.2		
<b>Deviation</b>	5.8	-0.2	-1.2	-4.2	0.2		
<b>Expert Ranking</b>	5	1	3	4	1		

Considering the results of the table, we observed that the solar irradiance criterion was the most significant in determining the optimal areas for photovoltaic solar, with proximity to transmission lines being the second highest. The least significant result was the slope criterion. As for the ranking of respondents, considering the deviation to the average results, the highest rating was expert 2 and 5; with expert 1 being the furthest from average.

The consistency coefficient found was 0.69, which shows good consistency among the experts' opinions. We consider  $T$  with a value of 18, as two pairs of equal rankings were denoted in respondent 3 and one in respondent 4.

**Equation 9**

$$W = \frac{12 \times 476.86}{5^2(7^3 - 7) - 5 \times 18} = 0.69$$

### 3.3 Weighting Criteria and AHP

The pairwise comparison matrix, as set out in Table 10, was constructed on the basis of the results of the specialist surveys. From this the normalized pairwise comparison matrix of Table 11 was generated, in which each value is the result of the ratio of each criterion value to the sum of the corresponding column, with priority vector or weight being obtained as the average of the sum of the normalized values for each criterion.

In short, according to the priority vectors, solar irradiance is detailed with a weight of 45%, proximity to transmission lines with 26%, aspect or orientation of slope got 9%, road proximity reached 7%, land use with 6%, proximity to cities was 4% and the percentage of slope 3% (Table 11).

**Table 10**  
Pairwise Comparison Matrix

	Solar Irradiance	Slope	Slope Orientation	Land Use	Proximity to Urban Areas	Proximity to Roads	Proximity to Transmission Lines
Solar Irradiance	1	9	6	8	9	7	3
Slope	0.11	1	0.33	0.50	1	0.33	0.14
Slope Orientation	0.17	3	1	2	3	1	0.25
Land Use	0.13	2	0.5	1	2	1	0.20
Proximity to Urban Areas	0.11	1	0.33	0.5	1	0.5	0.14
Proximity to Roads	0.14	3	1	1	2	1	0.20
Proximity to Transmission Lines	0.33	7	4	5	7	5	1
<b>Total Sum</b>	<i>1.99</i>	<i>26.00</i>	<i>13.17</i>	<i>18.00</i>	<i>25.00</i>	<i>15.83</i>	<i>4.94</i>

**Table 11**  
 Normalized Pairwise Comparison Matrix

	Solar Irradiance	Slope	Slope Orientation	Land Use	Proximity to Urban Areas	Proximity to Roads	Proximity to Transmission Lines	Priority Vector = Weighing ( $w_i$ )
Solar Irradiance	0.50	0.35	0.46	0.44	0.36	0.44	0.61	45%
Slope	0.06	0.04	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	3%
Slope Orientation	0.08	0.12	0.08	0.11	0.12	0.06	0.05	9%
Land Use	0.06	0.08	0.04	0.06	0.08	0.06	0.04	6%
Proximity to Urban Areas	0.06	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	4%
Proximity to Roads	0.07	0.12	0.08	0.06	0.08	0.06	0.04	7%
Proximity to Transmission Lines	0.17	0.27	0.30	0.28	0.28	0.32	0.20	26%

As expected, solar irradiance obtained the highest relative weight among the criteria, considering that the electrical production is directly dependent on the amount of irradiance that can be exploited by the system, so the ideal areas should be located in area with high levels of sunlight exposure. Studies referred to in [32], [37], [38], [40], [41], [42], [44], [45], [46], [69], [75], [76] are consistent with this logic.

Proximity to transmission lines was the second most weighted criterion in the study. Buying large transmission line lengths can be expensive, with its installation requiring the development of environmental studies, so the need to decrease the distance between generation and transmission facilities already existing is evident. The following studies place the criterion in a similar position: [32], [37], [38], [42], [44], [75], [70].

Topography, especially slope criteria, was consistently found among the second or third criterion with the highest values in the bibliography [40], [41], [45], [46], [69], [75], [76], so the contrast observed is interesting, as this alternative ranked last in this study. We theorize that previous large-scale photovoltaic installations in the country, having been all in coastal and desert areas with very low slope, have influenced the reasoning of the experts in relation to this criterion.

In relation to consistency analysis, Table 12 details the information regarding the weight sum vectors and the consistency vectors, which are necessary for the calculation of the terms  $\lambda_{max}$  and  $CI$ .

**Equation 10**

$$\lambda_{max} = \frac{\sum \text{Consistency Vectors}}{\text{Number of Criteria}} = 7.18$$

**Equation 11**

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - \text{Number of Criteria})}{(\text{Number of Criteria} - 1)}$$

$$= \frac{(7.18 - 7)}{(7 - 1)} = 0.03$$

**Table 12**  
 Consistency Vector Matrix

	Solar Irradiance	Slope	Slope Orientation	Land Use	Proximity to Urban Areas	Proximity to Roads	Proximity to Transmission Lines	Weight Sum Vector	Consistency Vector
Solar Irradiance	0.45	0.31	0.53	0.48	0.32	0.50	0.78	3.36	7.46
Slope	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02	0.04	0.24	7.07
Slope Orientation	0.08	0.10	0.09	0.12	0.11	0.07	0.06	0.63	7.09
Land Use	0.06	0.07	0.04	0.06	0.07	0.07	0.05	0.42	7.09
Proximity to Urban Areas	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.25	7.11
Proximity to Roads	0.06	0.10	0.09	0.06	0.07	0.07	0.05	0.51	7.09
Proximity to Transmission Lines	0.15	0.24	0.35	0.30	0.25	0.36	0.26	1.91	7.34

The  $CI$  is compared to the  $RI$  value (which for the case of seven criteria is 1.32), resulting in the  $CR$  of 0.023. Being this value below 10% (0.1), we conclude in the consistency of the paired comparisons.

**Equation 12**

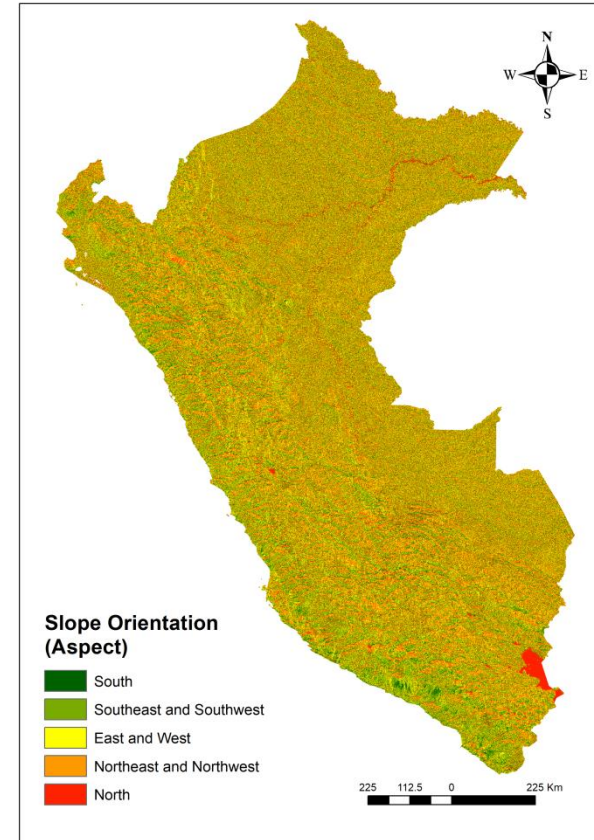
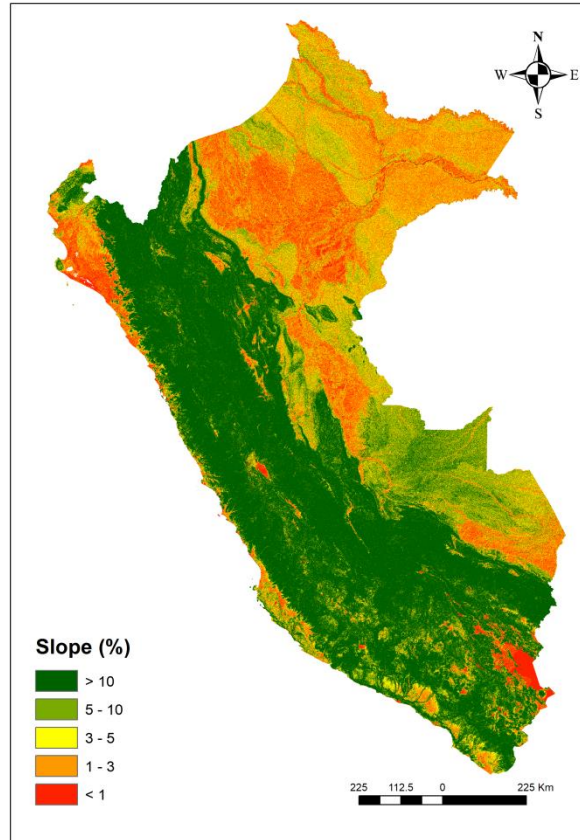
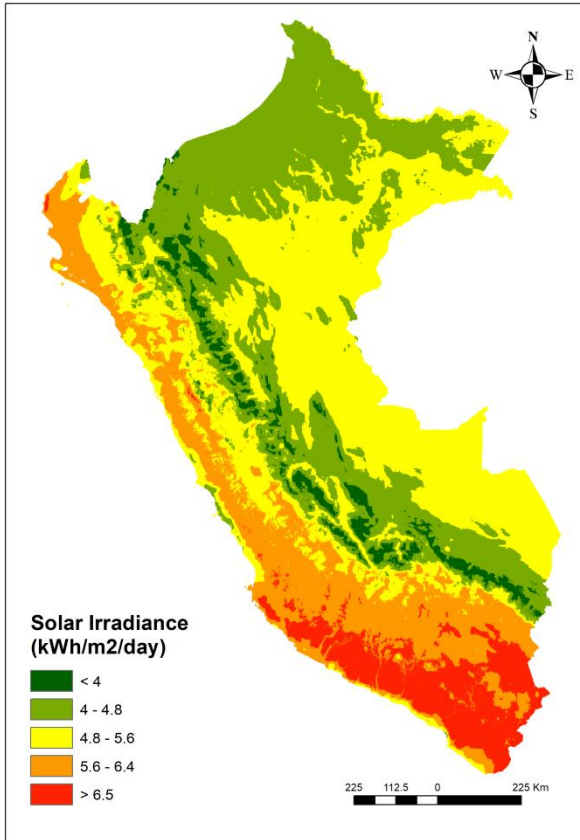
$$CR = CI/RI = 0.03/1.32 = 0.023 < 0.1$$

### 3.4 Suitability Map

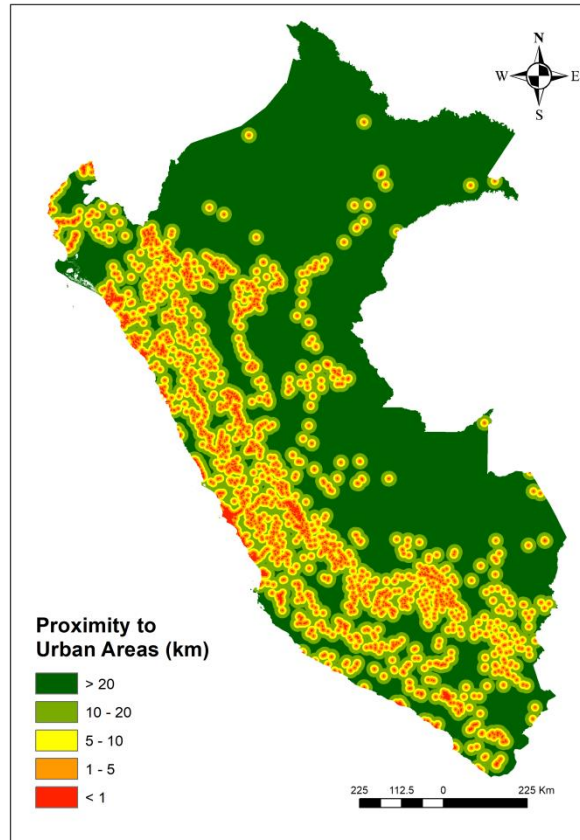
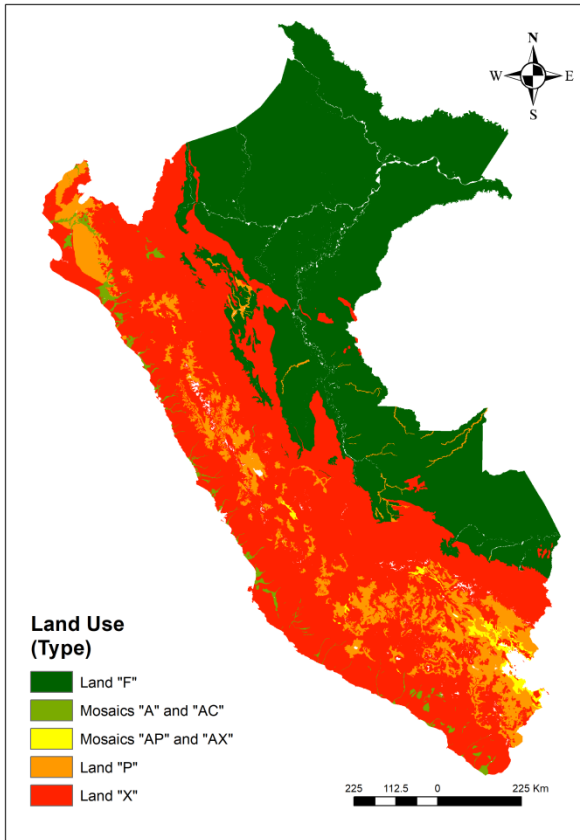
Nine raster layers were developed (The proximity-to-road network criterion has three maps of the national, departmental and local levels), corresponding to the criteria set out in the study. Figure 3 allows the visualization of them, which were then used along the relative criteria weights in the weighted overlay technique.

The final suitability map was divided into five categories: "Highly Adequate", "Very Adequate", "Adequate", "Marginally Adequate" and "Inadequate", to which the constraint layer was extracted. The final result is shown in Figure 4.

More than 5% of the national viable areas are high potential zones for large-scale photovoltaic installation, with 347.89 km<sup>2</sup> or 0.09% being considered "Highly Adequate" and 21 908.97 km<sup>2</sup> or 5.55% as "Very Adequate". The southern areas of the country adjacent to large transmission systems, predominantly in the departments of Tacna, Moquegua, Arequipa and Puno, were the ones that presented a greater distribution of these areas thanks to their high levels of solar irradiance, as well as being located in areas with large supply of high voltage transmission networks. In addition, we highlight suitable areas on the north and central coast of the country, where large-scale photovoltaic infrastructures have not been developed so far.







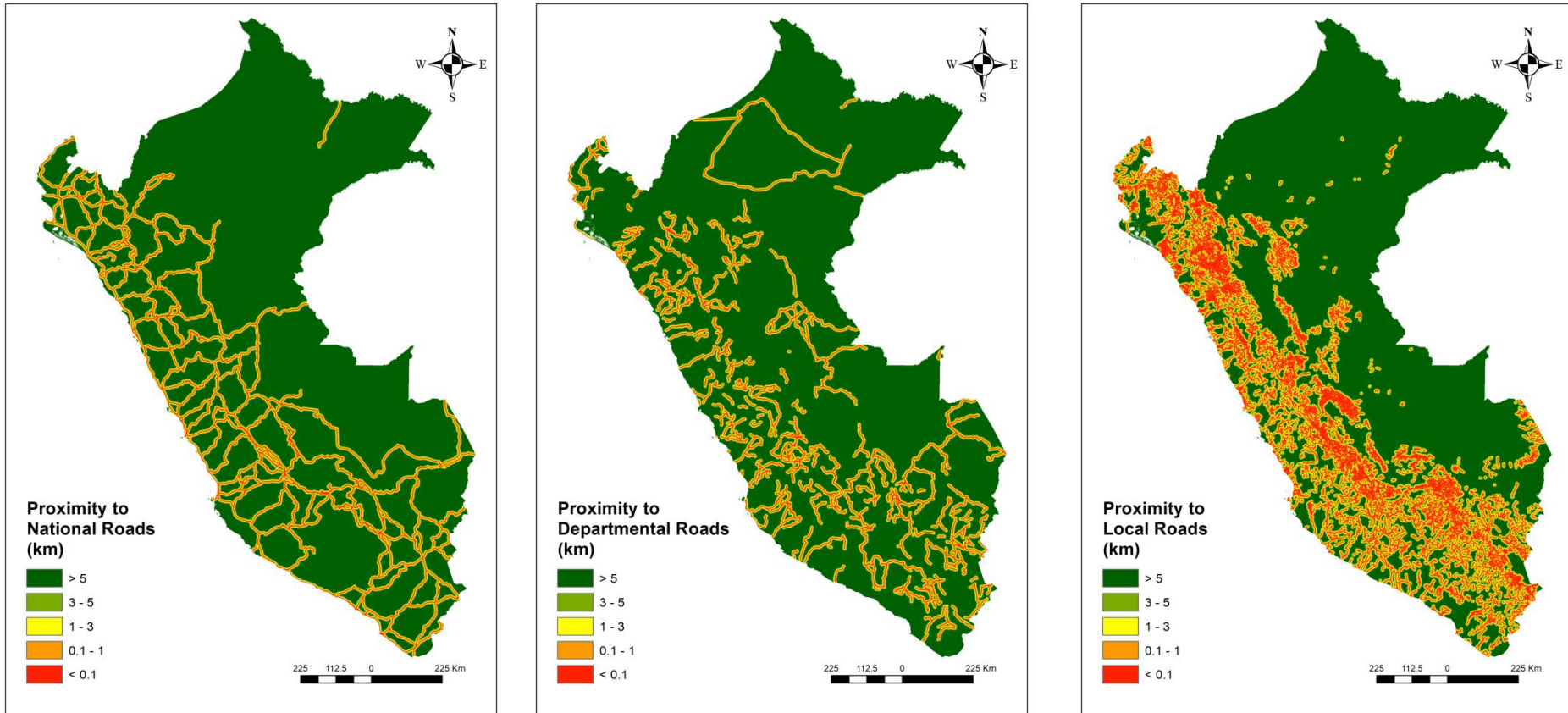


Fig. 3. Criteria Maps applied in the AHP

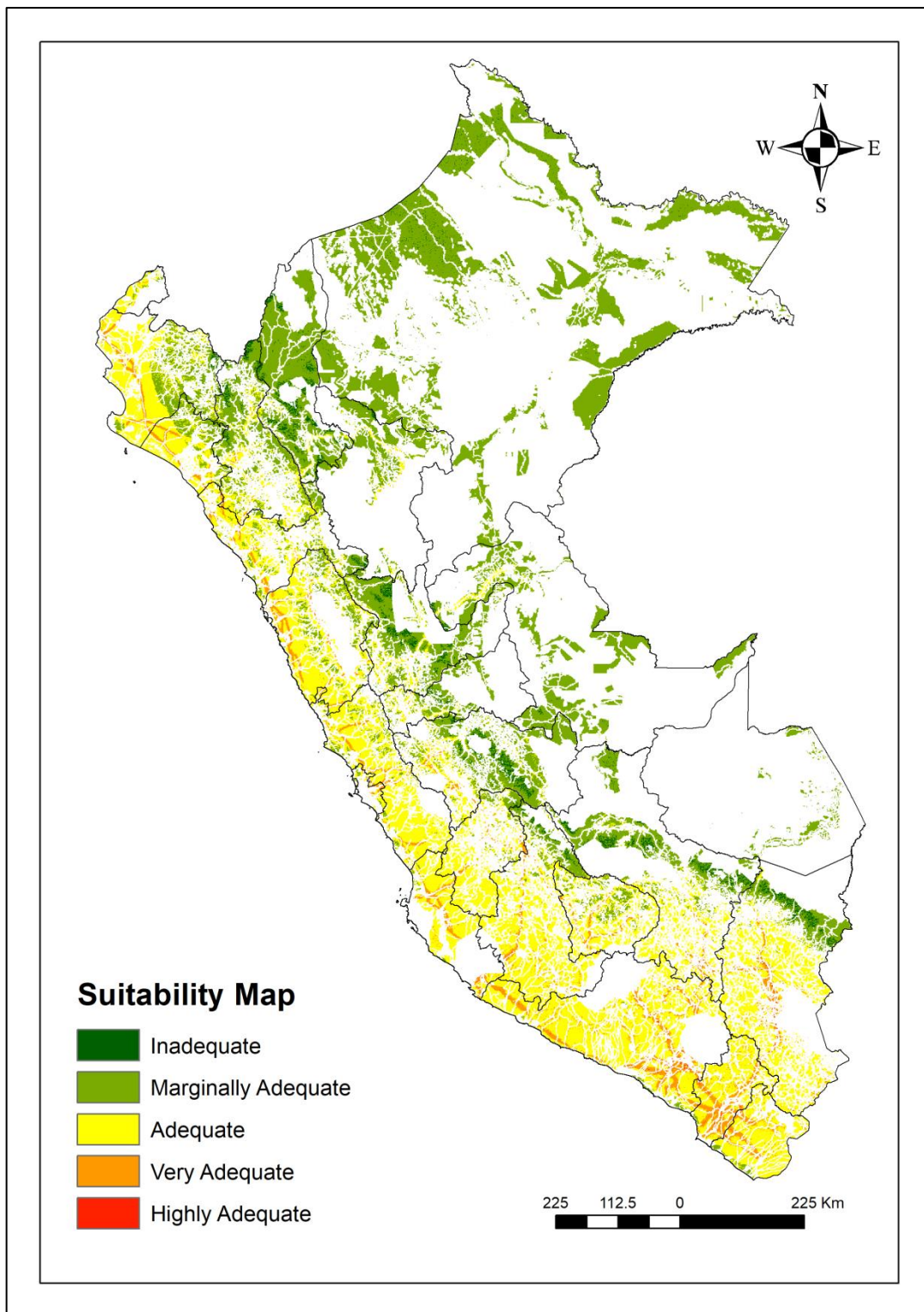
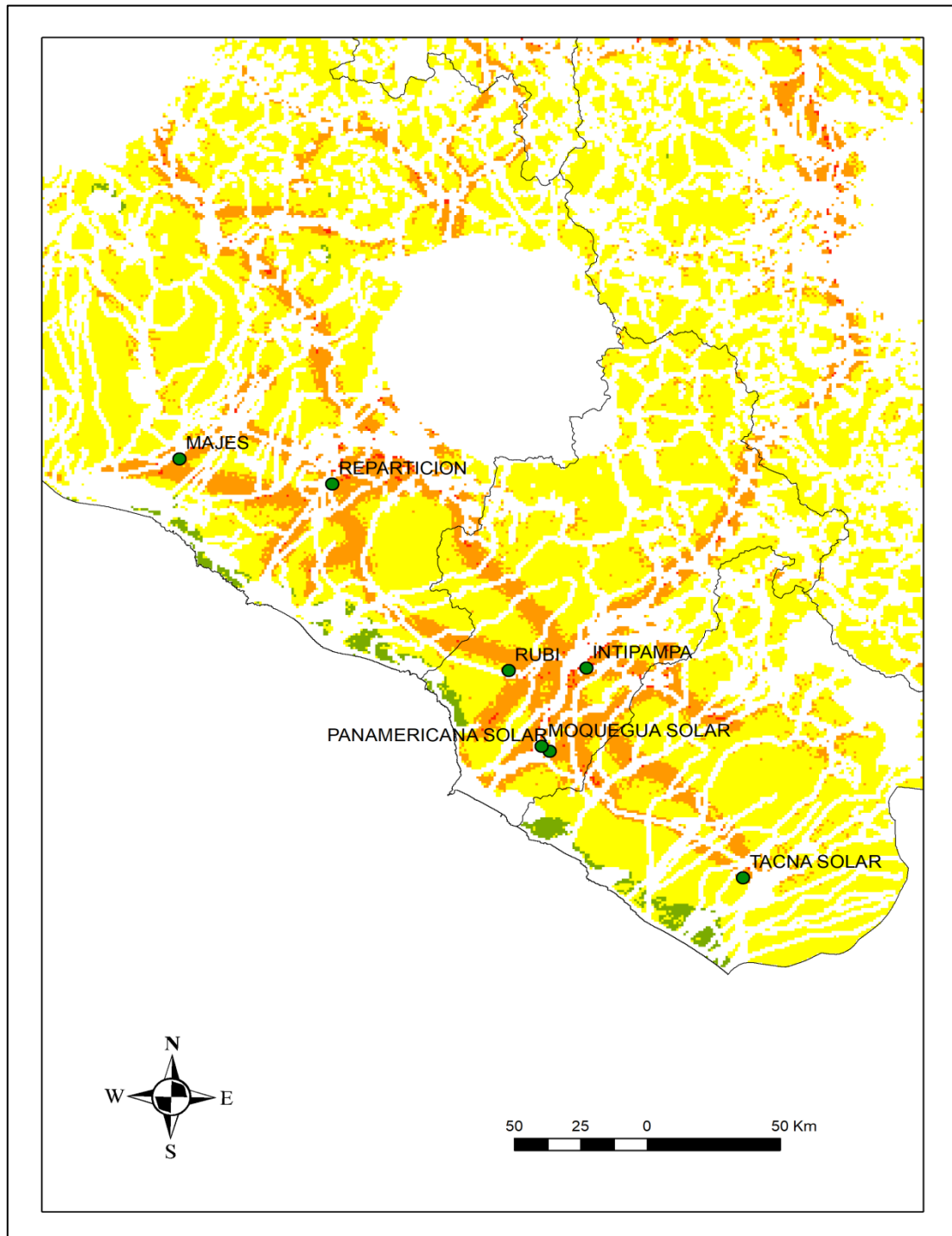


