

Análisis de la metodología para la selección de sitios potenciales de emplazamiento de pequeñas centrales hidroeléctricas en Bolivia (Proyecto HYPOSO)

Galo Muñoz^{1,*}, Roberto Jiménez¹, Andrés Gonzales¹

¹Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

*g.munoz@umss.edu

Resumen

Bolivia cuenta con un gran potencial para la generación de energía hidroeléctrica, la cual puede contribuir significativamente al desarrollo económico y social, así como a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la diversificación de la matriz energética. La identificación de nuevos sitios para proyectos hidroeléctricos es un desafío que requiere una gran cantidad de información y visitas frecuentes a lugares a veces inaccesibles. En este contexto, esta investigación propone una metodología que utiliza imágenes satelitales y datos geoespaciales para preseleccionar sitios de interés hidroeléctrico, integrando factores clave mediante análisis multivariado en un SIG (Sistemas de Información Geográfica). Tras aplicar esta metodología a Bolivia, se identificaron 74 sitios con alto potencial, de los cuales 10 se destacan por su excelente calificación técnica y ambiental.

Palabras clave: *SIG, Análisis multivariado, Energía hidroeléctrica.*

Abstract

Bolivia has great potential for hydroelectric power generation, which can significantly contribute to economic and social development, as well as the reduction of greenhouse gas emissions and the diversification of the energy matrix. The identification of new sites for hydroelectric projects is a challenge that requires a large amount of information and frequent visits to sometimes inaccessible locations. In this context, this research proposes a methodology that uses satellite imagery and geospatial data to preselect sites of hydroelectric interest, integrating key factors through multivariate analysis in a GIS. After applying this methodology in Bolivia, 74 high-potential sites were identified, of which 10 stand out for their excellent technical and environmental ratings.

Key words: *GIS, Multivariate analysis, Hydroelectric power.*

1. Introducción

Bolivia posee un amplio potencial para el desarrollo de proyectos de energía hidroeléctrica, aprovechando sus abundantes recursos hídricos. Si se lleva a cabo este tipo de aprovechamiento, no solo se estaría contribuyendo al desarrollo económico y social del país, sino que también generaría energía limpia y sostenible en un contexto mundial marcado por el cambio climático, alineándose así con las metas y compromisos establecidos en la Contribución Nacional Determinada (NDC) en Bolivia (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2022).

La generación de energía hidroeléctrica a partir del agua de los ríos ofrece una forma de aprovechar una fuente de energía renovable, lo que, a su vez, contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la conservación del medio ambiente. Además, el uso de energías renovables como la hidroeléctrica ayuda a diversificar la matriz energética del país, reduciendo la dependencia de fuentes de energía no renovables y promoviendo la seguridad energética (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2022).

En Bolivia, los recursos hídricos aprovechables para la generación de energía eléctrica se encuentran principalmente en la faja del subandino y en los llanos

orientales. En el subandino, los ríos presentan grandes desniveles topográficos favorables, pero caudales relativamente pequeños, mientras que, en los llanos orientales, los ríos tienen pendientes mucho menores, pero transportan grandes caudales. Ambas condiciones son convenientes para la generación hidroeléctrica, aunque con diferentes ventajas dependiendo de diversos factores que se analicen como topografía, geología, distancia a los centros poblados, etc.

La empresa estatal de generación de electricidad en Bolivia, ENDE (Empresa Nacional de Electricidad), tiene como propósito diversificar la matriz energética del país y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Para lograrlo, están estudiando proyectos alternativos a las termoeléctricas, como la producción de electricidad a partir de energía eólica, geotérmica, fotovoltaica e incluso biomasa. Sin embargo, la hidroeléctrica sigue siendo una de las opciones más importantes.

En este estudio, se busca identificar nuevos sitios potenciales para la construcción de proyectos hidroeléctricos de diversas escalas. Las zonas más prometedoras se encuentran en el subandino, con ríos que tienen capacidad para generar centrales hidroeléctricas de hasta 50 MW de potencia. Esto se respalda en la experiencia de ENDE en la ejecución de obras de esta magnitud y en la disponibilidad de ingeniería y tecnología de construcción bien establecidas.