Fig. 4. Suitability Map results using AHP weights

Figure 5 shows us the current location of large-scale photovoltaic installations nationwide. A good correlation is observed with the areas identified as potentially suitable, providing legitimacy and replicability to the process carried out in the study.



**Fig.5.** Current PVPP shown on Suitability Map AHP

Considering the 0.018 km<sup>2</sup>/MW established in the literature [36], if the highly suitable areas are used for the installation of large-scale photovoltaic projects, approximately 19 320 MW could be obtained, representing 69 times the currently installed PVPP power, as well as 20 times the total RER power in the country [58]. Even using the 0.06 km<sup>2</sup>/MW obtained from experiences in the country (Table 13), the resulting 5 800 MW is 21 times the power of installed PVPP, and 6 times the total RER power.

**Table 13**  
Calculation of km<sup>2</sup>/MW needed in Peruvian experience

Solar Power Plant	Installed Power (MW)	Area (ha)	Area (km <sup>2</sup> )	km <sup>2</sup> /MW	Reference
Intipampa	40	322	3.22	0.08	<a href="https://pe.ambafrance.org/Presidente-del-Peru-Martin-Vizcarra-inaugura-Central-Solar-Intipampa-de-ENGIE">https://pe.ambafrance.org/Presidente-del-Peru-Martin-Vizcarra-inaugura-Central-Solar-Intipampa-de-ENGIE</a>
Rubí	144.48	400	4	0.03	<a href="https://www.enel.pe/en/sustainability/rubi-solar-plant-peru-largest-solar-plant.html">https://www.enel.pe/en/sustainability/rubi-solar-plant-peru-largest-solar-plant.html</a>
Moquegua FV	16	134	1.34	0.08	<a href="https://www.solarpack.es/en/pais/peru-2/">https://www.solarpack.es/en/pais/peru-2/</a>
Panamericana Solar	20	123	1.23	0.06	<a href="https://www.solarpack.es/en/pais/peru-2/">https://www.solarpack.es/en/pais/peru-2/</a>
Majes Solar 20T	20	102	1.02	0.05	<a href="https://www.isoluxcor.com/recursos/doc/proyectos/proyectos-solares-en-peru.pdf">https://www.isoluxcor.com/recursos/doc/proyectos/proyectos-solares-en-peru.pdf</a>
Repartición 20T Denominación	20	102	1.02	0.05	<a href="https://www.isoluxcor.com/recursos/doc/proyectos/proyectos-solares-en-peru.pdf">https://www.isoluxcor.com/recursos/doc/proyectos/proyectos-solares-en-peru.pdf</a>
Tacna Solar	20	121	1.21	0.06	<a href="https://www.solarpack.es/en/pais/peru-2/">https://www.solarpack.es/en/pais/peru-2/</a>
<b>Average</b>				0.06	

“Adequate” zones were identified in 40.49% (159 741.87 km<sup>2</sup>) of the country, extending throughout the national coastal zone. Half of the viable area of the territory (51.11% or 201



671.17 km<sup>2</sup>) was established as "Marginally Adequate", mainly in the areas of the Cordillera and the Amazon that were not yet in restriction categories; while only 10 893.76 km<sup>2</sup> or 2.76% of the viable territory was deemed "Inadequate".

### 3.5 Sensitivity Analysis

In the spirit of contrasting results, and understanding that the greatest uncertainty in this type of exercise is in the choice of both the input information and relative weights [38] [95], various sensitivity analyses were performed. Thus, in addition to those determined by the AHP method, three scenarios were analyzed: a) equitable weighting; b) weighting associated with literature review and c) weighting associated with a technical scenario, with economic factors equal to 0. The selected criteria weight is presented in Table 14.

**Table 14**  
Sensitivity scenarios and relative weights chosen

Criteria	Weighted Criteria (%)			
	AHP	Equitable Weighting	Literature Weighting	Technical Weighting
Solar Irradiance (kWh/m <sup>2</sup> /day)	45	14	41	25
Slope (%)	3	14	12	25
Slope Orientation (Aspect)	9	14	17	25
Land Use (Type)	6	14	11	25
Proximity to Urban Areas (km)	4	14	5	0
Proximity to Roads (km)	7	14	3	0
Proximity to Transmission Lines (km)	26	14	11	0

The results of this analysis are detailed in Table 15 and Figure 6. Fair weighting, being the simplest method when making decisions because it allows to evade risks and ignore the relative importance already known, is the one that has the lowest percentage of "Highly Adequate" areas (0.0007%), as well as the areas "Very Adequate" (0.97%). This scenario allows us to determine the predominant influence of the solar radiation criterion [36], having being reduced its relative weight by up to 3 times. The priority vectors obtained from the literature maintained a value similar for the solar irradiance criterion, significantly increasing the topography variables and decreasing by more than half the transmission lines variable, allowing for no second predominant criterion. This scenario obtained the second best values (with values of 9.9% and 49.5%, respectively) in "Very Adequate" and "Adequate" areas. Finally, the technical weighting, which omits economic considerations and allows selection based on natural conditions of the environment [44] [76], was the scenario with the highest percentage in areas of high potential (62%, 21% and 0.89% in Adequate; Very and Highly Adequate areas, respectively), giving light to the affinity of natural factors with each other, as well as the relative importance of economic factors by restricting the selection of suitable sites to small margins close to connection infrastructures (especially to transmission lines).

**Table 15**  
Results of the sensitivity analysis performed

Suitability Ranking	AHP		Equitable Weighting		Literature Weighting		Technical Weighting	
	%	Area (km <sup>2</sup> )	%	Area (km <sup>2</sup> )	%	Area (km <sup>2</sup> )	%	Area (km <sup>2</sup> )
Inadequate	2.76	10 893.76	2.23	8 817.72	0.42	1 647.47	0.16	645.09
Marginally Adequate	51.11	201 671.17	57.71	227 696.64	40.18	158 525.57	15.82	62 403.84
Adequate	40.49	159 741.87	39.08	154 207.80	49.48	195 239.19	62.25	245 628.80
Very Adequate	5.55	21 908.97	0.97	3 838.89	9.91	39 087.22	20.88	82 368.67
Highly Adequate	0.09	347.89	0.0007	2.60	0.02	64.20	0.89	3 517.25



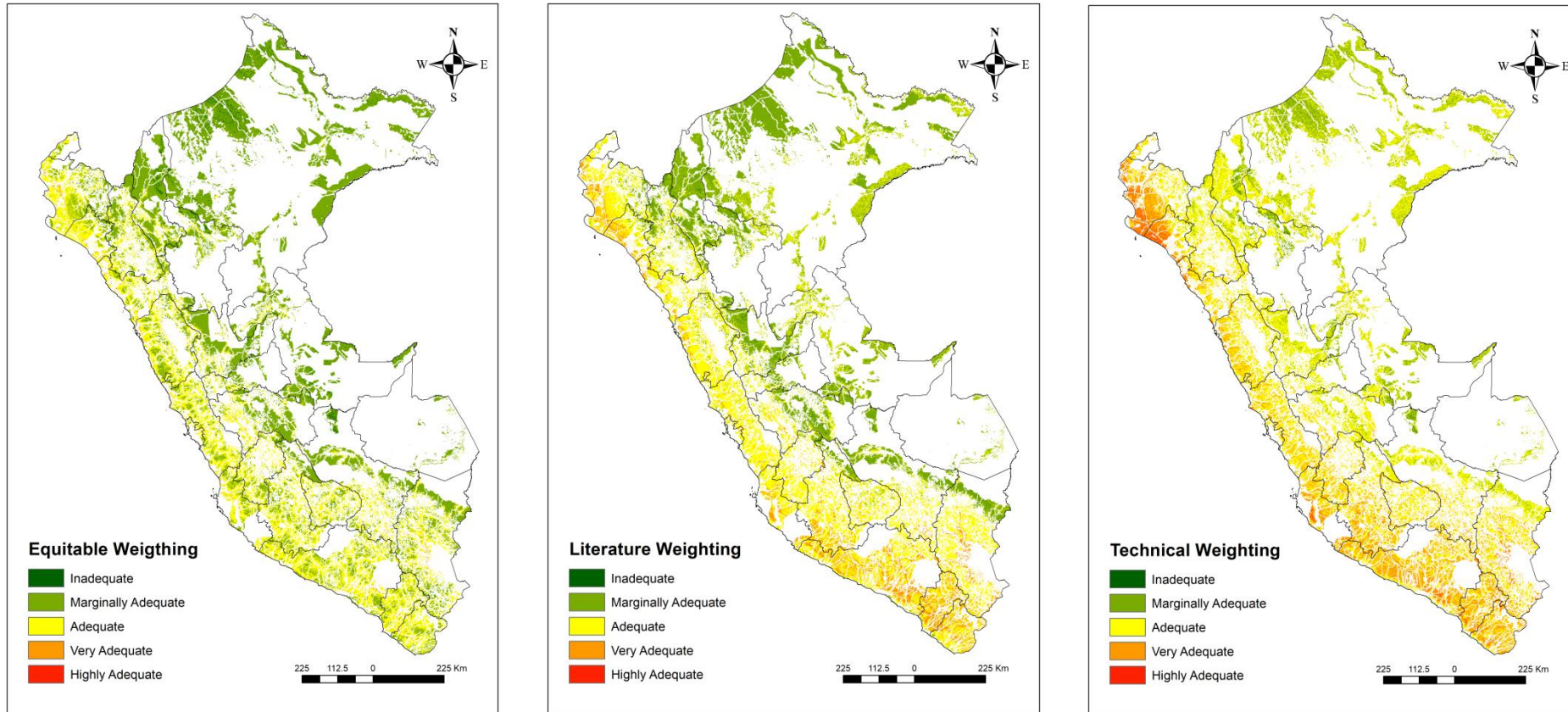


Fig. 6. Sensitivity Maps results considering equitable weights (left), bibliographic weights (center) and technical weights (right)

## 4. Conclusions

The results of this study represent the first experience in using an AHP-GIS methodology to identify suitable sites for photovoltaic power plants in Peru. Considering the different restrictions reported, 69.52% of the country was excluded from further analysis, with 30.48% remaining as viable areas. The environmental, social and technical categories reached 57.32%, 2.35% and 9.85% of the total restricted areas, respectively. The Amazon region had departments such as Ucayali, San Martín and Madre de Dios with the highest percentage of total surface area removed by restrictions. On the other hand, coastal departments such as Moquegua, Lambayeque and Tacna presented the fewest percentages of total surface area extracted from the study.

The methodology highlights the great potential of areas (approximately 22 257 km<sup>2</sup>) for the establishment of large-scale photovoltaic plants. In addition, it represents a precedent that can be taken into account by stakeholders, either in the initial stages of policy development, as well as in the promotion and implementation of such projects in the national territory.

In addition, the AHP methodology allows and encourages its re-evaluation and improvement over time. The availability of a greater number of surveys answered by experts who perform in the field will allow the assessment of each criterion to be refined, and thus the suitability map. On the other hand, due to the variation in time of the restrictions and criteria used in this study (i.e. urban areas, roads, transmission lines), added to the development of new geographical databases, such as the land use map, the suitability map requires periodic updating. This is why efforts similar to those made in this study, as well as for other renewable technologies of national interest, should continue.

Finally, we underline the importance of replicating these studies at regional and local level, in the areas where the largest areas suitable for the implementation of photovoltaic plants on a large scale were identified, mainly in the coastal area and the southern mountain range of Peru.

**List of References**

- [1] MINEM. Elaboración de la Nueva Matriz Energética Sostenible y Evaluación Ambiental Estratégica, como Instrumentos de Planificación. 2012.
- [2] BP. BP Energy Outlook 2019 edition. 2019.
- [3] Jackson RB, Le Quéré C, Andrew RM, Canadell JG, Korsbakken JI, Liu Z, et al. Global energy growth is outpacing decarbonization. *Environ Res Lett* 2018;13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf303>.
- [4] NOAA National Centers for Environmental Information. State of the Climate: Global Climate Report for Annual 2018. 2019.
- [5] BP. BP Statistical Review of World Energy 2018. 2018.
- [6] COES. Boletín Mensual Diciembre 2018. 2018.
- [7] Aita PG. Perú Potencial Energético: Propuestas y Desafíos. *Círculo Derecho Adm* 2006;0:217–31.
- [8] Aita PG. Energía: Un Cambio Necesario en el Perú. *Rev Kawsaypacha Soc y Medio Ambient* 2017;0:93–135.
- [9] Mitma Ramírez R. Análisis de la Regulación de Energías Renovables en el Perú. *Derecho Soc* 2015:167–76.
- [10] Jacobson MZ. Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy Environ Sci* 2009;2:148–73. <https://doi.org/10.1039/b809990c>.
- [11] IRENA. Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy. 2010. <https://doi.org/10.1787/9789264088047-en>.
- [12] Kavlak G, McNerney J, Trancik JE. Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules. *Energy Policy* 2018;123:700–10. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.015>.
- [13] IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2018. Abu Dhabi: 2018. [https://doi.org/10.1007/SpringerReference\\_7300](https://doi.org/10.1007/SpringerReference_7300).
- [14] EIA. Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources. 2019.

- [15] OSINERGMIN. Reporte de Análisis Económico Sectorial - Electricidad - Las energías renovables en el mundo. 2016.
- [16] Equilibrium. Análisis del Sector Eléctrico Peruano: Generación. 2018.
- [17] IFC. Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants - A Project Developer's Guide. 2015.
- [18] Dawod GM, Mandoer MS. Optimum Sites for Solar Energy Harvesting in Egypt Based on Multi-Criteria GIS. First Futur Univ Int Conf New Energy Environ Eng Cairo, Egypt April 11-14, 2016 2016:450–6.
- [19] Sengupta M, Hable A, Kurtz S, Dobos A, Wilbert S, Lorenz E, et al. Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications. vol. 2. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.003>.
- [20] Li C. GIS for Urban Energy Analysis. Compr. Geogr. Inf. Syst., Elsevier; 2017, p. 187–95. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.09652-4>.
- [21] Brawner E, Hassaram J, Wiesner H, Wang Y, Johnson TL, Patino-Echeverri D. Assessing Land Availability for Utility Solar in North Carolina Using GIS. Duke University, 2017.
- [22] Kikuma I, Rublev E, Tan X. Siting of Utility-Scale Solar In North Carolina. Duke University, 2018.
- [23] Huang JP, Poh KL, Ang BW. Decision analysis in energy and environmental modeling. Energy 1995;20:843–55. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(95\)00036-G](https://doi.org/10.1016/0360-5442(95)00036-G).
- [24] Ramanathan R. Multicriteria Analysis of Energy. Encycl Energy 2004:77–88. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00240-0>.
- [25] Zhou P, Ang BW, Poh KL. Decision analysis in energy and environmental modeling: An update. Energy 2006;31:2604–22. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.10.023>.
- [26] Wang JJ, Jing YY, Zhang CF, Zhao JH. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. Renew Sustain Energy Rev 2009;13:2263–78. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021>.
- [27] Kumar A, Sah B, Singh AR, Deng Y, He X, Kumar P, et al. A review of multi criteria

- decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;69:596–609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191>.
- [28] Mardani A, Zavadskas EK, Khalifah Z, Zakuan N, Jusoh A, Nor KM, et al. A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;71:216–56. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.053>.
- [29] Mardani A, Jusoh A, Zavadskas EK, Cavallaro F, Khalifah Z. Sustainable and renewable Energy: An overview of the application of multiple criteria decision making techniques and approaches. *Sustain* 2015;7:13947–84. <https://doi.org/10.3390/su71013947>.
- [30] Stojčić M, Zavadskas E, Pamučar D, Stević Ž, Mardani A. Application of MCDM Methods in Sustainability Engineering: A Literature Review 2008–2018. *Symmetry (Basel)* 2019;11:350. <https://doi.org/10.3390/sym11030350>.
- [31] Wang Q, Poh KL. A survey of integrated decision analysis in energy and environmental modeling. *Energy* 2014;77:691–702. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.09.060>.
- [32] Al Garni HZ, Awasthi A. Solar PV Power Plants Site Selection: A Review. *Adv. Renew. Energies Power Technol.*, Elsevier Inc.; 2018, p. 57–75. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812959-3.00002-2>.
- [33] Rojas-Zerpa JC, Yusta JM. Methodologies, technologies and applications for electric supply planning in rural remote areas. *Energy Sustain Dev* 2014;20:66–76. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.03.003>.
- [34] Hadiyanto H, Ebrahimi M, Ahmadi MH, Ghasempour R, Alhuyi Nazari M. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Approach for Selecting Solar Plants Site and Technology: A Review. *Int J Renew Energy Dev* 2019;8:15–25. <https://doi.org/10.14710/ijred.8.1.15-25>.
- [35] Giamalaki M, Tsoutsos T. Sustainable siting of solar power installations in Mediterranean using a GIS/AHP approach. *Renew Energy* 2019;141:64–75. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.100>.
- [36] Al Garni HZ, Awasthi A. Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Appl Energy* 2017;206:1225–40.

- <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.024>.
- [37] Ali S, Taweekun J, Techato K, Waewsak J, Gyawali S. GIS based site suitability assessment for wind and solar farms in Songkhla, Thailand. *Renew Energy* 2019;132:1360–72. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.035>.
- [38] Aly A, Jensen SS, Pedersen AB. Solar Power Potential of Tanzania: Identifying CSP and PV Hot Spots through a GIS Multicriteria Decision Making Analysis. *Renew Energy* 2017;113:159–75. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.077>.
- [39] Doljak D, Stanojević G. Evaluation of natural conditions for site selection of ground-mounted photovoltaic power plants in Serbia. *Energy* 2017;127:291–300. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.140>.
- [40] Ghasemi G, Noorollahi Y, Alavi H, Marzband M, Shahbazi M. Theoretical and technical potential evaluation of solar power generation in Iran. *Renew Energy* 2019;138:1250–61. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.068>.
- [41] Singh Doorga JR, Rughooputh SDDV, Boojhawon R. High resolution spatio-temporal modelling of solar photovoltaic potential for tropical islands: Case of Mauritius. *Energy* 2019;169:972–87. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.072>.
- [42] Yushchenko A, de Bono A, Chatenoux B, Patel MK, Ray N. GIS-based assessment of photovoltaic (PV) and concentrated solar power (CSP) generation potential in West Africa. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;81:2088–103. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.021>.
- [43] Ozdemir S, Sahin G. Multi-criteria decision-making in the location selection for a solar PV power plant using AHP. *Measurement* 2018;129:218–26. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.020>.
- [44] Watson JJW, Hudson MD. Regional Scale wind farm and solar farm suitability assessment using GIS-assisted multi-criteria evaluation. *Landsc Urban Plan* 2015;138:20–31. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.001>.
- [45] Tahri M, Hakdaoui M, Maanan M. The evaluation of solar farm locations applying Geographic Information System and Multi-Criteria Decision-Making methods: Case study



- in southern Morocco. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;51:1354–62. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.054>.
- [46] Mierzwia M, Calka B. Multi-Criteria Analysis for Solar Farm Location Suitability. *Reports Geod Geoinformatics* 2018;104:20–32. <https://doi.org/10.1515/rgg-2017-0012>.
- [47] Marcillo JLM, Fabricio F, Fuentes C. Determinación de áreas óptimas para instalaciones de energía solar y eólica en Quevedo, provincia de Los Ríos, aplicando sistemas de información geográfica. *Rev Interam Ambient y Tur* 2016;12:129–38.
- [48] Vaca F. Análisis y determinación de las zonas óptimas para la instalación de un proyecto eólico en Ecuador a través de métodos de toma de decisión multicriterio. Universidad Politécnica de Cartagena, 2018.
- [49] Villacreses G, Gaona G, Martínez-Gómez J, Jijón DJ. Wind farms suitability location using geographical information system (GIS), based on multi-criteria decision making (MCDM) methods: The case of continental Ecuador. Universidad de Manizales, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.041>.
- [50] Obando Chaparro MF. Identificación del lugar óptimo de instalación de un parque eólico en el departamento del Atlántico 2017:1–56.
- [51] Algarín CR, Llanos AP, Castro AO. An analytic hierarchy process based approach for evaluating renewable energy sources. *Int J Energy Econ Policy* 2017;7:38–47.
- [52] Suuronen A, Lensu A, Kuitunen M, Andrade-Alvear R, Celis NG, Miranda M, et al. Optimization of photovoltaic solar power plant locations in northern Chile. *Environ Earth Sci* 2017;76. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7170-z>.
- [53] IRENA. Investment Opportunities in Latin America Suitability Maps for Grid-Connected and Off-Grid Solar and Wind Projects. 2016.
- [54] IRENA. Global Atlas for Renewable Energy n.d. <https://irena.masdar.ac.ae/gallery/#map/2012>.
- [55] MINAM. Informe Nacional del Estado del Ambiente 2012-2013. Primera. Lima: 2014.
- [56] MINAM. El Perú y el Cambio Climático: Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 2016.

- [57] SENAMHI; MINEM. Atlas de energía solar del Perú. 2003.
- [58] COES. Estadística de Operación 2018. 2018.
- [59] Escrivá L. Aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) al Dimensionamiento de Sistemas Renovables. Universitat Politècnica de València, 2015.
- [60] Saaty TL. Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process. In: Schmoldt D.L., Kangas J., Mendoza G.A. PM, editor. Anal. Hierarchy Process Nat. Resour. Environ. Decis. Mak., 2001.
- [61] Saaty TL. A scaling method for priorities in a hierarchichal structure. J Math Psych 1977;15:234–81.
- [62] Saaty TL. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority, Setting, Resources Allocation. New York: McGraw-Hill; 1980.
- [63] Saaty RW. The Analytical Hierarchy Process- What and Why it is Used. Math Model 1987;9:161–76.
- [64] Kereush D, Perovych I. Determining Criteria for Optimal Site Selection for Solar Power Plants. Geomatics, Landmanagement Landsc 2018;4:39–54. <https://doi.org/10.15576/gll/2017.4.39>.
- [65] Grilli G, Balest J, De Meo I, Garegnani G, Paletto A. Experts' opinions on the effects of renewable energy development on ecosystem services in the Alpine region. J Renew Sustain Energy 2016;8. <https://doi.org/10.1063/1.4943010>.
- [66] Legendre P. Coefficient of Concordance. Encycl Res Des Vol 1 2010:164–9.
- [67] OSINERGMIN. Supervisión de Contratos de Proyectos de Generación y Transmisión de Energía Eléctrica en Operación. 2018.
- [68] MINEM. Concesiones Temporales en Etapa de Estudio. 2017.
- [69] Alami Merrouni A, Elwali Elalaoui F, Mezrhab A, Mezrhab A, Ghennioui A. Large scale PV sites selection by combining GIS and Analytical Hierarchy Process. Case study: Eastern Morocco. Renew Energy 2018;119:863–73. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.044>.



- [70] Uyan M. GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region Konya/Turkey. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;28:11–7. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.042>.
- [71] Asakereh A, Soleymani M, Sheikhdavoodi MJ. A GIS-based Fuzzy-AHP method for the evaluation of solar farms locations: Case study in Khuzestan province, Iran. *Sol Energy* 2017;155:342–53. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.075>.
- [72] Aydin NY, Kentel E, Sebnem Duzgun H. GIS-based site selection methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from western Turkey. *Energy Convers Manag* 2013;70:90–106. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.02.004>.
- [73] Majumdar D, Pasqualetti MJ. Analysis of land availability for utility-scale power plants and assessment of solar photovoltaic development in the state of Arizona, USA. *Renew Energy* 2019;121:3–31. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.064>.
- [74] Anwarzai MA, Nagasaka K. Utility-scale implementable potential of wind and solar energies for Afghanistan using GIS multi-criteria decision analysis. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;71:150–60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.048>.
- [75] Effat HA. Selection of Potential Sites for Solar Energy Farms in Ismailia Governorate, Egypt using SRTM and Multicriteria Analysis. *Int J Adv Remote Sens GIS* 2013;2:205–20.
- [76] Cevallos-Sierra J, Ramos-Martin J. Spatial assessment of the potential of renewable energy: The case of Ecuador. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;81:1154–65. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.015>.
- [77] Hafeznia H, Yousefi H, Razi Astaraei F. A novel framework for the potential assessment of utility-scale photovoltaic solar energy, application to eastern Iran. *Energy Convers Manag* 2017;151:240–58. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.076>.
- [78] Huang T, Wang S, Yang Q, Li J. A GIS-based assessment of large-scale PV potential in China. *Energy Procedia* 2018;152:1079–84. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.126>.
- [79] Arnette AN, Zobel CW. Spatial analysis of renewable energy potential in the greater

- southern Appalachian mountains. *Renew Energy* 2011;36:2785–98. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.04.024>.
- [80] The World Bank. Solargis n.d. <https://solargis.com/>.
- [81] Banda A. Estudio de viabilidad técnica y económica de un sistema fotovoltaico autónomo en las instalaciones de la UCSP. Universidad Católica San Pablo, 2017.
- [82] Núñez Zúñiga T, Cruz Ornetta VM. Diseño de sistemas de energía solar fotovoltaica - aplicación en el Perú. *Paideia* 2017;3:160–70. <https://doi.org/10.31381/paideia.v3i4.935>.
- [83] Climate-Data n.d. <https://es.climate-data.org/america-del-norte/estados-unidos-de-america/nebraska/peru-127886/#climate-graph>.
- [84] INEI. Perú: Temperatura Promedio, Máxima y Mínima, según departamento, 2015 2015. [https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1416/mapas.pdf](https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1416/mapas.pdf).
- [85] Schlecht M, Meyer R. Site selection and feasibility analysis for concentrating solar power (CSP) systems. *Conc Sol Power Technol* 2012:91–119. <https://doi.org/10.1533/9780857096173.1.91>.
- [86] McEvoy A, Markvart T, Castañer L. *Practical Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications*. Second Edi. Oxford: Elsevier; 2012. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385934-1.X0001-3>.
- [87] CGIAR-CSI. SRTM Data n.d. <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>.
- [88] Ministerio de Agricultura. Decreto Supremo N° 017-2009-AG Aprueban Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor 2009.
- [89] Janke JR. Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. *Renew Energy* 2010;35:2228–34. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.014>.
- [90] MTC. Ministerio de Transportes y Comunicaciones - MTC n.d. <http://portal.mtc.gob.pe/>.
- [91] OSINERGMIN. Mapa SEIN n.d. <https://www.osinergmin.gob.pe/newweb/uploads/Publico/MapaSEIN/>.
- [92] IGN. Infraestructura de Datos Espaciales del Perú - IDEP n.d. <https://www.idep.gob.pe/>.

- [93] MINAM. Estrategia Nacional de Diversidad Biológica al 2021. Plan de Acción 2014 - 2018. 1ra ed. Ministerio del Ambiente; 2014.
- [94] INEI. Biodiversidad. Anu. Estadísticas Ambient. 2013, Instituto Nacional de Estadísticas e Informática; 2014.
- [95] Daim T, Oliver T, Kim J. Research and Technology Management in the Electricity Industry: Methods, Tools and Case Studies. Green Energy Technol 2013;60:17–30. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5097-8>.
- [96] CEPAL, OCDE. Evaluaciones del desempeño ambiental Perú 2016. Aspectos destacados y recomendaciones 2016.

**Appendice 1**  
Survey to Experts (Spanish)

**Encuesta a Especialistas de Energías Renovables**

Nombre: \_\_\_\_\_

Institución y cargo: \_\_\_\_\_

Experiencia en Energías Renovables: \_\_\_\_\_

---

Estimado/a \_\_\_\_\_,

Reciba un cordial saludo. Mi nombre es \_\_\_\_\_ y soy \_\_\_\_\_. Actualmente me encuentro desarrollando un proyecto de investigación que busca identificar las áreas idóneas del territorio nacional para el desarrollo de proyectos de energías renovables (específicamente la solar fotovoltaica), a través de la metodología de multicriterio (método analítico jerárquico o AHP) y GIS (sistemas de información geográfica), para la cual se requiere de la opinión de expertos en la materia.

Según la revisión bibliográfica, se han identificado criterios (6) para la selección de zonas para desarrollar proyectos solares. Tomando en cuenta su experiencia o conocimientos en la materia, agradeceré evaluar el grado de influencia de cada criterio relacionados a la selección de zonas óptimas para proyectos solares. Utilizar una escala de 1 al 10, donde 10 es el valor de mayor influencia.

<u>Criterio</u>	<u>Valoración</u>
<u>Radiación Solar</u>	
<u>Pendiente</u>	
<u>Dirección de Pendiente</u>	
<u>Cercanía a Áreas Urbanas</u>	
Capacidad de uso mayor y uso actual del suelo	
<u>Accesibilidad (Cercanía a carreteras)</u>	
Cercanía a Líneas de Transmisión	

Breve explicación

- *Radiación Solar*: A mayor cantidad de radiación solar, mayor electricidad posible de ser generada
- *Pendiente*: Tierra plana preferible a tierras con altas pendientes, ya que estas dificulta la construcción y la hace más cara (incrementa complejidad)
- *Dirección de Pendiente*: Orientación al Norte (desde Hemisferio Sur) es preferible para la mayor exposición a la radiación
- *Cercanía a áreas urbanas*: Incremento de preocupaciones por fenómeno NIMBY (no en mi patio trasero)
- *Uso de suelo*: Áreas sin vegetación o de poco valor agrícola son recomendables
- *Cercanía a carreteras*: Permite el transporte de equipos de manera más económica
- *Cercanía a líneas de transmisión*: Cercanía reduce la distancia que la electricidad debe viajar, así como pérdidas de transmisión

## ARTICULO ENVIADO A PUBLICAR (TRADUCCIÓN)

### Selección de Sitios Idóneos para el desarrollo de Proyectos Solares Fotovoltaicos mediante análisis multicriterio AHP-GIS

Roberts Rios Pereyra<sup>1\*</sup>, Sandra Duarte Guardia<sup>1,2</sup>

3. Universidad Científica del Sur, Facultad de Ciencias Ambientales, Panamericana Sur Km 19, Villa, Lima, Perú.
4. Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA), (9400) Río Gallegos, Santa Cruz, Argentina

Revista: Renewable & Sustainable Energy Reviews

Enlace de Revista: <https://www.journals.elsevier.com/renewable-and-sustainable-energy-reviews>

\*Autor corresponsal: roberts.rios.p@gmail.com

#### Resumen

El presente artículo detalla la metodología para la obtención de sitios idóneos para el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos de gran escala, mediante la combinación del análisis multicriterio y los sistemas de información geográfica (GIS) siendo esta la primera experiencia en el tema a nivel nacional. Se identificó y sistematizó información referente a 33 factores de restricción y 7 criterios, siendo estos últimos analizados mediante el método analítico jerárquico (AHP). Para la ponderación relativa de cada criterio se diseñó una encuesta, la cual fue administrada a expertos nacionales relacionados a las energías renovables y a la ejecución de proyectos solares.

El mapa final de idoneidad fue agrupado en cinco categorías: “Altamente adecuado”, “Muy adecuado”, “Adecuado”, “Marginalmente adecuado” e “Inadecuado”. Como resultado, se obtuvo que el 69.52% del país fue excluido del análisis AHP, con alrededor del 22 257 km<sup>2</sup> del área

restante consideradas zonas de alto potencial al ser “Altamente adecuadas” (0.09%) o “Muy adecuadas” (5.55%), ubicándose en zonas adyacentes al sistema de transmisión en la región sur, así como en la costa norte y central del país. El contraste con la ubicación de las instalaciones fotovoltaicas de gran escala ya operativas y los análisis de sensibilidad realizados brindaron confianza a los resultados. La metodología utilizada permite su mejora en el tiempo, así como la intervención de grupos de interés y su replicabilidad para otros sistemas energéticos renovables.

### Highlights:

- Primera experiencia en la identificación de sitios adecuados para plantas solares fotovoltaicas en Perú mediante técnicas de decisión multicriterio
- Proceso analítico jerárquico (AHP) combinado con sistemas de información geográfica (GIS) fueron usados para clasificar criterios climáticos, topográficos y uso de suelo, y técnico-económicos
- Debido a la necesidad de proteger su diversidad de paisajes, biomas y ecosistemas, el 69.52% fue considerado como área restringida
- Perú tiene alrededor de 22 257 km<sup>2</sup> de zonas con alto potencial para proyectos fotovoltaicos de gran escala
- Una buena correlación fue observada entre áreas identificadas como potencialmente adecuadas y la ubicación actual de instalaciones fotovoltaicas de gran escala a lo largo del país

**Keywords:** *Método analítico jerárquico; Sistema de información geográfica; Método de análisis multicriterio; Selección de sitio; Planta solar fotovoltaica; Energía renovable; Perú*

**Conteo de palabras:** 6265

### Lista de acrónimos incluidas unidades y nomenclatura:

AHP: Proceso Analítico Jerárquico

ANA: Autoridad Nacional del Agua de Perú

AVNB: Asociaciones Vegetales No Boscosas

CGIAR-CSI: CGIAR Consorcio de Información Espacial

CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono

CSFV: Central Solar Fotovoltaica

DEM: Modelo de Elevación Digital

DHI: Irradiancia Horizontal Difusa

DNI: Irradiancia Directa Normal

ESMAP: Programa de Asistencia para la Gestión del Sector Energía

GHI: Irradiancia Horizontal Global

GIS: Sistema de Información Geográfica

Gt: Gigatonelada

GWh/year: Gigawatt-hora por año

IDEP: Infraestructura de Datos Espaciales de Perú

IGN: Instituto Geográfico Nacional de Perú

INGEMMET: Instituto de Geología, Minería y Metalurgia de Perú

IRENA: Agencia Internacional de Energía Renovable

kWh/m<sup>2</sup>: Kilowatt-hora por metro cuadrado

m<sup>2</sup>: Metro cuadrado

MCDM: Toma de decisión Multi-Criterio

MINAM: Ministerio del Ambiente de Perú

MINCUL: Ministerio de Cultura de Perú

MINEM: Ministerio de Energía y Minas de Perú

MTC: Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú

MW: Megawatt

NIMBY: No en mi patio

NREL: Laboratorio Nacional de Energía Renovable de US

OSINERGMIN: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minas

PFDM: Productos Diferentes de Madera

PIACI: Población Indígena en Aislamiento o Contacto Inicial

RER: Recurso Energético Renovable

SEIN: Sistema Eléctrico Interconectado Nacional de Perú

SERFOR: Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre de Perú

SERNANP: Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado de Perú

SRTM: Misión Topográfica Radar Shuttle



## 1. Introducción

Históricamente, la generación de energía en el mundo ha estado condicionada a la extracción y utilización de los recursos naturales que provee el ambiente, especialmente de los productos derivados de petróleo, los cuales desde la década de los años sesenta han sido fuente del 80% de la energía global producida [1].

Sin embargo, el acelerado y desenfrenado incremento en la demanda energética mundial, el cual proyecta requerir un 25% más de energía para el 2040 [2], así como las externalidades negativas atribuidas al cambio climático, relacionados a las emisiones de gases de efecto invernadero (con crecimiento de un 2.7% llegando al record histórico de  $37.1 \pm 2$  Gt de CO<sub>2</sub> al 2018) [3] y temperatura global (con nueve de los diez años más cálidos ocurridos desde 2005, y siendo los años entre 2014 a 2018 los más cálidos registrados) [4]; y el paulatino y sostenido agotamiento de los recursos fósiles no renovables, con reservas probadas suficientes (al 2017 y asegurando los mismos niveles de producción global) de petróleo, gas natural y carbón para suministrar 50.2, 52.6 y 134 años, respectivamente [5], han forzado a nuestra sociedad a cuestionar el modelo actual en cuanto a la gestión de los recursos naturales y al manejo de los recursos energéticos.

A nivel nacional esto no es una excepción. Si bien la participación anual promedio de recursos energéticos renovables superó el 5% de la producción eléctrica en Perú por primera vez a partir del 2017 [6], es importante reconocer la necesidad de acelerar el proceso de diversificación de la matriz energética nacional [7] [8], desarrollando a mayor profundidad proyectos asociados a tecnologías limpias y renovables (llegando a ser hasta el 20% de la oferta de generación energética al 2040 de acuerdo al Plan NUMES) [1], los cuales nos permitan diversificar nuestras fuentes energéticas, reducir nuestra dependencia de combustibles fósiles nocivos al ambiente.

Tomando en cuenta el enorme potencial energético renovable con el que Perú cuenta [9], en especial el relacionado al aprovechamiento de la energía solar, los proyectos de sistemas fotovoltaicos se tornan cada vez más atractivos tanto para los inversionistas como para el sector gubernamental, considerando a) sus bajas emisiones de CO<sub>2</sub> en todo su ciclo de vida y

los niveles de contaminación y mortalidad asociados a esta [10], b) los continuos avances y la maduración en la tecnología [11], c) el avance de las economías de escala en los procesos de manufactura [12] y d) su continua reducción de precios [13], los permite situarse actualmente en competencia directa con los costos de producción (a nivel o en algunos casos por debajo) de electricidad con fuentes convencionales [14] [15] [16].

Así, en el marco de las plantas solares fotovoltaicas de gran escala (generalmente de al menos 5 MW), la selección del sitio o lugar donde se desarrollará el proyecto (*siting* o *site selection* en inglés) es una etapa compleja y decisiva para asegurar la viabilidad del proyecto [17], siendo esta uno de los primeros pasos tangibles en el proyecto de inversión. Comúnmente, se procede a identificar posibles restricciones y analizar múltiples factores en la zona seleccionada y sus impactos en el costo de la electricidad a ser generada, tomando en cuenta consideraciones físicas, ambientales y socioeconómicas [18] como el clima e irradiación local, disponibilidad de tierras, interconexiones accesibles a la red, marco regulatorio nacional, entre otros; permitiéndonos así determinar el área total disponible con la máxima producción anual de electricidad y rentabilidad posible [19]. Así, a modo de ejemplo, un terreno idóneo estaría expuesto a altos niveles de irradiación solar en terrenos con poca pendiente y de poco atractivo agrícola, siendo accesible mediante la red vial, a poca distancia de la red de transmisión y a una distancia prudente del área urbana.

Una de las herramientas más usadas recientemente para el análisis y planeamiento con recursos energéticos es el mapeo de áreas a través de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), ya que facilita la gestión y visualización de múltiples patrones espaciales a la misma vez, optimizando las características beneficiosas de los sitios seleccionados y minimizando las negativas de los mismos [20] [21] [22].

A su vez, y considerando que es necesaria la utilización de diversos criterios para la selección del sitio del proyecto, la aplicación de SIG en combinación con métodos de análisis multicriterio (MCDA) ha ganado popularidad en la gestión de proyectos energéticos. Revisiones de las diferentes técnicas de MCDA para aplicaciones relacionadas al desarrollo sostenible y energético han sido realizadas en diversas investigaciones [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31], especialmente en el caso de plantas solares fotovoltaicas [32] [33] [34], siendo el método

analítico jerárquico (AHP) considerado como uno de los más importantes y utilizados para la selección de zonas con el mayor potencial solar aprovechable [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44] [45] [46].

Si bien este tipo de estudios se han popularizado y se vienen realizando con mayor frecuencia, estos se han concentrado en Europa, América del Norte, el Medio Oriente y Asia [27] [28] [29] [42], siendo aplicados en su mayoría a pequeñas áreas geográficas de estudio (desde regiones a distritos dentro de provincias) [38]. En Sudamérica, estudios que utilizan metodologías MCDA se han llevado a cabo en Ecuador [47] [48] [49], Colombia [50] [51] y Chile [52]. Adicionalmente, la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), bajo el contexto de la búsqueda de oportunidades de inversión a nivel continental en 2016 [53] [54], desarrolló un análisis de aptitud de áreas para sistemas solares y eólicos, recomendando replicar este tipo de análisis a nivel de país con información local más detallada. Nuestra revisión bibliográfica no revela estudios basados en técnicas GIS-AHP para la selección de zonas adecuadas de inversión en tecnologías renovables a ningún nivel geográfico en Perú, llegando a ser esta investigación la primera contribución en el tema.

Además, el estudio contribuirá en el fortalecimiento del conocimiento energético en el país a través de la implementación de una metodología replicable a esta y otras tecnologías renovables (cada vez que las respectivas restricciones, criterios y pesos jerárquicos sean identificados), así como aplicable a distintos niveles geográficos; brindándole información relevante a funcionarios públicos y tomadores de decisiones para una planificación estratégica del recurso en sus localidades, y a los formuladores de proyectos, permitiendo enfocar sus esfuerzos a áreas adecuadas que ya cuenten con información base, sistematizada y analizada.

En este artículo, en primer lugar procedimos a sistematizar una base de datos de capas o *shapefiles* GIS, adquiridas a través de portales de acceso público de organizaciones gubernamentales nacionales, y en algunos casos puntuales, de organizaciones internacionales. A continuación, son seleccionados los factores de restricción (33), y criterios (7), siendo estos últimos jerarquizados a través de la metodología AHP. Finalmente, haciendo uso de las herramientas GIS y los criterios jerarquizados se creó un mapa final de idoneidad, en la cual se diferencian zonas en el territorio nacional consideradas “Altamente adecuado”, “Muy

adecuado”, “Adecuado”, “Marginalmente adecuado” e “Inadecuado” para el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos de gran escala.

## **2. Metodología**

### **2.1. Área de Estudio**

Ubicado en la parte central occidental de Sudamérica, entre los paralelos  $0^{\circ} 01' 48''$  y  $18^{\circ} 21' 03''$  latitud sur y meridianos  $68^{\circ} 39' 27''$  y  $81^{\circ} 19' 05''$  latitud oeste, y con una extensión que alcanza los  $1\ 285\ 215.60\ \text{km}^2$ , el Perú es un país de contrastes, privilegiado en diversidad de paisajes, biomas y ecosistemas a lo largo de su territorio, debido a la interrelación de factores geográficos, oceanográficos, climáticos, ecológicos entre otros [55].