En la búsqueda de nuevos sitios, además de los ya existentes, se enfrentan desafíos. La primera etapa suele ser la identificación de aquellos lugares con una oferta potencial de agua y condiciones topográficas favorables, esta actividad se la realiza a partir del estudio de mapas del Instituto Geográfico Militar. Posteriormente, se realiza una evaluación in situ por parte de expertos en hidrología, hidráulica, geología, geotecnia y medio ambiente. Luego, se lleva a cabo el estudio de prefactibilidad técnica, económica y ambiental respectivo (Leyland, 2014). El número de sitios preseleccionados influye en el costo y tiempo de la investigación de factibilidad, por lo que, se confía en el buen criterio de expertos para reducir la cantidad de sitios a investigar.

Este artículo de investigación formula una metodología para preseleccionar sitios de interés hidroeléctricos de potencias menores a 50 MW, pero empleando información deducible a partir de

imágenes satelitales complementadas con mapas cartográficos, geológicos, uso de suelo, información de hidrología y de áreas protegidas, para ser posteriormente procesadas con técnicas de análisis multivariado, técnicas que son implementadas en un sistema de información geográfica. Al utilizar técnicas de análisis multivariado, se busca integrar y ponderar adecuadamente estos factores para obtener una evaluación más precisa de la conveniencia de cada sitio.

2. Métodos

En esta investigación se consideran las centrales hidroeléctricas de pasada (Run of River, RoR), entendidas como los esquemas de aprovechamiento que derivan directamente el caudal que corre por el río no teniendo embalses para el almacenamiento del agua (European Small Hydropower Association, 2006). Estas centrales son concebidas para trabajar sobre todo durante las horas pico de la demanda, por esta razón, ellas están sujetas a las variaciones estacionales de caudal resultando en una generación variable de electricidad (International Finance Corporation, 2015; Mosonyi, 1991). Una zona montañosa se presenta favorable porque el recurso hídrico captado por una toma de agua construida a cierta cota topográfica en el río, puede ser conducido por canal contorneando las curvas de nivel hasta un sitio en que por su elevación y cota del río crean un salto de agua suficiente para generar energía eléctrica. Por ello, es requisito básico disponer del relieve topográfico del área de estudio. La investigación extendió su cobertura a todo el país utilizando una imagen base DEM obtenida de la página <https://asf.alaska.edu/> (ALOSPALSAR DEM) con resolución de 30 m x 30 m. La imagen fue procesada con la extensión *ArcHydro* de ESRI para establecer la red de drenaje, la generación de redes de flujo, la identificación de subcuencas y la delimitación de las cuencas hidrográficas de Bolivia.

De la página de GeoBolivia de la Vicepresidencia del país (<http://geo.gob.bo/portal/>) se han descargado mapas digitales pertinentes. Los mapas fueron agrupados en dos factores: Factores Técnicos y Factores Ambientales. Los Factores Técnicos comprenden a los Factores Físicos que incluyen mapas de formaciones geológicas del país, geología estructural y mapa de amenazas por deslizamientos; los Factores Espaciales que comprende la red vial y de comunicación y mapas de división administrativa

y de centros poblados. Los Factores Ambientales incluyen mapa de áreas protegidas, mapas de flora, fauna y ecosistemas de tratamiento especial, mapas de territorio, actividades económicas y centros poblados. Adicionalmente, se trabajaron con mapas de ubicación de estaciones climáticas (precipitación, temperatura, dirección de vientos y humedad), estaciones hidrométricas (registro de caudales en ríos) y se generaron mapas de distancias a subestaciones eléctricas, comunidades y potenciales sitios de generación. La información necesaria de caudales en la red hidrográfica fue calculada a partir de los caudales específicos estimados para cada subcuenca, caudales que figuran en el documento “*Balance Hídrico Superficial de Bolivia*” (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2017) editado por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua del Estado Plurinacional de Bolivia y sus mapas digitales.