Así, el país está caracterizado por la presencia de una región costera (11.74% del territorio nacional) desértica, semiárida, relativamente plana y ascendiendo hasta un límite altitudinal aproximado de 1000 msnm.; la región de la sierra, conteniendo la cadena montañosa tropical más larga del mundo con elevaciones de hasta más de 6000 metros, con valles interandinos, mesetas altoandinas, punas, laderas y nevados típicos en la zona, así como importantes depósitos de minerales (28% de la extensión nacional); y la selva amazónica, la región más amplia (58.9% del total nacional) y rica en petróleo y recursos forestales, constituida de territorio llano con laderas cubiertas de bosque, vertientes orientales y contrafuertes andinos, con altitudes desde los 500 hasta los 2500 msnm (selva alta) o llanuras por debajo de los 500 msnm (selva baja) [55] [56].

Debido a su cercanía a la línea ecuatorial, el Perú presenta una alta exposición a la irradiación solar, evidenciada por los niveles recibidos a lo largo del año, que en la mayoría del territorio alcanzan los  $5 \pm 1\ \text{kWh/m}^2$  diarios, siendo la costa sur ( $16^{\circ}$  a  $18^{\circ}$  S) la zona de mayor potencial con  $6 - 6,5\ \text{kWh/m}^2$  en promedio [57]. A 2018, las subastas energéticas nacionales han permitido la instalación de 7 centrales solares fotovoltaicas (CSFV) con una potencia instalada nominal total de 280.48 MW, generando 745.2 GWh/año (correspondiente al 20% de la participación de las energías renovables en el país o al 1.47% de la producción energética nacional) [58].

Así, si bien la geografía del Perú presenta enormes retos al establecimiento de proyectos de inversión solares debido a sus características particulares (necesidad de grandes extensiones de tierra requerida, libres de interferencias físicas/culturales, accesibles y de baja pendiente), también refleja un enorme potencial de crecimiento y desarrollo en el sector energético, siempre y cuando la selección de los sitios se realice de manera sistemática, con información específica, a escala y lo más representativa posible a la realidad.

## 2.2. Método Analítico Jerárquico (AHP)

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, científicos e investigadores han usado el método AHP, en base a sus múltiples ventajas [59], para resolver operaciones complejas, seleccionando alternativas adecuadas que consideran diferentes criterios y restricciones específicas al área y/o sector estudiado. Así, puede ser visto como un método formal, robusto y flexible para la toma de decisiones, usando la información y experiencias adquiridas por diferentes participantes (stakeholders, políticos, proyectistas, expertos de la materia, entre otros), bajo un proceso racional y explícito [60].

Desarrollado por primera vez por Thomas L. Saaty en 1971-1975 [61] [62], este modelo matemático determina la importancia o preferencia relativa de múltiples variables a través de las denominadas “comparaciones por pares”, permitiendo además validar la consistencia de la decisión tomada y reducir cualquier sesgo e inconsistencia incurridos en el proceso.

A continuación se detallan las etapas necesarias para llevar a cabo un análisis AHP para  $n$  criterios:

- (1) En la primera etapa de “Modelización”, la meta del estudio, criterios y alternativas son definidos. Así, los criterios deben representar el problema de la manera más completa posible [59], siendo estos capaz de ser medidos y cuantificados (ya sean de manera numérica o subjetiva).
- (2) En segundo lugar, se realiza un proceso de “Valoración”, en la cual se ordenan y ponderan cada uno de los criterios seleccionados de acuerdo a su importancia asignada. Esto se hace a través de la matriz de comparaciones pareadas definida por  $(n \times n)$ , en la cual se compara cada criterio  $i$  en relación con cada criterio  $j$ , mostrado en

la Tabla 1. Para las comparaciones se utiliza la escala de valor sugerida por Saaty [62], la cual utiliza nueve valores integrales presentados en la Tabla 2.

**Tabla 1**  
Matriz de Comparaciones Pareadas

	<b>Criterio 1</b>	<b>Criterio 2</b>	<b>Criterio 3</b>
<b>Criterio 1</b>	1	Criterio <sub>12</sub>	Criterio <sub>13</sub>
<b>Criterio 2</b>	Criterio <sub>21</sub>	1	Criterio <sub>23</sub>
<b>Criterio 3</b>	Criterio <sub>31</sub>	Criterio <sub>32</sub>	1

**Tabla 2**  
Escala AHP de Saaty

<b>Intensidad</b>	<b>Definición</b>	<b>Explicación</b>
1	Igual importancia	Dos criterios contribuyen igualmente a los objetivos
3	Débil/moderada importancia	Experiencia o criterio favorece ligeramente un criterio sobre el otro
5	Esencial o fuerte importancia	Experiencia o criterio favorece fuertemente un criterio sobre el otro
7	Muy fuerte o demostrada importancia	Un criterio es favorecido muy fuertemente sobre el otro; su dominancia demostrada en la práctica
9	Absoluta importancia	La evidencia que favorece un criterio sobre el otro es el de mayor posible orden de afirmación
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos números de escala adyacentes	Representan compromisos entre prioridades listadas anteriormente
	Recíprocos de números anteriores	Si el criterio i tienen un número asignado al ser comparado con el criterio j, entonces j tendrá el valor recíproco al ser comparado con el criterio i

- (3) En el proceso de “Priorización y Síntesis”, se procesa la denominada importancia o prioridad de cada elemento. Para esto, es necesario establecer una matriz de comparación de pares normalizada, la cual se obtiene usando la Ecuación 1 para cada entrada en la matriz, con  $n$  siendo el número de criterios seleccionados.

**Ecuación 1**

$$\overline{Criterio}_{ij} = \frac{Criterio_{ij}}{\sum_{i=1}^n Criterio_{ij}}$$

A continuación, se obtiene el promedio de cada fila mediante la Ecuación 2 para obtener el vector prioridad o el peso relativo ( $w_i$ ). Así, por cada elemento el peso relativo se encuentra dentro del rango 0-1; donde un valor cercano a la unidad demuestra un mayor impacto del elemento en la elección del sitio para la instalación fotovoltaica.

**Ecuación 2**

$$w_i = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{Criterio}_{ij}}{n}$$

Finalmente, para obtener el mapa de idoneidad se utiliza la Ecuación 3, tomando en consideración las áreas disponibles en la cuales no hay interacción con las restricciones seleccionadas. Así, por cada pixel del área de estudio se obtiene la sumatoria de cada valor de criterio ( $x_i$ ) asignado a la escala adecuada, multiplicada por cada peso relativo ( $w_i$ ) de los criterios identificados.

**Ecuación 3**

$$Mapa\ Idoneidad = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i$$

- (4) Tomando en cuenta las inconsistencias por la participación de diversos juicios de valor, Saaty desarrolló un método de evaluarlas a través del “Análisis de Consistencia”. En primer lugar, se determina el índice de consistencia (CI), usando la Ecuación 4, donde  $\lambda_{max}$  es el máximo valor eigenvalue de la matriz de comparación pareada y  $n$  siendo el tamaño de matriz.  $\lambda_{max}$  es calculada con el promedio de los productos de los pesos

relativos ( $w$ ) y los valores de la matriz de comparación como numeradores, y el vector de coeficientes de los pesos como denominadores [39].

**Ecuación 4**

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

Finalmente, el ratio de consistencia (CR) es expresado a través de la Ecuación 5, donde el  $RI$  es un valor de consistencia aleatoria determinado a partir del tamaño de la matriz y que puede ser tomado de la Tabla 3. Si el valor del CR es menor al 10% ( $CR < 0.10$ ), la matriz de comparaciones pareadas cumple con el análisis de consistencia y esta puede ser tomada en cuenta.

**Ecuación 5**

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

**Tabla 3**  
Valores de RI

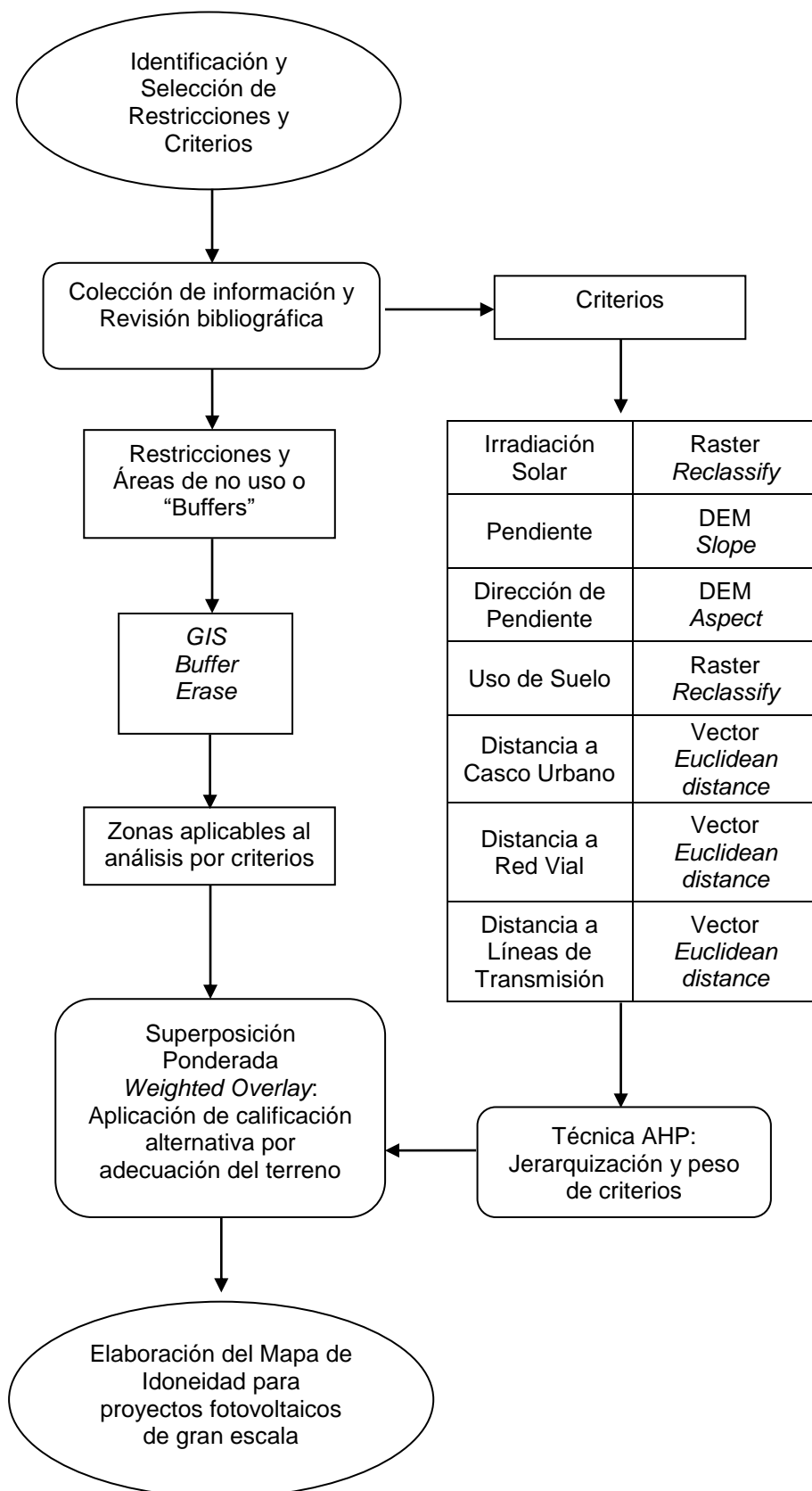
Tamaño de Matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

### 2.3. Descripción del Proceso

La metodología propuesta para el estudio se detalla en la Figura 1. La información de las capas o *shapefiles* fueron adquiridas de diversas fuentes gratuitas, tomando prioridad las obtenidas de entidades gubernamentales nacionales, ya sea a través de sus portales web institucionales de acceso público o de solicitud a funcionarios que gestionan esta información. Si al momento del estudio no se obtuvo acceso a una determinada capa considerada necesaria, se procedió a realizar la búsqueda y obtención de la información pertinente, procedentes de organizaciones internacionales u otras fuentes de información.



Figura 1  
Metodología del estudio



Un proceso de análisis con cuatro etapas fue utilizado:

- (1) En la primera etapa, las diferentes capas de restricciones son aplicadas al territorio nacional mediante GIS, determinando las zonas a ser excluidas, así como las restantes en las que se pueden desarrollar los proyectos fotovoltaicos.
- (2) En la segunda etapa, la técnica de AHP es aplicada a los criterios para determinar su influencia y establecer un ranking entre ellos. Considerando la necesidad de reducir los conflictos de intereses y prejuicios personales [37] [65], una encuesta fue diseñada y administrada a especialistas relacionados a la energía solar y ejecución de proyectos, con el objetivo de incorporar sus conocimientos y experticia en el proceso AHP, específicamente en la ponderación relativa de criterios a través del llenado de las matrices de comparaciones pareadas.

Buscando evaluar el grado de consistencia entre las opiniones de los expertos, el coeficiente de concordancia de Kendall es utilizado [66]. El coeficiente  $W$  se encuentra entre cero y la unidad, con valores de 0 a 0.2 siendo opiniones no consistentes, de 0.2 a 0.4 conclusiones pobremente consistentes, de 0.4 a 0.6 resultados moderadamente consistentes, de 0.6 a 0,8 bastante consistentes, de 0.8 a 0.9 altamente consistentes y de 0.9 a 1 enteramente consistentes [64].

En la Ecuación 6,  $S$  representa la sumatoria cuadrada de las calificaciones  $R_i$ , con  $\bar{R}$  siendo el valor promedio de los  $R_i$  (Ecuación 7);  $m$  es el número de encuestados,  $n$  el número de criterios encuestados y  $T$  es el factor de corrección cuando nos encontramos con opiniones idénticas, en donde  $t_k$  es el número de rankings emparejados en cada ( $k$ ) de  $g$  grupos de factores conectados o parejas (Ecuación 8).

**Ecuación 6**

$$W = \frac{12 S}{m^2(n^3 - n) - mT}$$

**Ecuación 7**

$$S = \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2$$

**Ecuación 8**

$$T = \sum_{k=1}^g (t_k^3 - t_k)$$

Los resultados de las encuestas son consolidadas en una matriz general, la cual fue la utilizada para las siguientes etapas del análisis AHP. En el Appendice se presenta la encuesta final enviada.

- (3) En la tercera etapa, se utiliza la función de Superposición Ponderada o “Weighted Overlay”, en la cual se homogenizan los distintos rangos de numeración de los criterios tomando en consideración los valores de entrada de los criterios, y el peso relativo de cada uno de ellos obtenidos en el procedimiento de AHP. Así, el proceso reclasifica los valores de entrada a una escala alternativa o de preferencia que va del 1 al 5 de acuerdo a la Tabla 4, multiplica estos valores de celda por el peso de importancia del criterio obtenida en el proceso AHP, y finalmente suma los valores de celda resultante para producir un ráster de salida.

**Tabla 4**  
Escala del Mapa de Idoneidad

<b>Escala (x<sub>i</sub>)</b>	<b>Nivel de Idoneidad</b>
1	Inadecuado
2	Marginalmente adecuado
3	Adecuado
4	Muy adecuado
5	Altamente adecuado

- (4) En la cuarta etapa, y considerando el mapa final de restricciones, se determina un mapa de idoneidad con la finalidad de visualizar la distribución espacial de los potenciales sitios a nivel nacional, para la instalación de proyectos fotovoltaicos de gran

escala. Finalmente, para delimitar polígonos específicos con el área necesaria para la mencionada instalación, se asume que 18 000 m<sup>2</sup> son necesarios para producir aproximadamente 1 MW de potencia como usado en Al Garni & Awasthi [36]; y que a excepción de una, todas las centrales solares (pertenecientes a la denominación de recursos energético renovable o RER) que se encuentran en operación a nivel nacional tienen como mínimo 16 MW de potencia efectiva [67], considerándose proyectos de 100 MW de acuerdo a su viabilidad por economía de escala, así como por la estadística de solicitudes de concesiones temporales para proyectos fotovoltaicos en los últimos 5 años [68].

En este estudio, el software ArcGIS versión 10.5 de ESRI (compatible con información a nivel de vector y ráster) fue utilizado para la visualización de la información obtenida, así como para derivar, procesar, editar y/o generar nueva información en forma de capas, a través del uso de las herramientas encontradas en el ArcToolbox.

### **2.3.1. Restricciones**

Representan áreas en las cuales no es posible la instalación y desarrollo de proyectos fotovoltaicos de gran escala, siendo estas excluidas del análisis de idoneidad debido a su protección especial, a su uso para propósitos considerados más importantes, o que debido a su naturaleza no pueden ser considerados para la construcción de infraestructura [39], entre otros a ser considerados de acuerdo a la características específicas del área de estudio.

La elección de las restricciones se realizó a través de la revisión bibliográfica realizada, entrevistas con especialistas nacionales, y adicionalmente, de ser el caso, lo establecido en la normativa nacional vigente. Además, se tomó en consideración tanto la disponibilidad de información, así como el alcance geográfico de las capas a disposición.

Para la mayoría de capas de restricciones (de naturaleza ambiental, social y técnica) en el estudio se tomaron en cuenta adicionalmente áreas restringidas o “buffers”, eligiendo su extensión de acuerdo a un análisis conservador (la mayor extensión encontrada) de la revisión bibliográfica y a las conversaciones con expertos en la materia respectiva.

La Tabla 5 detalla las variables, fuentes de descarga, así como las investigaciones que sustentan estas restricciones y que fueron tomadas en este estudio como referencias.

### **2.3.2. Criterios**

Son definidos como un aspecto observable y medible de la naturaleza, haciéndolos posible ser caracterizados, y a su vez cuantificar alternativas con los mismos [63]. Es el set de información que influencia la adecuada localización de los proyectos fotovoltaicos.

Al igual que las restricciones, los criterios fueron cuidadosamente seleccionados tomando en cuenta la revisión bibliográfica, siendo estos reafirmados mediante entrevistas y encuestas a expertos locales en el campo de energías renovables (especialmente solar fotovoltaica) y el diseño y ejecución de proyectos de inversión. Así, siete criterios clasificados en climáticos, topográficos y técnico-económicos fueron definidos para resolver el problema, detallados en la Tabla 6.

Yushchenko *et al.* [42] concluye que si bien existe poca variación en la elección de las restricciones, la selección de los criterios y su jerarquización difiere considerablemente entre estudios, detallando a las características particulares de cada área, el criterio de los evaluadores y la disponibilidad de información como algunas razones.

**Tabla 5**  
Restricciones seleccionadas para la instalación de proyectos fotovoltaicos

Categoría	Variable (Capa o layer)	Área Restringida o Buffer	Fuente de descarga	Referencias
Ambiental	Áreas Naturales Protegidas, Áreas de Conservación Regional, Áreas de Conservación Privadas, Zonas de Amortiguamiento	-	Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP) <a href="http://geo.sernanp.gob.pe/geoserver/principal.php">http://geo.sernanp.gob.pe/geoserver/principal.php</a>	[32], [35], [37], [40], [44], [62], [63], [71]
	Ecosistemas Frágiles	No menor de 1000 m.		
	Bosques de Producción Permanente	No menor de 1000 m.		
	Bosque Protector	No menor de 1000 m.	Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR) <a href="https://geo.serfor.gob.pe/visor/">https://geo.serfor.gob.pe/visor/</a>	[32], [35], [37], [40], [44], [62], [63], [71]
	Concesiones	-		
	Bosque Local (Título Habilitante)	-		
	Cobertura Forestal de Reserva			

Cambio de Uso de Suelo para Fines Agrícolas				
Permisos				
Cesiones en Uso				
Autorizaciones de PFD en AVNB				
Autoridad Nacional del Agua (ANA)				
Cuerpos de Agua (Lóticos y Lénticos)	No menor de 1000 m.		<a href="http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/364c4775-cf00-4e16-9d34-b48341f3e30e">http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/364c4775-cf00-4e16-9d34-b48341f3e30e</a> <a href="http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/7edf9bc8-98c5-4cbd-9727-afbdeee5b9ce">http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/7edf9bc8-98c5-4cbd-9727-afbdeee5b9ce</a>	
Autoridad Nacional del Agua (ANA)				
Glaciares y Lagunas Glaciares	No menor de 1000 m.		<a href="http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/1099ce9e-bd97-49c1-a32a-2eccb35fcf79">http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/1099ce9e-bd97-49c1-a32a-2eccb35fcf79</a> <a href="http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/6d825533-5346-421a-9c2b-308c10d3422f">http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/6d825533-5346-421a-9c2b-308c10d3422f</a>	[32], [37], [40], [69], [72], [73], [74]
Autoridad Nacional del Agua (ANA)				
Humedales	No menor de 1000 m.		<a href="http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/1d4a7f3a-585a-49f5-85a7-6b652f8cc80d">http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/1d4a7f3a-585a-49f5-85a7-6b652f8cc80d</a>	
Social	Monumentos Arqueológicos Prehispánicos	No menor de 1000 m.		
			Ministerio de Cultura (MINCUL) <a href="https://geocultura.cultura.gob.pe/#">https://geocultura.cultura.gob.pe/#</a>	[32], [36,44,70]
	Sitios declarados Patrimonio Mundial	No menor de 1000 m.		

	Reservas PIACI	-		
	Áreas Urbanas (Casco Urbano)	No menor de 1000 m.	Instituto Geográfico Nacional (IGN) <a href="https://www.idep.gob.pe/geovisor/DatosFundamentales/">https://www.idep.gob.pe/geovisor/DatosFundamentales/</a>	[32], [36], [37], [38], [40], [42], [44], [45], [69], [70], [74], [75]
Técnico	Carreteras (Red Vía Nacional)	No menor de 1000 m.		
	Carreteras (Red Vía Departamental)	No menor de 1000 m.		
	Carreteras (Red Vía Vecinal)	No menor de 1000 m.	Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) <a href="https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/descarga.html">https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/descarga.html</a>	
	Terminales de Transporte Terrestre, Líneas y Estaciones Férreas, Instalaciones Portuarias	No menor de 1000 m.		[32], [35], [36], [37], [40], [69], [75], [70], [73], [74]
	Aeródromos	No menor de 5000 m.		
	Infraestructura para Gas de Camisea	No menor de 1000 m.	Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) <a href="http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/">http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/</a>	
	Oleoducto Norperuano	No menor de 1000 m.		



**Tabla 6**  
Criterios seleccionados para la instalación de proyectos fotovoltaicos

Categoría	Criterio	Fuente de descarga	Escala	Valoración de Idoneidad	Referencias
Climático	Irradiación Solar (kWh/m <sup>2</sup> /día)	Banco Mundial – Proyecto Solargis <a href="https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/peru">https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/peru</a>	1 km	(5) > 6.4	[32], [35], [37], [38], [39], [40], [42], [45], [46], [52], [71], [69], [75], [76], [77], [73], [78]
				(4) 5.6 - 6.4	
Topográficos y Uso de Suelo	Pendiente (%)	Modelo de Elevación Digital (DEM) CGIAR CSI SRTM – NASA <a href="http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/">http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/</a>	90 m	(5) < 1	[32], [35], [37], [39], [40], [41], [45], [69], [70], [76], [77], [73], [79]
				(4) 1 - 3	
	Dirección de Pendiente (Aspecto)			(5) Norte	[35], [39], [40], [41], [45], [46], [79]
				(4) Noreste y Noroeste	
	Uso de Suelo (Tipo)	Ministerio del Ambiente (MINAM) y Ministerio de Agricultura (MINAGRI) Mapa de Capacidad de Uso Mayor de las Tierras	Nacional	(5) Tierras de Protección "X"	[32], [35], [37], [38], [39], [40], [45], [52], [70], [76], [79]
				(4) Tierras Aptas para Pastos "P"	
				(3) Mosaicos "AP" y "AX"	
				(2) Tierras Aptas para Cultivo en Limpio "A" y	

			Mosaicos con Tierras Aptas para Cultivos Permanentes "AC"
			(1) Tierras para Producción Forestal "F"
Técnico - Económico	Distancia a Casco Urbano (km)	Instituto Geográfico Nacional (IGN) <a href="https://www.idep.gob.pe/geovisor/DatosFundamentales/">https://www.idep.gob.pe/geovisor/DatosFundamentales/</a>	(5) < 1
			(4) 1 - 5
			(3) 5 - 10
			(2) 10 - 20
			(1) > 20
			[37], [38], [40], [41], [42], [45], [46], [52], [69], [75], [70], [77], [73]
	Distancia a Red Vial (km)	Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) <a href="https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/descarga.html">https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/descarga.html</a>	(5) < 0.1
			(4) 0.1 - 1
			(3) 1 - 3
			(2) 3 - 5
			(1) > 5
			[32], [35], [37], [38], [40], [41], [42], [45], [46], [52], [69], [75], [70], [76], [77], [73]
	Distancia a Líneas de Transmisión (km)	Ministerio de Energía y Minas (MINEM) <a href="https://www.osinergmin.gob.pe/newweb/uploads/Publico/MapaSEIN/">https://www.osinergmin.gob.pe/newweb/uploads/Publico/MapaSEIN/</a>	(5) < 1
			(4) 1 - 2
			(3) 2 - 3
			(2) 3 - 5
			(1) > 5
			[32], [35], [37], [38], [40], [41], [42], [46], [52], [69], [75], [70], [76], [77], [73]

### 2.3.2.1. Criterios Climáticos

La mayoría de los casos que estudian proyectos solares consideran a la irradiación solar como uno de los más importantes criterios de selección, siendo ampliamente conocido que a mayor irradiación solar disponible, mayor probabilidad de producción eléctrica. Para asegurar la solvencia económica de instalaciones fotovoltaicas, valores entre los 4.6 kWh/m<sup>2</sup> [38] y 4.9 kWh/m<sup>2</sup> [35] de promedio anual diario han sido considerados ideales, variando de acuerdo a los estudios y regiones [71].

Así, la irradiación solar horizontal (GHI), definida como la cantidad total de radiación recibida horizontalmente en la superficie, se perfila como el criterio idóneo para proyectos que comprenden tecnologías fotovoltaicas, ya que estas trabajan en presencia tanto de la irradiación directa normal (DNI), como de la irradiación horizontal difusa (DHI) (siendo la GHI la suma de ambos componentes).

En este estudio, la información del recurso solar fue adquirida de Solargis, proyecto fundado por el Programa de Asistencia para la Gestión del Sector Energía (ESMAP) y que preparó la información para su publicación por el Banco Mundial. La información correspondiente al GHI fue calculada con información atmosférica y satelital considerando intervalos de 10, 15 o 30 minutos (dependiendo de la región), tomando en cuenta los efectos del terreno a una resolución espacial nominal de 250 m; y las capas ráster fueron provistas con resolución espacial de 1 km y largo período de medición (1999 - 2015) [80]. Los rangos de clasificación de idoneidad se adoptaron a partir de la información de radiación solar nacional del Atlas de Energía Solar [57] y Solargis [80], así como la clasificación del Laboratorio Nacional de Energía Renovables de USA (NREL) [71].

Si bien la variable temperatura ambiental es considerada importante ya que afecta el rendimiento de los módulos fotovoltaicos (altas temperaturas ambientales incrementan la temperatura de las celdas, causando reducción en la producción de electricidad) [81] [82], y que en regiones con altas temperaturas ambientales (mayores de 30°C) los módulos son afectados significativamente [69], en este estudio no ha sido tomado como criterio considerando que las temperaturas promedio del país no sobrepasan estos límites [83] [84].

### 2.3.2.2. Criterios Topográficos y Uso de Suelo

Los criterios topográficos determinan la variabilidad espacial de la irradiación solar, ya que cambios en la elevación, orientación (pendiente y aspecto) y proyección de sombras tienen efectos en la cantidad de insolación recibida por diferentes localidades [75].

La presencia de pendientes afecta la viabilidad de los proyectos al incrementar los costos de inversión relacionados a requerimientos en movilización y nivelación de tierras [17] [85], así como problemas relacionados a estabilidad, erosión y drenaje [64]. Así, generalmente es preferible áreas planas o de baja pendiente. En adición, al considerar la posición geográfica del área de estudio (hemisferio sur), son preferibles pendientes o laderas con orientaciones hacia el norte, ya que estas reciben mayor cantidad de irradiación a lo largo del año en comparación a los otros puntos cardinales, además de permitir una configuración más densa de paneles, sin efectos negativos [86].

Considerando que IRENA no detalla un valor consensuado como límite para áreas de pendiente en proyectos fotovoltaicos de gran escala [69], así como la diversidad de valores encontrados en la literatura sobre el tema, con rangos máximos que van de los 3% [70] hasta los 30% [76], se ha elegido un valor de restricción hasta los 10% de pendiente, siendo valores mayores a este inviables para el estudio. En relación a la orientación, superficies hacia el norte fue considerado el aspecto más adecuado, con el noreste y noroeste como los siguientes en importancia, hasta llegar a la orientación sur clasificada como inadecuada.

Los mapas de pendiente y orientación son derivados del modelo digital de elevación (DEM) de la base de datos actual a la fecha (cuarta versión) de la Misión Topográfica Radar Shuttle (SRTM) de la NASA, obtenido del geoportal CGIAR-CSI [87], aplicando las herramientas de análisis espacial contenidas en el software GIS. La resolución de la información es de 90 m al ecuador.

El criterio de uso de suelos es uno de los que requieren más evaluación previa en los proyectos solares [37]. La gran mayoría de estudios concuerda en las tierras áridas y de baja productividad como las más adecuadas para el desarrollo solar [35] [38] [76], tomando en

cuenta la necesidad de proteger áreas con fines forestales y agrícolas de posibles procesos de degradación asociados a las instalaciones fotovoltaicas.

Se consideró lo dispuesto en el Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor, aprobado nacionalmente como Decreto Supremo en el 2009 [88], el cual en su nivel de abstracción más alta cuenta con cinco categorías de clasificación de acuerdo a la máxima vocación de uso del suelo. Las tierras de protección, las cuales no reúnen condiciones mínimas para la producción sostenible de cultivos ni producción forestal, han sido consideradas como la clasificación ideal en el estudio, ya que pueden ser destinadas, entre otros, para la producción energética en beneficio del estado, social y privado. Le siguen las tierras aptas para pastos; tierras aptas para cultivos en limpio y permanentes (y sus mosaicos); con las tierras aptas para producción forestal las menos idóneas.

El mapa de uso de suelos fue facilitado por el Ministerio del Ambiente como una capa vectorial, la cual fue reclasificada y convertida en ráster con una resolución de 90 m.

### **2.3.2.3. Criterios Técnico - Económicos**

Los criterios técnico económicos en el estudio son valorados en base a la localización y accesibilidad del proyecto solar, ya que contribuyen a la construcción e integración de la misma a la red eléctrica nacional. La cercanía a infraestructuras viales y sistema de transmisión, así como su relación con áreas residenciales, permite incrementar la viabilidad económica del proyecto, considerando que grandes distancias a las mismas podrían incurrir en mayores costos civiles y pérdidas eléctricas [37].

La proximidad del proyecto a la red vial evita costos por la construcción de nuevas carreteras, así como los impactos ambientales derivados de estos [64], además de permitir el transporte de componentes y recursos humanos, y facilitar las operaciones de reparación y mantenimiento [89]. Para determinar el nivel de adecuación del terreno en el estudio, se concluyó como distancia máxima desde el buffer establecido para las carreteras un valor de 5 km.

En cuanto al sistema de transmisión, su lejanía del proyecto está asociada a altos costos de construcción por la necesidad de nuevas líneas y/o subestaciones que puedan manejar los

altos voltajes y potencias requeridos en estos proyectos de gran escala [38] [44]. Considerando la literatura, se instauró como límite superior de clase más idónea un 1 km de distancia; mientras que se determinó un límite máximo de 5 km, considerando los costos asociados a cada km de línea de transmisión para iguales o superiores a 138 kV, las longitudes máximas de las líneas de transmisión existentes entre las centrales solares y sus subestaciones de oferta en el país [67], además de la bibliografía revisada.

Distancias cortas de proyectos solares a centros urbanos permiten acortar la distancia entre la oferta y la demanda eléctrica, reduciendo así la congestión en las redes de transmisión y distribución, y reduciendo pérdidas y costos asociadas al transporte de la electricidad [41] [45]. Sin embargo, es importante tomar en cuenta los posibles impactos que el proyecto podría suscitar por su cercanía a la población (contaminación ambiental, impedimento a crecimiento poblacional, efecto “Sí, pero aquí No”, entre otros) [40] [64] [77]. Esto explicaría la gran variedad de rangos de idoneidad encontrados en la literatura. Actualmente en el Perú, la venta de electricidad a consumir no se hace de manera directa a los usuarios finales, siendo esta generada en las centrales y vendida al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) para su transmisión y distribución. Así, el estudio considera que el grado de adecuación de las tierras es máximo al borde del buffer determinado, y mínimo a 20 km del mismo.

Las capas vectoriales de la red vial nacional, departamental y vecinal fueron obtenidos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) [90] al año 2018; mientras que la información referente a las líneas de transmisión se obtuvieron tanto del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minas (OSINERGMIN) [91], así como del Ministerio de Energía y Minas (MINEM). Finalmente, los datos del casco urbano fueron obtenidos del portal de Infraestructura de Datos Espaciales del Perú (IDEP) [92], perteneciente al Instituto Geográfico Nacional (IGN), con escala 1:100 000.

Para determinar las áreas idóneas en relación a la cercanía y/o lejanía de las estructuras mencionadas se utiliza la operación de Distancia Euclidiana, la cual describe la relación de cada celda a un origen determinado (objeto de interés), basándose en la distancia entre estos a través de una línea recta.

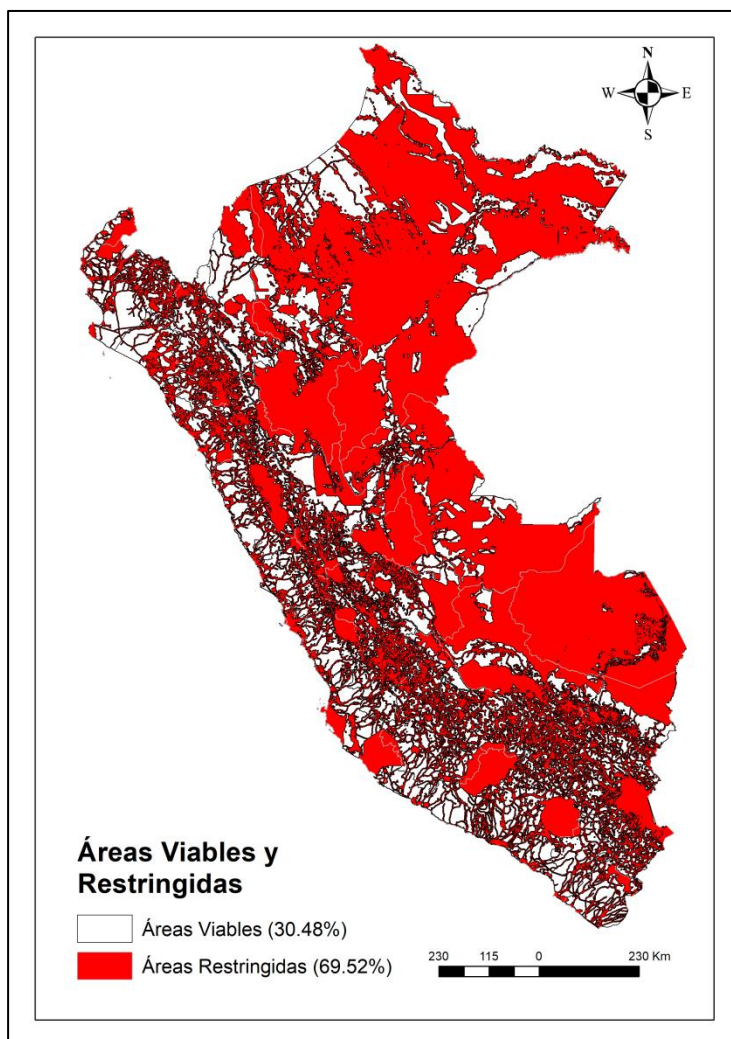
En relación a la distancia a los cuerpos de agua, este criterio no fue utilizado en el estudio debido a que tanto expertos como la revisión de literatura confirman su baja importancia en la elección de sitios para proyectos fotovoltaicos [44].

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1 Áreas de Restricción

Los resultados se visualizan en la Ilustración 1, mientras que información referente a las áreas restringidas y porcentajes se detallan en las Tabla 7 y Tabla 8.

**Ilustración 1**  
Áreas Restringidas



**Tabla 7**  
Información de Áreas Restringidas

Categoría	Fuente Oficial	Shapefile Utilizado	Buffer (m)	Área Restante (km <sup>2</sup> )	Porcentaje Restante del País (%)	Porcentaje Restado del País (%)	Porcentaje Restado Acumulado (%)
<b>Área Inicial de Perú</b>				1294681.07	100	-	-
<b>Ambiental</b>	<b>SERNANP</b>	Áreas Naturales Protegidas (ANP)	-	1109787.67	85.72	14.28	14.28
		Zonas Reservadas (ZR)	-	1103434.80	85.23	0.49	14.77
		Zonas de Amortiguamiento (ZA)	-	964356.89	74.49	10.74	25.51
		Áreas de Conservación Regional (ACR)	-	934459.08	72.18	2.31	27.82
		Áreas de Conservación Privada (ACP)	-	931143.59	71.92	0.26	28.08
		<b>Suma SERNANP</b>					<b>28.08</b>
	<b>SERFOR</b>	Ecosistemas Frágiles	1000	920382.79	71.09	0.83	28.91
		Bosques de Producción Permanente	1000	756563.37	58.44	12.65	41.56
		Concesiones	-	743711.38	57.44	0.99	42.56
		Bosque Local (Título Habilitante)	-	743216.15	57.41	0.04	42.59



		Bosque Protector	1000	741653.61	57.28	0.12	42.72	
		Cobertura Forestal Reserva	1000	741602.91	57.28	0.0039	42.72	
		Cambio Uso de Suelo para Fines Agrícolas	-	741602.91	57.28	0.00	42.72	
		Permisos	-	741337.51	57.26	0.02	42.74	
		Cesiones en Uso	-	741336.79	57.26	0.000055	42.74	
		Autorizaciones PFDM en AVNB	-	741246.28	57.25	0.0070	42.75	
		<b>Suma SERFOR</b>					<b>14.67</b>	<b>42.75</b>
	ANA	Cuerpos Lóticos	1000	659516.53	50.94	6.31	49.06	
		Cuerpos Lenticos	1000	654113.37	50.52	0.42	49.48	
		Glaciares	1000	651557.45	50.33	0.20	49.67	
		Lagunas Glaciares	1000	636719.65	49.18	1.15	50.82	
		Humedales	1000	552608.95	42.68	6.50	57.32	
		<b>Suma ANA</b>					<b>14.57</b>	<b>57.32</b>
<b>Total Ambiental</b>						<b>57.32</b>		
<b>Social</b>	MINCUL	Monumentos Arqueológicos Prehistóricos	1000	534346.30	41.27	1.41	58.73	
		Sitios Patrimonio Cultural	1000	529954.48	40.93	0.34	59.07	

		Territorios PIACI	-	529948.97	40.93	0.00043	59.07	
		<b>Suma MINCUL</b>					<b>1.75</b>	<b>59.07</b>
	IGN	Caso Urbano	1000	522153.01	40.33	0.60	59.67	
		<b>Suma Casco Urbano</b>					<b>0.60</b>	<b>59.67</b>
<b>Total Social</b>							<b>2.35</b>	
<b>Técnico</b>	MTC	Carretera Nacional	1000	500219.38	38.64	1.69	61.36	
		Carretera Departamental	1000	476808.45	36.83	1.81	63.17	
		Carretera Vecinal	1000	397608.89	30.71	6.12	69.29	
		Terminal Terrestre	1000	397608.36	30.71	0.000041	69.29	
		Línea Ferroviaria	1000	397235.29	30.68	0.029	69.32	
		Estación Ferroviaria	1000	397235.09	30.68	0.000015	69.32	
		Instalación Portuaria	1000	397228.49	30.68	0.00051	69.32	
		Aeródromos	5000	395410.68	30.54	0.14	69.46	
		<b>Suma MTC</b>					<b>9.79</b>	<b>69.46</b>
	INGEMMET	Gaseoducto	1000	395130.99	30.52	0.022	69.48	
		Oleoducto	1000	394563.65	30.48	0.044	69.52	
<b>Suma INGEMMET</b>					<b>0.065</b>	<b>69.62</b>		
<b>Total Técnico</b>							<b>9.85</b>	

**Tabla 8**  
Extensión de Áreas Restringidas en Departamentos

Departamento	Area Inicial (km <sup>2</sup> )	Area después de Restricciones (km <sup>2</sup> )	Área Restante (%)	Área Restada (%)
Amazonas	39574.51	20952.27	52.94	47.06
Ancash	35942.91	16752.48	46.61	53.39
Apurímac	21110.98	8570.65	40.60	59.40
Arequipa	63356.88	29545.65	46.63	53.37
Ayacucho	43534.18	19432.57	44.64	55.36
Cajamarca	33013.53	14425.47	43.70	56.30
Callao	160.92	24.71	15.35	84.65
Cusco	72368.68	18462.10	25.51	74.49
Huancavelica	22065.64	8938.26	40.51	59.49
Huánuco	37069.23	14958.05	40.35	59.65
Ica	21154.06	8483.11	40.10	59.90
Junín	44602.83	15419.86	34.57	65.43
La Libertad	25377.87	10198.71	40.19	59.81
Lambayeque	14373.63	8423.73	58.61	41.39
Lima	32338.36	16815.97	52.00	48.00
Lima Provincia	2706.08	760.40	28.10	71.90
Loreto	375629.12	84420.38	22.47	77.53
Madre de Dios	84868.03	2309.64	2.72	97.28
Moquegua	15820.77	9862.87	62.34	37.66
Pasco	23955.42	4491.97	18.75	81.25
Piura	36132.74	18970.68	52.50	47.50
Puno	73243.66	24611.92	33.60	66.40
San Martín	50377.72	8396.12	16.67	83.33
Tacna	16111.00	9179.88	56.98	43.02
Tumbes	4680.26	1247.32	26.65	73.35
Ucayali	105112.04	18908.88	17.99	82.01

Considerando las diferentes capas de restricción en este estudio, el 69.52% del país es excluido de los análisis posteriores. La posición del Perú como uno de los 17 países megadiversos del mundo [96], el cual alberga en conjunto más del 70% de la biodiversidad del planeta [93] y que cuenta con 84 zonas de vida de las 104 existentes globalmente [94] justifica el alto porcentaje de áreas restringidas a nivel nacional.

La mayor proporción de área restringida total (57.32%) fue de la categoría ambiental, con las áreas protegidas por el Estado (en sus diferentes modalidades y zonas de amortiguamiento) alcanzando el mayor porcentaje con el 28.08%. Las áreas relacionadas a la protección y aprovechamiento de recursos forestales o agrícolas alcanzaron el 14.67% del total de las áreas restringidas, seguidos de los cuerpos hídricos y sus buffers de protección que removieron el 14.57%. La categoría social (incluyendo el casco urbano) fue responsable del 2.35% del área excluida; mientras que la categoría técnica sumó 9.85%.

Departamentos de la región amazónica como Ucayali (82.01), San Martín (83.33%) y Madre de Dios (97.28%), junto con Pasco (81.25%) fueron los que presentaron el mayor porcentaje de área superficial total removida por las restricciones. Esto puede explicarse gracias a la diversidad de mecanismos legales (como las Áreas Naturales Protegidas por el Estado y las concesiones para Bosques de Producción Permanente) existentes para la protección específica de áreas de la Amazonía. Por el contrario, departamentos costeros como Moquegua (37.66%), Lambayeque (41.39%) y Tacna (43.02%) fueron los que menos porcentaje del área superficial total vieron extraídos en el presente estudio.

### **3.2 Coeficiente de Consistencia**

Se determinó el nivel de correlación de los rankings de los expertos, a través de la determinación del coeficiente de concordancia. Así, cinco expertos brindaron sus respuestas en relación a la categorización de criterios de acuerdo a su influencia para el desarrollo de proyectos de energía solar fotovoltaica. Se utilizó una escala de valoración ascendente a 10, pudiéndose repetir la valoración entre criterios cuando se considere. Los resultados se presentan en la Tabla 9

**Tabla 9**  
 Valores de las encuestas realizadas

Criterios	Expertos					Suma Total de Rankings	S
	1	2	3	4	5		
Irradiación Solar	10	6	10	10	10	46	229.31
Pendiente	4	4	3	4	7	22	78.45
Dirección de Pendiente	9	5	3	5	8	30	0.73
Capacidad de Uso Mayor de Suelo	7	3	8	7	2	27	14.88
Cercanía a Áreas Urbanas	5	7	5	3	3	23	61.73
Cercanía a Carreteras	6	8	5	5	4	28	8.16
Cercanía a Líneas de Transmisión	8	10	8	5	9	40	83.59
<b>Suma Total</b>	49	43	42	39	43	216	476.86
<b>Valor Promedio</b>	43.2	43.2	43.2	43.2	43.2		
<b>Desviación</b>	5.8	-0.2	-1.2	-4.2	0.2		
<b>Ranking del Experto</b>	5	1	3	4	1		

Considerando los resultados de la tabla, observamos que el criterio de irradiación solar fue el de mayor significancia en determinar las zonas óptimas para solar fotovoltaico, siendo la cercanía a las líneas de transmisión el segundo más alto. El de menos significancia resultó el criterio de pendiente. En cuanto al ranking de los encuestados, considerando la desviación a los resultados promedio, el de mayor rating fueron los encuestados 2 y 5; siendo el encuestado 1 el más lejano del promedio.

El coeficiente de consistencia hallado fue de 0.69, lo cual evidencia una buena coherencia entre las opiniones de los expertos. Consideramos  $T$  con un valor de 18 al denotarse dos pares de rankings iguales en el encuestado 3 y uno en el encuestado 4:

$$W = \frac{12 \times 476.86}{5^2(7^3 - 7) - 5 \times 18} = 0.69$$

### 3.3 Ponderación de Criterios y AHP

La matriz de comparaciones pareadas, expuesta en la Tabla 10, fue construida en base a los resultados de las encuestas a los especialistas. A partir de esta se generó la matriz auxiliar normalizada de la Tabla 11, en la cual cada valor es resultado de la relación de cada valor del criterio con la suma de la columna correspondiente, y se obtiene el vector de prioridad o peso de ponderación, que es el promedio de la suma de los valores normalizados para cada criterio.

En resumen, de acuerdo a lo representado en los vectores de prioridad, se detalla a la irradiación solar con un peso ponderado del 45%, la cercanía a las líneas de transmisión con un 26%, el aspecto o dirección de pendiente obtuvo un 9%, la cercanía a carreteras alcanzó un 7%, la capacidad de uso mayor de suelo con 6%, la cercanía a las ciudades fue un 4% y el porcentaje de pendiente un 3% (Tabla 11).

**Tabla 10**  
 Matriz de comparaciones pareadas

	<b>Irradiación Solar</b>	<b>Pendiente</b>	<b>Dirección de Pendiente</b>	<b>Capacidad de Uso Mayor de Suelo</b>	<b>Cercanía a Áreas Urbanas</b>	<b>Cercanía a Carreteras</b>	<b>Cercanía a Líneas de Transmisión</b>
Irradiación Solar	1	9	6	8	9	7	3
Pendiente	0.11	1	0.33	0.50	1	0.33	0.14
Dirección de Pendiente	0.17	3	1	2	3	1	0.25
Capacidad de Uso Mayor de Suelo	0.13	2	0.5	1	2	1	0.20
Cercanía a Áreas Urbanas	0.11	1	0.33	0.5	1	0.5	0.14
Cercanía a Carreteras	0.14	3	1	1	2	1	0.20
Cercanía a Líneas de Transmisión	0.33	7	4	5	7	5	1
<b>Suma Total</b>	<i>1.99</i>	<i>26.00</i>	<i>13.17</i>	<i>18.00</i>	<i>25.00</i>	<i>15.83</i>	<i>4.94</i>

**Tabla 11**  
Matriz de comparaciones normalizada

	Irradiación Solar	Pendiente	Dirección de Pendiente	Capacidad de Uso Mayor de Suelo	Cercanía a Áreas Urbanas	Cercanía a Carreteras	Cercanía a Líneas de Transmisión	Vector de Prioridad = Ponderación ( $w_i$ )
Irradiación Solar	0.50	0.35	0.46	0.44	0.36	0.44	0.61	45%
Pendiente	0.06	0.04	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	3%
Dirección de Pendiente	0.08	0.12	0.08	0.11	0.12	0.06	0.05	9%
Capacidad de Uso Mayor de Suelo	0.06	0.08	0.04	0.06	0.08	0.06	0.04	6%
Cercanía a Áreas Urbanas	0.06	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	4%
Cercanía a Carreteras	0.07	0.12	0.08	0.06	0.08	0.06	0.04	7%
Cercanía a Líneas de Transmisión	0.17	0.27	0.30	0.28	0.28	0.32	0.20	26%



De acuerdo a lo esperado, la irradiación solar obtuvo el más alto peso ponderado entre los criterios, considerando que la producción eléctrica es directamente dependiente de la cantidad de irradiación que puede ser aprovechada por el sistema, por lo que las zonas idóneas deben mantener localizaciones con altos niveles de este. Los estudios referenciados en [32], [37], [38], [40], [41], [42], [44], [45], [46], [69], [75], [76] concuerdan con esta lógica.

La cercanía a las líneas de transmisión fue el segundo criterio con mayor ponderación en el estudio. La compra de grandes longitudes de líneas de transmisión pueden resultar caras, además de que su instalación requiere el desarrollo de estudios ambientales, por lo que la necesidad de disminuir la distancia entre la generación y e instalaciones de transmisión ya existentes se evidencia. Los siguientes estudios colocan al criterio en similar posición: [32], [37], [38], [42], [44], [75], [70].

El criterio referente a la topografía, especialmente el de pendiente, se encontró constantemente entre el segundo o tercer criterio con mayor dominio en la bibliografía [40], [41], [45], [46], [69], [75], [76], por lo que resulta interesante el contraste observado, siendo este el que ocupó la última posición en el estudio. Teorizamos que las previas instalaciones fotovoltaicas de gran escala en el país, al haber sido todas en zonas costeras y desérticas con muy baja pendiente, influyeron en el razonamiento de los expertos en relación a este criterio.

En relación al análisis de consistencia, la Tabla 12 detalla la información referente a los vectores de suma de ponderaciones y los vectores de consistencia, los cuales son necesarios para el cálculo de los términos  $\lambda_{max}$  y  $CI$ .

$$\lambda_{max} = \frac{\sum \text{Vectores de Consistencia}}{\text{Número de Criterios}} = 7.18$$

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - \text{Número de Criterios})}{(\text{Número de Criterios} - 1)} = \frac{(7.18 - 7)}{(7 - 1)} = 0.03$$

**Tabla 12**  
 Matriz de vectores de consistencia

	<b>Irradiación Solar</b>	<b>Pendiente</b>	<b>Dirección de Pendiente</b>	<b>Capacidad de Uso Mayor de Suelo</b>	<b>Cercanía a Áreas Urbanas</b>	<b>Cercanía a Carreteras</b>	<b>Cercanía a Líneas de Transmisión</b>	<b>Vector de Suma de Ponderaciones</b>	<b>Vector de Consistencia</b>
Irradiación Solar	0.45	0.31	0.53	0.48	0.32	0.50	0.78	3.36	7.46
Pendiente	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02	0.04	0.24	7.07
Dirección de Pendiente	0.08	0.10	0.09	0.12	0.11	0.07	0.06	0.63	7.09
Capacidad de Uso Mayor de Suelo	0.06	0.07	0.04	0.06	0.07	0.07	0.05	0.42	7.09
Cercanía a Áreas Urbanas	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.25	7.11
Cercanía a Carreteras	0.06	0.10	0.09	0.06	0.07	0.07	0.05	0.51	7.09
Cercanía a Líneas de Transmisión	0.15	0.24	0.35	0.30	0.25	0.36	0.26	1.91	7.34

El  $CI$  es comparado con el valor  $RI$  (que para el caso de siete criterios es de 1.32), dándonos como resultado el ratio de consistencia  $CR$ . Al encontrarse este valor por debajo del 10% (0.1), concluimos en la consistencia de las comparaciones pareadas.

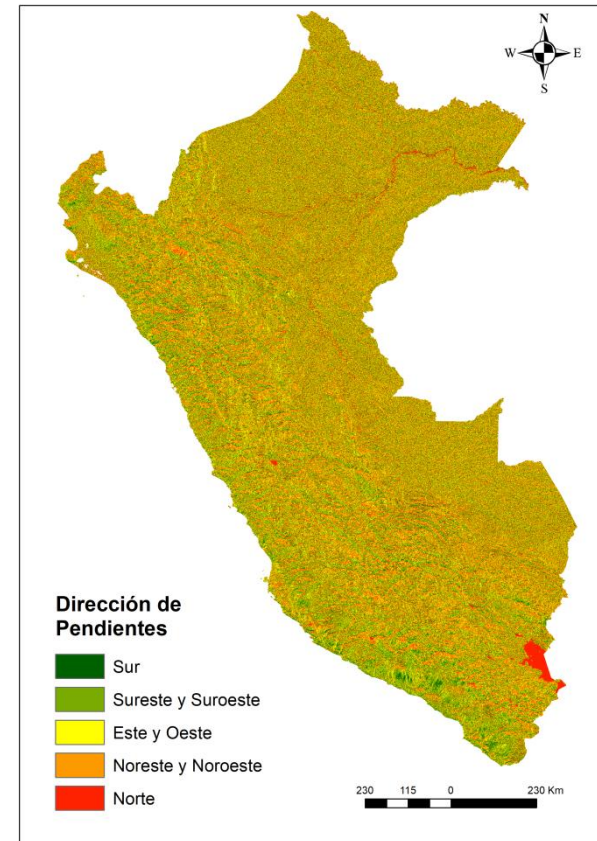
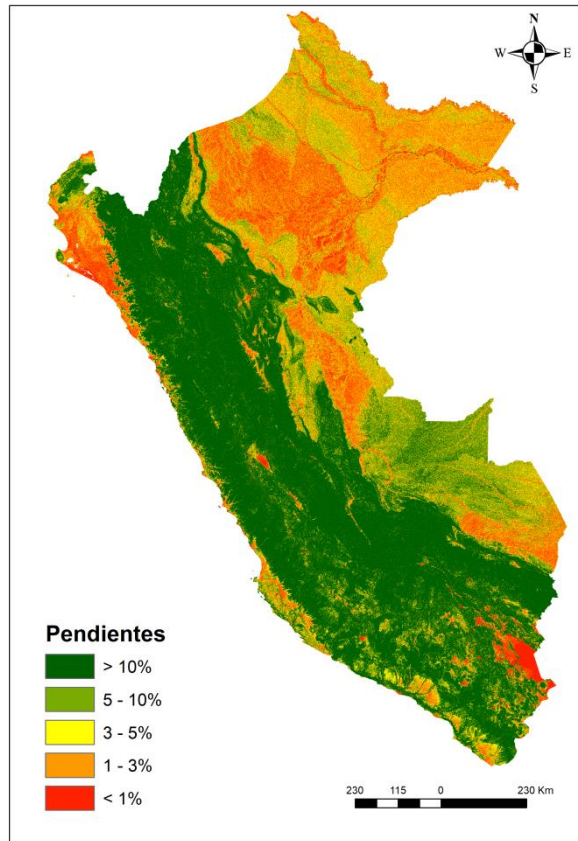
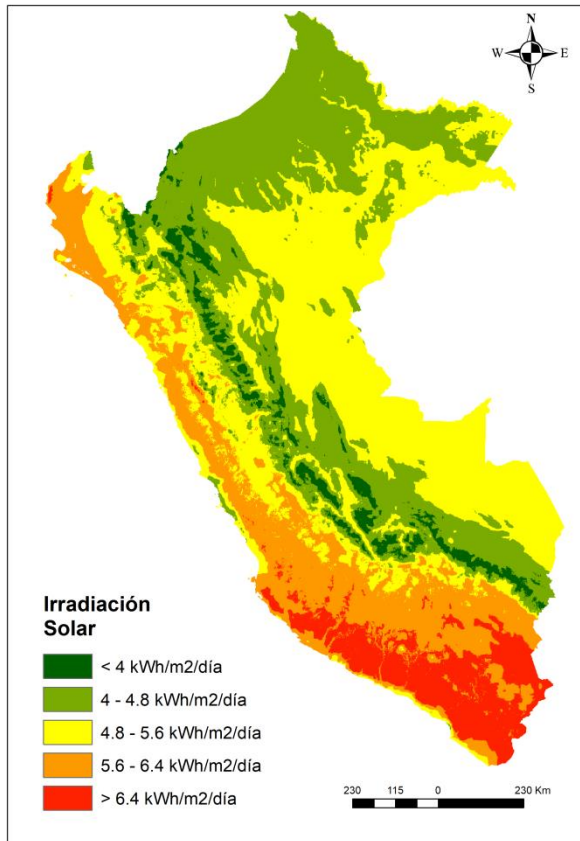
$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.03}{1.32} = 0.023 < 0.1$$

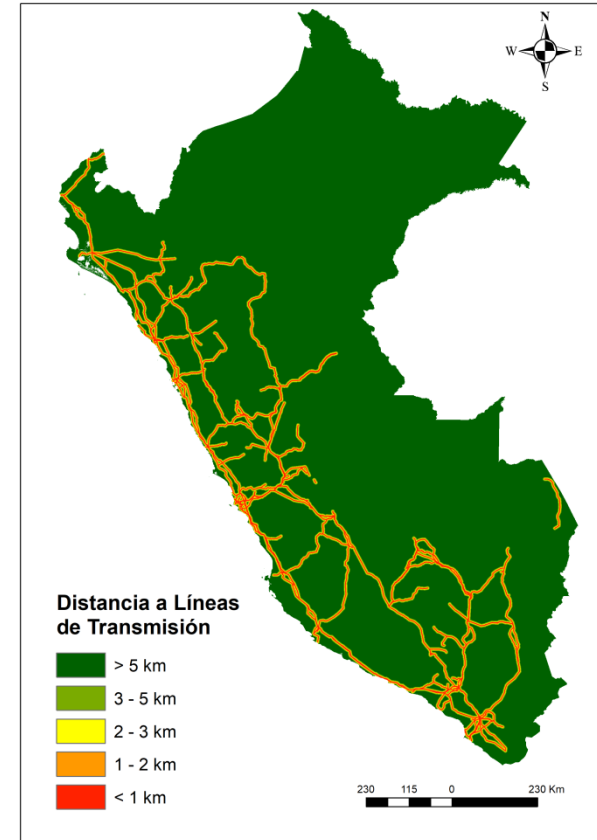
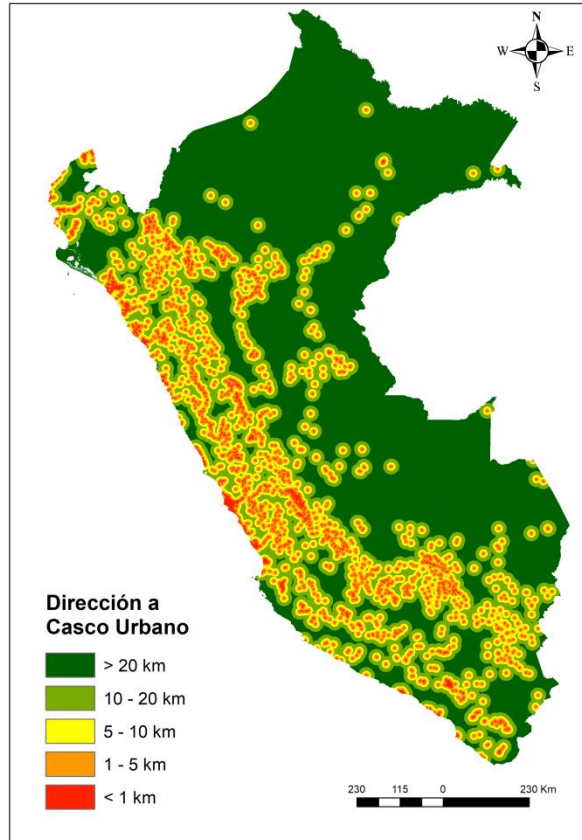
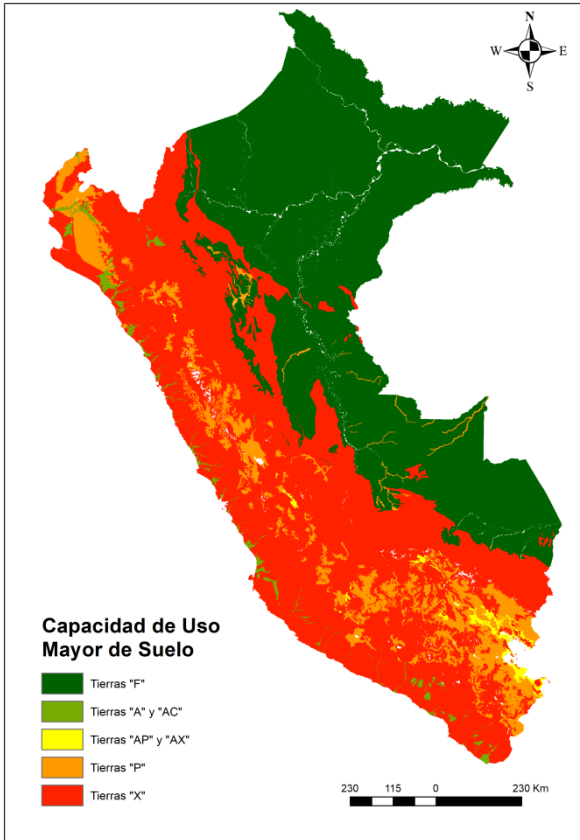
### 3.4 Mapa de Idoneidad

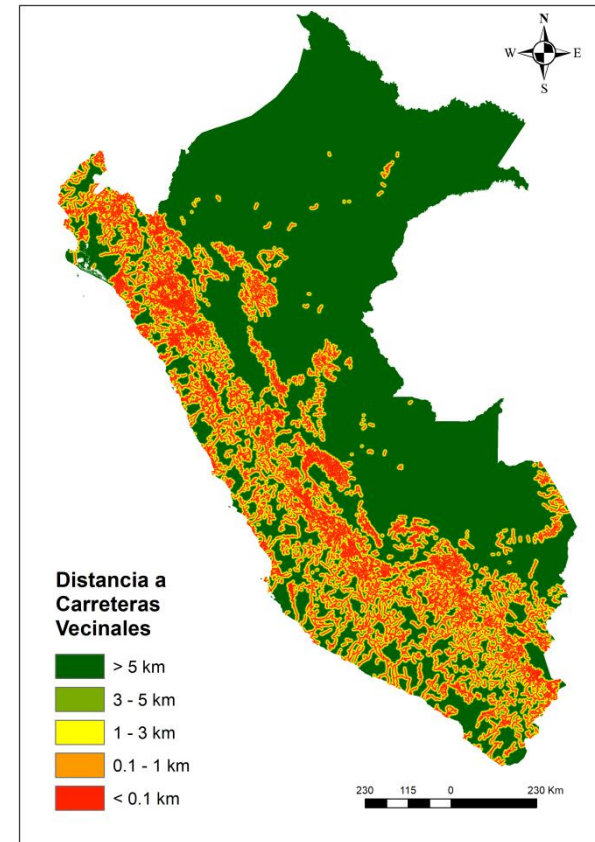
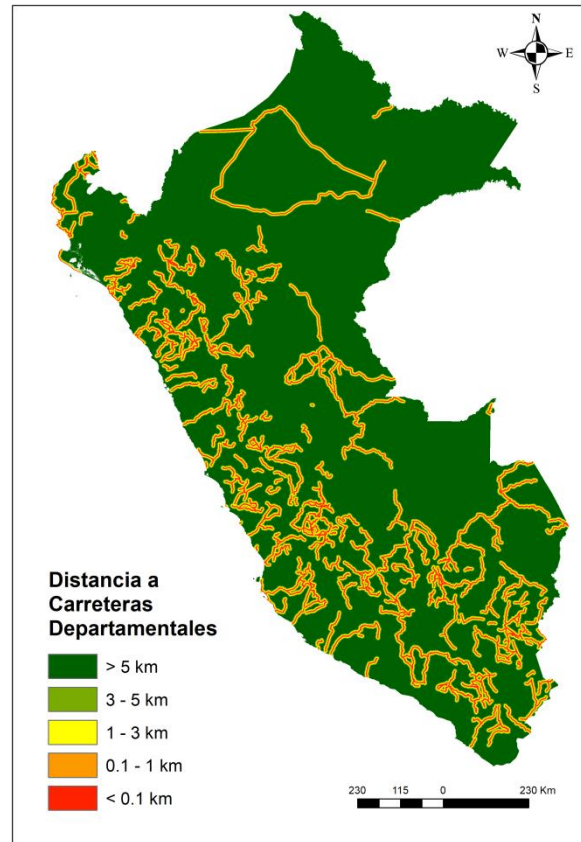
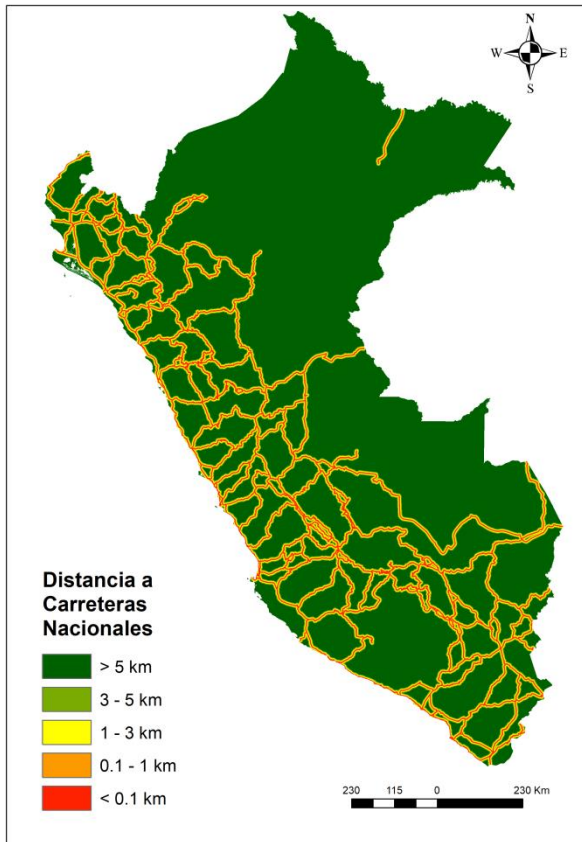
Nueve capas ráster fueron elaboradas (El criterio de distancia a red vial cuenta con tres mapas de los niveles nacional, departamental y vecinal), correspondientes a los criterios establecidos en el estudio. La Ilustración 2 permite la visualización de los mismos, siendo estos a los que se les realizó la técnica de superposición ponderada con los pesos relativos obtenidos en el AHP.

El mapa final de idoneidad fue dividido en cinco categorías: “Altamente adecuado”, “Muy adecuado”, “Adecuado”, “Marginalmente adecuado” e “Inadecuado”, al cual le fue extraída la capa de restricciones. El resultado final se muestra en la Ilustración 3.

**Ilustración 2**  
Mapas de Criterios

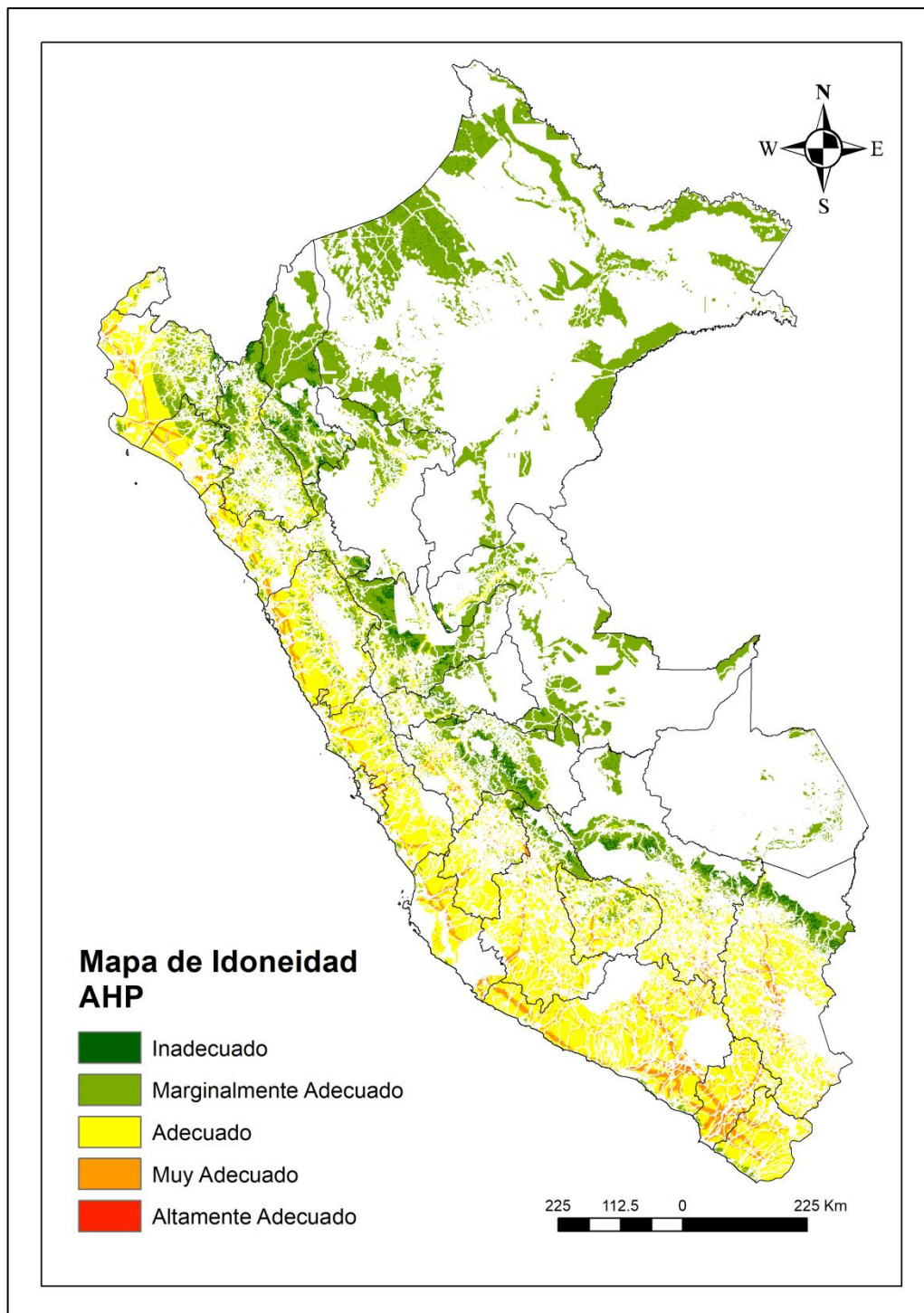








**Ilustración 3**  
Mapa de Idoneidad AHP



Más del 5% del área viable nacional son zonas de alto potencial para la instalación fotovoltaica de gran escala, con 347.89 km<sup>2</sup> o 0.09% siendo considerada “altamente adecuada” y 21 908.97 km<sup>2</sup> o un 5.55% como “muy adecuada”. Las zonas del sur del país adyacentes a los grandes sistemas de transmisión, predominantemente en los departamentos de Tacna, Moquegua, Arequipa y Puno, fueron las que presentaron una mayor distribución de estas zonas gracias a sus altos niveles de irradiación solar, así como a la alta oferta de redes de transmisión de alta tensión. Además, resaltamos la identificación de zonas idóneas en la costa norte y central del país, en las cuales hasta el momento no se han desarrollado infraestructuras fotovoltaicas de gran escala.

La Ilustración 4 nos presenta la ubicación actual de las instalaciones fotovoltaicas de gran escala a nivel nacional. Se observa una buena correlación con las zonas identificadas como potencialmente idóneas, brindando legitimidad y capacidad de replicabilidad al proceso realizado en el estudio.

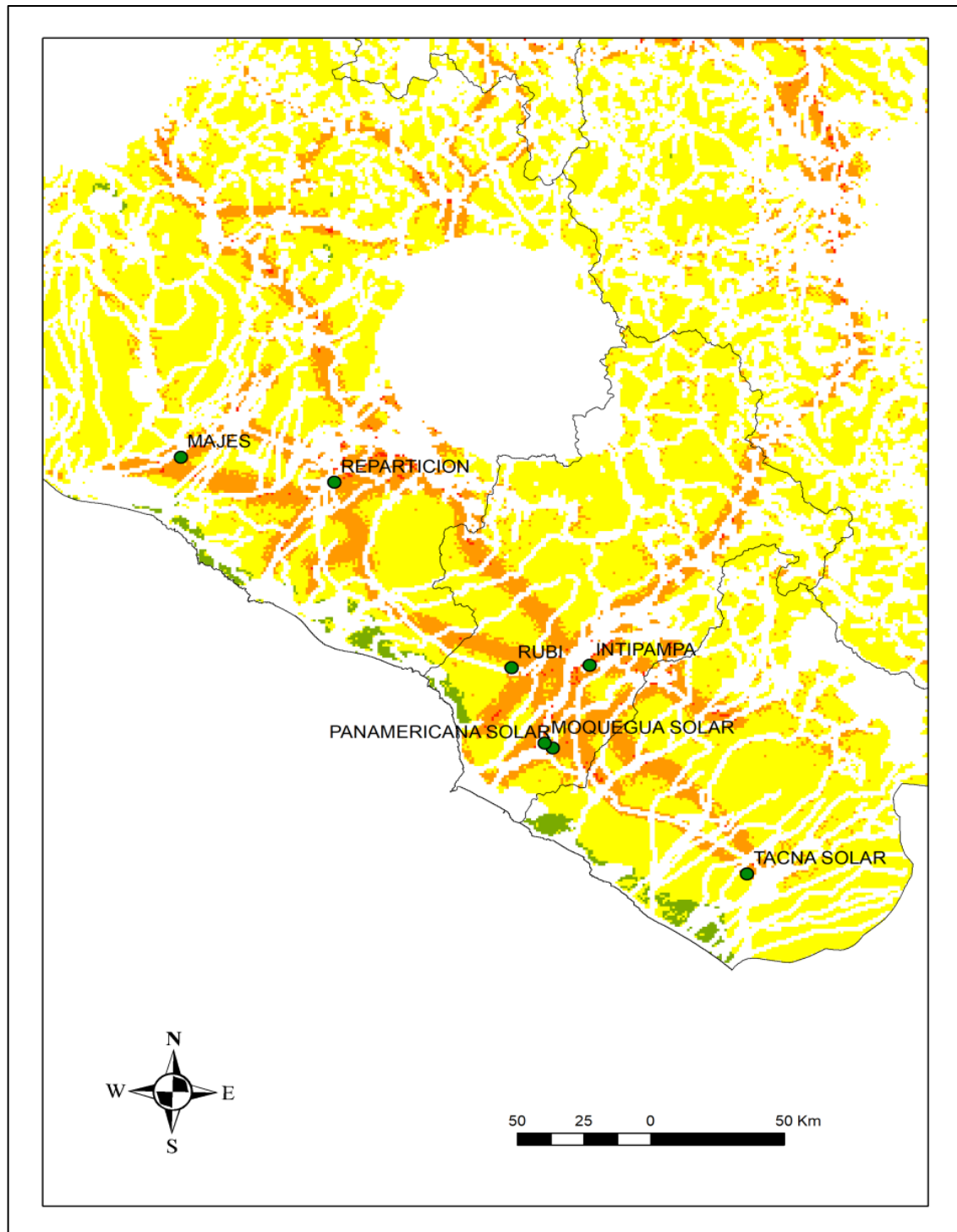
Considerando los 0.018 km<sup>2</sup>/MW establecidos en la literatura [36], si las zonas altamente adecuadas son aprovechadas para la instalación de proyectos fotovoltaicos de gran escala, se podrían obtener aproximadamente 19 320 MW, representando 69 veces la potencia de CSFV instalada actualmente, así como 20 veces la potencia RER total [58]. Inclusive utilizando los 0.06 km<sup>2</sup>/MW obtenidos de las experiencias en el país (Tabl), los 5 800 MW son 21 veces más de la potencia de CSFV instalada, y 6 veces de la potencia RER total.

El 40.49% (159 741.87 km<sup>2</sup>) del país fueron definidos como zonas “adecuadas”, extendiéndose por toda la zona costera nacional. La mitad del área viable del territorio (51.11% o 201 671.17 km<sup>2</sup>) fue establecido como “marginamente adecuado”, encontrándose principalmente en la zonas de la Cordillera y la Amazonía que no se encontraban aún en categorías de restricción; mientras que solo 10 893.76 km<sup>2</sup> o el 2.76% fue considerado “inadecuado”.



**Ilustración 4**

Disposición de Instalaciones Fotovoltaicas Nacionales en Mapa de Idoneidad AHP



**Tabla 4**  
Cálculo de  $\text{km}^2/\text{MW}$  en experiencia peruana

Central Solar	Potencia Instalada (MW)	Área (ha)	Área ( $\text{km}^2$ )	$\text{km}^2/\text{MW}$	Referencia
Intipampa	40	322	3.22	0.08	<a href="https://pe.ambafrance.org/Presidente-del-Peru-Martin-Vizcarra-inaugura-Central-Solar-Intipampa-de-ENGIE">https://pe.ambafrance.org/Presidente-del-Peru-Martin-Vizcarra-inaugura-Central-Solar-Intipampa-de-ENGIE</a>
Rubí	144.48	400	4	0.03	<a href="https://www.enel.pe/en/sustainability/rubi-solar-plant-peru-largest-solar-plant.html">https://www.enel.pe/en/sustainability/rubi-solar-plant-peru-largest-solar-plant.html</a>
Moquegua FV	16	134	1.34	0.08	<a href="https://www.solarpack.es/en/pais/peru-2/">https://www.solarpack.es/en/pais/peru-2/</a>
Panamericana Solar	20	123	1.23	0.06	<a href="https://www.solarpack.es/en/pais/peru-2/">https://www.solarpack.es/en/pais/peru-2/</a>
Majes Solar 20T	20	102	1.02	0.05	<a href="https://www.isoluxorsan.com/recursos/doc/proyectos/proyectos-solares-en-peru.pdf">https://www.isoluxorsan.com/recursos/doc/proyectos/proyectos-solares-en-peru.pdf</a>
Repartición 20T Denominación	20	102	1.02	0.05	<a href="https://www.isoluxorsan.com/recursos/doc/proyectos/proyectos-solares-en-peru.pdf">https://www.isoluxorsan.com/recursos/doc/proyectos/proyectos-solares-en-peru.pdf</a>
Tacna Solar	20	121	1.21	0.06	<a href="https://www.solarpack.es/en/pais/peru-2/">https://www.solarpack.es/en/pais/peru-2/</a>
<b>Promedio</b>				<b>0.06</b>	

### 3.5 Análisis de Sensibilidad

En ánimos de contrastar resultados, y comprendiendo que la mayor incertidumbre en este tipo de ejercicios se encuentra en la elección, tanto de información de entrada como en los pesos ponderados [38] [95], se realizaron diferentes análisis de sensibilidad relacionados a la ponderación e importancia de los criterios. Así, adicionalmente a los determinados por el

método AHP, tres escenarios fueron analizados: a) ponderación equitativa; b) ponderación asociada a revisión bibliográfica y c) ponderación asociada a escenario técnico, con factores económicos igualados a 0. La ponderación de criterios seleccionada se presenta en la Tabla 14.

**Tabla 14**  
Escenarios de Sensibilidad

Criterios	Peso Ponderado (%)			
	AHP	Ponderación Equitativa	Ponderación Bibliográfica	Ponderación Técnica
Irradiación Solar (kWh/m <sup>2</sup> /día)	45	14	41	25
Pendiente (%)	3	14	12	25
Dirección de Pendiente (Aspecto)	9	14	17	25
Capacidad de Uso de Suelo (Tipo)	6	14	11	25
Distancia a Casco Urbano (km)	4	14	5	0
Distancia a Red Vial (km)	7	14	3	0
Distancia a Líneas de Transmisión (km)	26	14	11	0

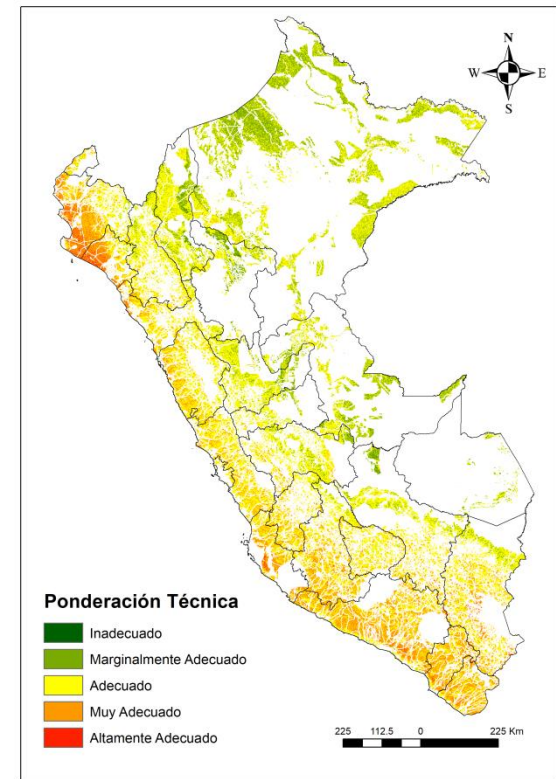
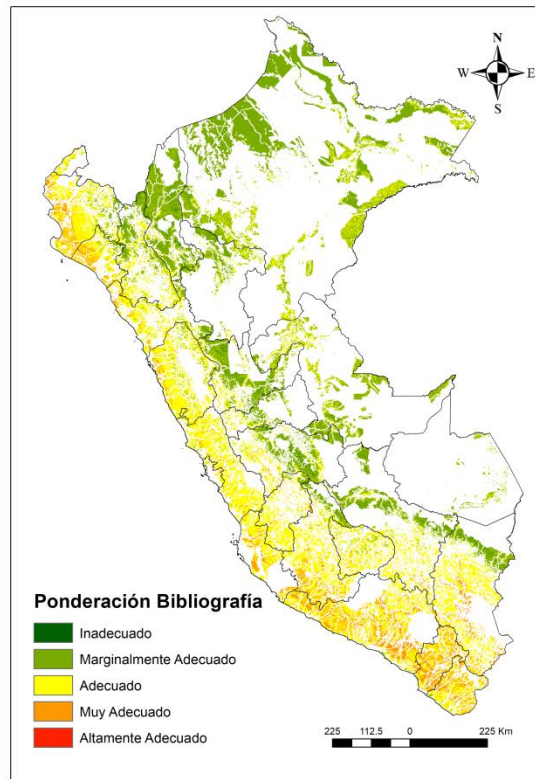
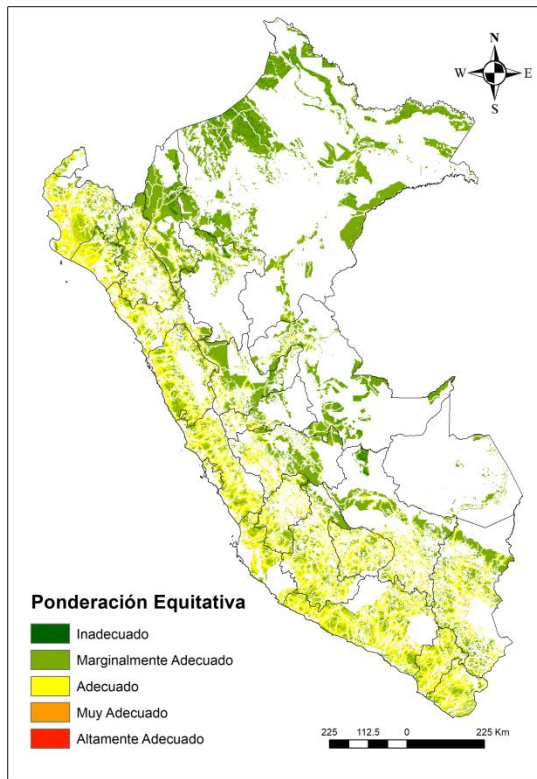
Los resultados de este análisis se detallan en la Tabla 15 e Ilustración 5. La ponderación equitativa, al ser el método más simple a la hora de tomar decisiones ya que permite evadir riesgos y obviar las importancias relativas ya conocidas, es la que menor porcentaje de zonas “altamente adecuadas” presenta (0.0007%), así como de las zonas “Muy adecuadas” (0.97%). Así, este escenario nos permite determinar la influencia preponderante del criterio de radiación solar [36], al verse reducida su ponderación hasta en 3 veces. La ponderación obtenida de la bibliografía mantuvo un peso relativo similar al criterio de irradiación solar, aumentando

considerablemente las variables de topografía y disminuyendo a más de la mitad el criterio de líneas de transmisión, permitiendo que no haya un segundo criterio predominante. Esto le permitió obtener el segundo mejor registro (con valores del 9.9% y 49.5%) en las zonas “Muy adecuadas” y “adecuadas”. Finalmente, la ponderación técnica, la cual omite considerandos económicos y permite la selección en base a condiciones naturales del entorno [44] [76], fue la de mayor porcentaje en zonas de alto potencial (62%, 21% y 0.89% en zonas adecuadas; moderadas y altamente adecuadas, respectivamente), dando cuenta de la afinidad de los factores naturales entre sí, así como la relativa importancia de los factores económicos al restringir la selección de sitios adecuados a pequeños márgenes cercanos a infraestructuras de conexión (especialmente a líneas de transmisión).

**Tabla 15**  
 Resultados del Análisis de Sensibilidad

Clasificación de Idoneidad	AHP		Ponderación Equitativa		Ponderación Bibliográfica		Ponderación Técnica	
	%	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )
Inadecuado	2.76	10 893.76	2.23	8 817.72	0.42	1 647.47	0.16	645.09
Marginalmente Adecuado	51.11	201 671.17	57.71	227 696.64	40.18	158 525.57	15.82	62 403.84
Adecuado	40.49	159 741.87	39.08	154 207.80	49.48	195 239.19	62.25	245 628.80
Muy Adecuado	5.55	21 908.97	0.97	3 838.89	9.91	39 087.22	20.88	82 368.67
Altamente Adecuado	0.09	347.89	0.0007	2.60	0.02	64.20	0.89	3 517.25

**Ilustración 5**  
Mapas de Sensibilidad



## 4. Conclusiones

Los resultados de este estudio representan la primera experiencia en la utilización de una metodología AHP-GIS para la identificación de sitios idóneos para plantas de energía fotovoltaica en Perú. Considerando las diferentes restricciones reportadas, el 69.52% del país fue excluido de posteriores análisis, con 30.48% restante como áreas viables. Las categorías ambientales, sociales y técnicas alcanzaron 57.32%, 2.35% y 9.85% del total de áreas restringidas, respectivamente. La región amazónica tuvo departamentos como Ucayali, San Martín y Madre de Dios con los mayores porcentajes de área superficial total removida por las restricciones. En cambio, departamentos de la costa como Moquegua, Lambayeque y Tacna presentaron los menores porcentajes de área superficial total extraída del estudio.

La metodología resalta el gran potencial de áreas (aproximadamente 22 257 km<sup>2</sup>) para el establecimiento de plantas fotovoltaicas de gran escala, tomando en cuenta la información expuesta. Además, representa un antecedente que podrá ser tomado en cuenta por los grupos de interés, ya sea en las etapas iniciales del desarrollo de políticas, la promoción e incluso la implementación de proyectos de este tipo en el territorio nacional.

Asimismo, la metodología AHP permite e incentiva su reevaluación y mejoramiento en el tiempo. La disponibilidad de un mayor número de encuestas respondidas por expertos que se desempeñen en la materia permitirá ir afinando la valoración de cada criterio, y por ende el mapa de idoneidad. Por otro lado, debido a la variación en el tiempo de las restricciones y criterios utilizados en este estudio (i.e. casco urbano, carreteras, líneas de transmisión), sumado a la elaboración de nuevas bases de datos geográficas, como podría ser el mapa de uso de suelos actualizado, hacen necesaria la actualización periódica del mapa de idoneidad. Es por esto que se deben continuar realizando esfuerzos similares a los realizados en este estudio, así como para otras tecnologías renovables que sean de interés nacional.

Por último, resaltamos la importancia de replicar estos estudios a escala regional y local, en las zonas donde se identificaron las mayores áreas idóneas para la implementación de plantas fotovoltaicas a gran escala, prioritariamente en la zona costera y la sierra sur del Perú.

## Referencias Bibliográficas

- [1] MINEM. Elaboración de la Nueva Matriz Energética Sostenible y Evaluación Ambiental Estratégica, como Instrumentos de Planificación. 2012.
- [2] BP. BP Energy Outlook 2019 edition. 2019.
- [3] Jackson RB, Le Quéré C, Andrew RM, Canadell JG, Korsbakken JI, Liu Z, et al. Global energy growth is outpacing decarbonization. *Environ Res Lett* 2018;13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf303>.
- [4] NOAA National Centers for Environmental Information. State of the Climate: Global Climate Report for Annual 2018. 2019.
- [5] BP. BP Statistical Review of World Energy 2018. 2018.
- [6] COES. Boletín Mensual Diciembre 2018. 2018.
- [7] Aita PG. Perú Potencial Energético: Propuestas y Desafíos. *Círculo Derecho Adm* 2006;0:217–31.
- [8] Aita PG. Energía: Un Cambio Necesario en el Perú. *Rev Kawsaypacha Soc y Medio Ambient* 2017;0:93–135.
- [9] Mitma Ramírez R. Análisis de la Regulación de Energías Renovables en el Perú. *Derecho Soc* 2015:167–76.
- [10] Jacobson MZ. Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy Environ Sci* 2009;2:148–73. <https://doi.org/10.1039/b809990c>.
- [11] IRENA. Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy. 2010. <https://doi.org/10.1787/9789264088047-en>.
- [12] Kavlak G, McNerney J, Trancik JE. Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules. *Energy Policy* 2018;123:700–10. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.015>.
- [13] IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2018. Abu Dhabi: 2018. [https://doi.org/10.1007/SpringerReference\\_7300](https://doi.org/10.1007/SpringerReference_7300).
- [14] EIA. Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources. 2019.



- [15] OSINERGMIN. Reporte de Análisis Económico Sectorial - Electricidad - Las energías renovables en el mundo. 2016.
- [16] Equilibrium. Análisis del Sector Eléctrico Peruano: Generación. 2018.
- [17] IFC. Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants - A Project Developer's Guide. 2015.
- [18] Dawod GM, Mandoer MS. Optimum Sites for Solar Energy Harvesting in Egypt Based on Multi-Criteria GIS. First Futur Univ Int Conf New Energy Environ Eng Cairo, Egypt April 11-14, 2016 2016:450–6.
- [19] Sengupta M, Hable A, Kurtz S, Dobos A, Wilbert S, Lorenz E, et al. Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications. vol. 2. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.003>.
- [20] Li C. GIS for Urban Energy Analysis. Compr. Geogr. Inf. Syst., Elsevier; 2017, p. 187–95. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.09652-4>.
- [21] Brawner E, Hassaram J, Wiesner H, Wang Y, Johnson TL, Patino-Echeverri D. Assessing Land Availability for Utility Solar in North Carolina Using GIS. Duke University, 2017.
- [22] Kikuma I, Rublev E, Tan X. Siting of Utility-Scale Solar In North Carolina. Duke University, 2018.
- [23] Huang JP, Poh KL, Ang BW. Decision analysis in energy and environmental modeling. Energy 1995;20:843–55. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(95\)00036-G](https://doi.org/10.1016/0360-5442(95)00036-G).
- [24] Ramanathan R. Multicriteria Analysis of Energy. Encycl Energy 2004:77–88. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00240-0>.
- [25] Zhou P, Ang BW, Poh KL. Decision analysis in energy and environmental modeling: An update. Energy 2006;31:2604–22. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.10.023>.
- [26] Wang JJ, Jing YY, Zhang CF, Zhao JH. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. Renew Sustain Energy Rev 2009;13:2263–78. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021>.
- [27] Kumar A, Sah B, Singh AR, Deng Y, He X, Kumar P, et al. A review of multi criteria

- decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;69:596–609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191>.
- [28] Mardani A, Zavadskas EK, Khalifah Z, Zakuan N, Jusoh A, Nor KM, et al. A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;71:216–56. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.053>.
- [29] Mardani A, Jusoh A, Zavadskas EK, Cavallaro F, Khalifah Z. Sustainable and renewable Energy: An overview of the application of multiple criteria decision making techniques and approaches. *Sustain* 2015;7:13947–84. <https://doi.org/10.3390/su71013947>.
- [30] Stojčić M, Zavadskas E, Pamučar D, Stević Ž, Mardani A. Application of MCDM Methods in Sustainability Engineering: A Literature Review 2008–2018. *Symmetry (Basel)* 2019;11:350. <https://doi.org/10.3390/sym11030350>.
- [31] Wang Q, Poh KL. A survey of integrated decision analysis in energy and environmental modeling. *Energy* 2014;77:691–702. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.09.060>.
- [32] Al Garni HZ, Awasthi A. Solar PV Power Plants Site Selection: A Review. *Adv. Renew. Energies Power Technol.*, Elsevier Inc.; 2018, p. 57–75. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812959-3.00002-2>.
- [33] Rojas-Zerpa JC, Yusta JM. Methodologies, technologies and applications for electric supply planning in rural remote areas. *Energy Sustain Dev* 2014;20:66–76. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.03.003>.
- [34] Hadiyanto H, Ebrahimi M, Ahmadi MH, Ghasempour R, Alhuyi Nazari M. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Approach for Selecting Solar Plants Site and Technology: A Review. *Int J Renew Energy Dev* 2019;8:15–25. <https://doi.org/10.14710/ijred.8.1.15-25>.
- [35] Giamalaki M, Tsoutsos T. Sustainable siting of solar power installations in Mediterranean using a GIS/AHP approach. *Renew Energy* 2019;141:64–75. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.100>.
- [36] Al Garni HZ, Awasthi A. Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Appl Energy* 2017;206:1225–40.

- <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.024>.
- [37] Ali S, Taweekun J, Techato K, Waewsak J, Gyawali S. GIS based site suitability assessment for wind and solar farms in Songkhla, Thailand. *Renew Energy* 2019;132:1360–72. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.035>.
- [38] Aly A, Jensen SS, Pedersen AB. Solar Power Potential of Tanzania: Identifying CSP and PV Hot Spots through a GIS Multicriteria Decision Making Analysis. *Renew Energy* 2017;113:159–75. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.077>.
- [39] Doljak D, Stanojević G. Evaluation of natural conditions for site selection of ground-mounted photovoltaic power plants in Serbia. *Energy* 2017;127:291–300. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.140>.
- [40] Ghasemi G, Noorollahi Y, Alavi H, Marzband M, Shahbazi M. Theoretical and technical potential evaluation of solar power generation in Iran. *Renew Energy* 2019;138:1250–61. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.068>.
- [41] Singh Doorga JR, Rughooputh SDDV, Boojhawon R. High resolution spatio-temporal modelling of solar photovoltaic potential for tropical islands: Case of Mauritius. *Energy* 2019;169:972–87. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.072>.
- [42] Yushchenko A, de Bono A, Chatenoux B, Patel MK, Ray N. GIS-based assessment of photovoltaic (PV) and concentrated solar power (CSP) generation potential in West Africa. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;81:2088–103. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.021>.
- [43] Ozdemir S, Sahin G. Multi-criteria decision-making in the location selection for a solar PV power plant using AHP. *Measurement* 2018;129:218–26. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.020>.
- [44] Watson JJW, Hudson MD. Regional Scale wind farm and solar farm suitability assessment using GIS-assisted multi-criteria evaluation. *Landsc Urban Plan* 2015;138:20–31. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.001>.
- [45] Tahri M, Hakdaoui M, Maanan M. The evaluation of solar farm locations applying Geographic Information System and Multi-Criteria Decision-Making methods: Case study

- in southern Morocco. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;51:1354–62. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.054>.
- [46] Mierzwiak M, Calka B. Multi-Criteria Analysis for Solar Farm Location Suitability. *Reports Geod Geoinformatics* 2018;104:20–32. <https://doi.org/10.1515/rgg-2017-0012>.
- [47] Marcillo JLM, Fabricio F, Fuentes C. Determinación de áreas óptimas para instalaciones de energía solar y eólica en Quevedo, provincia de Los Ríos, aplicando sistemas de información geográfica. *Rev Interam Ambient y Tur* 2016;12:129–38.
- [48] Vaca F. Análisis y determinación de las zonas óptimas para la instalación de un proyecto eólico en Ecuador a través de métodos de toma de decisión multicriterio. Universidad Politécnica de Cartagena, 2018.
- [49] Villacreses G, Gaona G, Martínez-Gómez J, Jijón DJ. Wind farms suitability location using geographical information system (GIS), based on multi-criteria decision making (MCDM) methods: The case of continental Ecuador. Universidad de Manizales, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.041>.
- [50] Obando Chaparro MF. Identificación del lugar óptimo de instalación de un parque eólico en el departamento del Atlántico 2017:1–56.
- [51] Algarín CR, Llanos AP, Castro AO. An analytic hierarchy process based approach for evaluating renewable energy sources. *Int J Energy Econ Policy* 2017;7:38–47.
- [52] Suuronen A, Lensu A, Kuitunen M, Andrade-Alvear R, Celis NG, Miranda M, et al. Optimization of photovoltaic solar power plant locations in northern Chile. *Environ Earth Sci* 2017;76. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7170-z>.
- [53] IRENA. Investment Opportunities in Latin America Suitability Maps for Grid-Connected and Off-Grid Solar and Wind Projects. 2016.
- [54] IRENA. Global Atlas for Renewable Energy n.d. <https://irena.masdar.ac.ae/gallery/#map/2012>.
- [55] MINAM. Informe Nacional del Estado del Ambiente 2012-2013. Primera. Lima: 2014.
- [56] MINAM. El Perú y el Cambio Climático: Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 2016.

- [57] SENAMHI; MINEM. Atlas de energía solar del Perú. 2003.
- [58] COES. Estadística de Operación 2018. 2018.
- [59] Escrivá L. Aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) al Dimensionamiento de Sistemas Renovables. Universitat Politècnica de València, 2015.
- [60] Saaty TL. Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process. In: Schmoldt D.L., Kangas J., Mendoza G.A. PM, editor. Anal. Hierarchy Process Nat. Resour. Environ. Decis. Mak., 2001.
- [61] Saaty TL. A scaling method for priorities in a hierarchichal structure. J Math Psych 1977;15:234–81.
- [62] Saaty TL. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority, Setting, Resources Allocation. New York: McGraw-Hill; 1980.
- [63] Saaty RW. The Analytical Hierarchy Process- What and Why it is Used. Math Model 1987;9:161–76.
- [64] Kereush D, Perovych I. Determining Criteria for Optimal Site Selection for Solar Power Plants. Geomatics, Landmanagement Landsc 2018;4:39–54. <https://doi.org/10.15576/gll/2017.4.39>.
- [65] Grilli G, Balest J, De Meo I, Garegnani G, Paletto A. Experts' opinions on the effects of renewable energy development on ecosystem services in the Alpine region. J Renew Sustain Energy 2016;8. <https://doi.org/10.1063/1.4943010>.
- [66] Legendre P. Coefficient of Concordance. Encycl Res Des Vol 1 2010:164–9.
- [67] OSINERGMIN. Supervisión de Contratos de Proyectos de Generación y Transmisión de Energía Eléctrica en Operación. 2018.
- [68] MINEM. Concesiones Temporales en Etapa de Estudio. 2017.
- [69] Alami Merrouni A, Elwali Elalaoui F, Mezrhab A, Mezrhab A, Ghennioui A. Large scale PV sites selection by combining GIS and Analytical Hierarchy Process. Case study: Eastern Morocco. Renew Energy 2018;119:863–73. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.044>.

- [70] Uyan M. GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region Konya/Turkey. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;28:11–7. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.042>.
- [71] Asakereh A, Soleymani M, Sheikhdavoodi MJ. A GIS-based Fuzzy-AHP method for the evaluation of solar farms locations: Case study in Khuzestan province, Iran. *Sol Energy* 2017;155:342–53. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.075>.
- [72] Aydin NY, Kentel E, Sebnem Duzgun H. GIS-based site selection methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from western Turkey. *Energy Convers Manag* 2013;70:90–106. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.02.004>.
- [73] Majumdar D, Pasqualetti MJ. Analysis of land availability for utility-scale power plants and assessment of solar photovoltaic development in the state of Arizona, USA. *Renew Energy* 2019;121:3–31. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.064>.
- [74] Anwarzai MA, Nagasaka K. Utility-scale implementable potential of wind and solar energies for Afghanistan using GIS multi-criteria decision analysis. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;71:150–60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.048>.
- [75] Effat HA. Selection of Potential Sites for Solar Energy Farms in Ismailia Governorate, Egypt using SRTM and Multicriteria Analysis. *Int J Adv Remote Sens GIS* 2013;2:205–20.
- [76] Cevallos-Sierra J, Ramos-Martin J. Spatial assessment of the potential of renewable energy: The case of Ecuador. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;81:1154–65. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.015>.
- [77] Hafeznia H, Yousefi H, Razi Astaraei F. A novel framework for the potential assessment of utility-scale photovoltaic solar energy, application to eastern Iran. *Energy Convers Manag* 2017;151:240–58. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.076>.
- [78] Huang T, Wang S, Yang Q, Li J. A GIS-based assessment of large-scale PV potential in China. *Energy Procedia* 2018;152:1079–84. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.126>.
- [79] Arnette AN, Zobel CW. Spatial analysis of renewable energy potential in the greater

- southern Appalachian mountains. *Renew Energy* 2011;36:2785–98. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.04.024>.
- [80] The World Bank. Solargis n.d. <https://solargis.com/>.
- [81] Banda A. Estudio de viabilidad técnica y económica de un sistema fotovoltaico autónomo en las instalaciones de la UCSP. Universidad Católica San Pablo, 2017.
- [82] Núñez Zúñiga T, Cruz Ornetta VM. Diseño de sistemas de energía solar fotovoltaica - aplicación en el Perú. *Paideia* 2017;3:160–70. <https://doi.org/10.31381/paideia.v3i4.935>.
- [83] Climate-Data n.d. <https://es.climate-data.org/america-del-norte/estados-unidos-de-america/nebraska/peru-127886/#climate-graph>.
- [84] INEI. Perú: Temperatura Promedio, Máxima y Mínima, según departamento, 2015 2015. [https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitaless/Est/Lib1416/mapas.pdf](https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaless/Est/Lib1416/mapas.pdf).
- [85] Schlecht M, Meyer R. Site selection and feasibility analysis for concentrating solar power (CSP) systems. *Conc Sol Power Technol* 2012:91–119. <https://doi.org/10.1533/9780857096173.1.91>.
- [86] McEvoy A, Markvart T, Castañer L. *Practical Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications*. Second Edi. Oxford: Elsevier; 2012. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385934-1.X0001-3>.
- [87] CGIAR-CSI. SRTM Data n.d. <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>.
- [88] Ministerio de Agricultura. Decreto Supremo N° 017-2009-AG Aprueban Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor 2009.
- [89] Janke JR. Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. *Renew Energy* 2010;35:2228–34. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.014>.
- [90] MTC. Ministerio de Transportes y Comunicaciones - MTC n.d. <http://portal.mtc.gob.pe/>.
- [91] OSINERGMIN. Mapa SEIN n.d. <https://www.osinergmin.gob.pe/newweb/uploads/Publico/MapaSEIN/>.
- [92] IGN. Infraestructura de Datos Espaciales del Perú - IDEP n.d. <https://www.idep.gob.pe/>.

- [93] MINAM. Estrategia Nacional de Diversidad Biológica al 2021. Plan de Acción 2014 - 2018. 1ra ed. Ministerio del Ambiente; 2014.
- [94] INEI. Biodiversidad. Anu. Estadísticas Ambient. 2013, Instituto Nacional de Estadísticas e Informática; 2014.
- [95] Daim T, Oliver T, Kim J. Research and Technology Management in the Electricity Industry: Methods, Tools and Case Studies. Green Energy Technol 2013;60:17–30. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5097-8>.
- [96] CEPAL, OCDE. Evaluaciones del desempeño ambiental Perú 2016. Aspectos destacados y recomendaciones 2016.



**Anexo 1**  
Encuesta a Especialistas

**Encuesta a Especialistas de Energías Renovables**

Nombre: \_\_\_\_\_

Institución y cargo: \_\_\_\_\_

Experiencia en Energías Renovables: \_\_\_\_\_

---

Estimado/a \_\_\_\_\_,

Reciba un cordial saludo. Mi nombre es \_\_\_\_\_ y soy \_\_\_\_\_. Actualmente me encuentro desarrollando un proyecto de investigación que busca identificar las áreas idóneas del territorio nacional para el desarrollo de proyectos de energías renovables (específicamente la solar fotovoltaica), a través de la metodología de multicriterio (método analítico jerárquico o AHP) y GIS (sistemas de información geográfica), para la cual se requiere de la opinión de expertos en la materia.

Según la revisión bibliográfica, se han identificado criterios (6) para la selección de zonas para desarrollar proyectos solares. Tomando en cuenta su experiencia o conocimientos en la materia, agradeceré evaluar el grado de influencia de cada criterio relacionados a la selección de zonas óptimas para proyectos solares. Utilizar una escala de 1 al 10, donde 10 es el valor de mayor influencia.

<u>Criterio</u>	<u>Valoración</u>
<u>Radiación Solar</u>	
<u>Pendiente</u>	
<u>Dirección de Pendiente</u>	
<u>Cercanía a Áreas Urbanas</u>	
Capacidad de uso mayor y uso actual del suelo	
<u>Accesibilidad (Cercanía a carreteras)</u>	
Cercanía a Líneas de Transmisión	


Breve explicación

- *Radiación Solar*: A mayor cantidad de radiación solar, mayor electricidad posible de ser generada
- *Pendiente*: Tierra plana preferible a tierras con altas pendientes, ya que estas dificulta la construcción y la hace más cara (incrementa complejidad)
- *Dirección de Pendiente*: Orientación al Norte (desde Hemisferio Sur) es preferible para la mayor exposición a la radiación
- *Cercanía a áreas urbanas*: Incremento de preocupaciones por fenómeno NIMBY (no en mi patio trasero)
- *Uso de suelo*: Áreas sin vegetación o de poco valor agrícola son recomendables
- *Cercanía a carreteras*: Permite el transporte de equipos de manera más económica
- *Cercanía a líneas de transmisión*: Cercanía reduce la distancia que la electricidad debe viajar, así como pérdidas de transmisión

## ANEXOS

- Evidencia del envío a revista científica

Submission Confirmation Inbox x 🖨️ 🗑️

 **Renewable & Sustainable Energy Reviews** <em@editorialmanager.com> 2:04 AM (0 minutes ago) ☆ ↶ ⋮  
✉️ to me ▾

Dear Mr Roberts Rios,

We have received your article "Selection of ideal sites for the development of solar photovoltaic projects through Analytical Hierarchical Process – Geographic Information Systems (AHP-GIS) in Peru" under article type: Original Research Article for consideration for publication in Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Your manuscript will be given a reference number once an editor has been assigned.

To track the status of your paper, please do the following:

1. Go to this URL: <https://www.editorialmanager.com/rser/>
2. Enter these login details:  
 Your username is: Roberts  
 If you need to retrieve password details, please go to: Can't remember your password? To reset your password please try to sign in and click 'continue'. On the next screen click the 'forgot password' link and follow the steps to reset your password..
3. Click [Author Login]  
 This takes you to the Author Main Menu.
4. Click [Submissions Being Processed]

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Renewable and Sustainable Energy Reviews

- Copia de documento de aprobación de comité de ética



**COMITÉ INSTITUCIONAL DE ÉTICA EN INVESTIGACIÓN CON ANIMALES Y BIODIVERSIDAD**

Constancia N° 029-CIEI-AB-CIENTÍFICA-2020

El presidente del Comité Institucional de Ética en Investigación con Animales y Biodiversidad de la Universidad Científica del Sur (CIEI-AB-CIENTÍFICA) da constancia que el proyecto de investigación, cuyos datos se registran a continuación, ha sido aprobado.

Código de registro:                   **415-2019-PRE11**

Título:                                   **Selección de sitios idóneos para el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos de gran escala mediante análisis multicriterio AHP - GIS**

Investigador(a):                   **Roberts Anthony Rios Pereyra**

La aprobación del proyecto de investigación implica que el documento presentado a evaluación cumple con los lineamientos de Universidad en materia de investigación y ética, los cuales se sustentan en la normativa internacional vigente.

En tal sentido, esta aprobación carecerá de valor si es que el proyecto de investigación arriba indicado es modificado de cualquier forma. Toda enmienda, añadido, eliminación o eventualidad (eventos adversos, etc.) posterior a la fecha de aprobación debe ser reportado al CIEI-AB-CIENTÍFICA.

La vigencia de la aprobación de este documento es de dieciocho (18) meses (**hasta el 09 de setiembre del 2021**), periodo en el que puede desarrollarse el proyecto. Cualquier trámite para su renovación deberá ser enviado antes del término de la vigencia de este documento, debiendo suspenderse todo desarrollo hasta que la renovación sea aprobada.


Villa El Salvador, 10 de marzo de 2020




**Méd. Vet. Gianmarco Paolo Rojas Moreno**  
Presidente  
Comité Institucional de Ética en Investigación  
con Animales y Biodiversidad

Asesoría al postulante  
T // (51) 610 6738 | Campus Villa 2 - Panamericana Sur km 19  
informes@cientificasur.edu.pe | Calle Cantuaris 338, Miraflores

- Copia de resolución de aprobación del proyecto de tesis



**RESOLUCIÓN DIRECTORAL ACADÉMICA DE CARRERA N°001-2020-DACIA-DAFCA-UNIV.CIENTIFICA**

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES  
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Lima 17 de abril de 2020

**VISTO:**  
El informe de revisión independiente académica y la aprobación de un Comité de Ética del proyecto de tesis titulado: **Selección de sitios idóneos para el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos de gran escala mediante análisis multicriterio AHP - GIS**, presentado por:

- **Ríos Pereyra Roberts Anthony**

**CONSIDERANDO:**  
Que, de acuerdo al Reglamento General de la Universidad Científica del Sur y los reglamentos de pregrado para obtener el título profesional de **Ingeniero Ambiental** en la **Facultad de Ciencias Ambientales**, se debe desarrollar un trabajo de investigación.

Que, de acuerdo a la normativa vigente de la Universidad Científica del Sur, en uso de las atribuciones conferidas al Director Académico de Carrera.

**SE RESUELVE:**  
Aprobar e inscribir el proyecto de tesis titulado: **Selección de sitios idóneos para el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos de gran escala mediante análisis multicriterio AHP - GIS** con N° de registro: **415-2019-PRE11**, y establecer el inicio del periodo de ejecución del mencionado proyecto.

Nombrar al docente/colaborador **Adolfo Rojas Álvarez** como asesor para el desarrollo de la tesis en cuestión.

Regístrese, comuníquese y archívese,

*Documento firmado digitalmente*  
**Mg. Gonzalo Francisco Flores Roca**  
Director Académico  
Carrera de Ingeniería Ambiental

T // 010 610 6788  
informacion@cientificadelsur.edu.pe  
CIENTIFICADLSUR