El potencial hidroeléctrico que se podría generar entre dos puntos de una conducción de agua, fue calculado con la ecuación (Mosonyi, 1991; Ramos, 2000 y Ortiz, 2011):

$$P_i = \gamma \times Q_i \times H_i \quad (1)$$

Donde P_i (kW) representa el potencial hidroeléctrico global generado entre dos puntos (nodos) de interés en el río; γ es el peso unitario del agua (kN/m^3); Q_i el caudal medio multianual (m^3/s) y H_i el salto bruto o desnivel topográfico entre los dos puntos de interés. La potencia anterior corresponde a un valor teórico que no considera las pérdidas de energía del fluido ni la eficiencia de la turbo maquinaria de aprovechamiento.

Se define como mil metros la distancia entre los dos nudos descritos. La red de drenaje del país fue segmentada en tramos de esa longitud. Estos puntos fueron extraídos con ArcGIS y conformaron una capa adicional del DEM del proyecto deduciéndose las elevaciones de cada uno de los nodos utilizando la herramienta *Spatial Analyst de ArcGIS*. Los extremos de cada tramo son candidatos para alojar la obra de captación sobre el río y alojar a la casa de máquinas; el desnivel entre los nodos del tramo constituirá el salto bruto del aprovechamiento. El análisis iterativo del conjunto de posibles saltos en la red fluvial, ponderado por los factores técnicos y ambientales, permitió encontrar el tramo más ventajoso de la

propuesta. La ponderación de los factores citados se realizó aplicando el análisis multicriterio a las variables geoespaciales descritas y a la producción de energía eléctrica de cada sitio. En la lógica del análisis, algunos factores llegan a tener mayor o menor importancia que otros, por lo que, se ponderaron mapa a mapa para configurar un mapa resultado de esa valoración. La Figura 1 presenta la metodología de la ponderación de mapas.

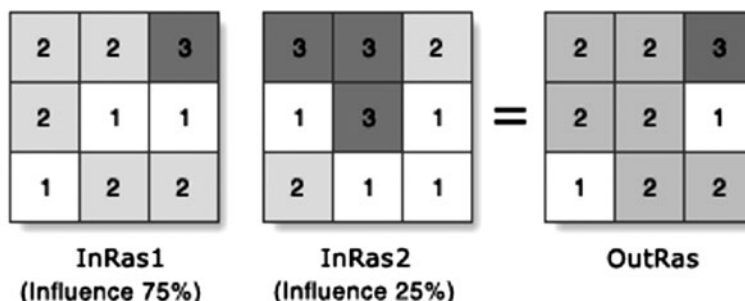


Figura 1. El mapa raster OutRas es el resultado de la suma del mapa de ingreso InRas1 con el InRas2, cada uno ponderados por los factores de 0.75 y 0.25 respectivamente. El valor resultante es redondeado al entero más cercano. Fuente: ESRI (2017)

Las variables para la valoración de las restricciones técnicas para un sitio candidato para aprovechamiento hidroeléctrico comprende las capas siguientes: Sitios de interconexión eléctrica (subestaciones, proyectos eléctricos, líneas de transmisión), vías de comunicación y red vial de Bolivia; capas en el SIG del proyecto, construidas a partir de los mapas de Geología, Amenaza de Inundación, Amenaza de Deslizamiento y Fallas Geológicas obtenidas de GeoBolivia.

Las capas de Sitios de Interconexión y Vías se procesaron utilizando la herramienta Euclidean Distance de ArcGIS para obtener una capa ráster que califica la distancia de un potencial sitio de generación con respecto a la cercanía a una subestación y a la cercanía a poblaciones. La Tabla 1 presente la valoración adoptada de la literatura especializada (Cornare, 2016) para calificar la cercanía de un sitio de interés potencial de generación hidroeléctrica hasta la subestación más cercana. El valor 1 expresa una calificación muy restrictiva debido a la lejanía a un sitio de interconexión; mientras que el valor de 10 expresa una calificación totalmente favorable por la cercanía que presenta el sitio de interconexión para zonas de desarrollo hidroeléctrico.

Tabla 1

Calificación de la cercanía (km) de un aprovechamiento eléctrico hasta una subestación

Distancia	<25	25 a 50	50 a 75	75 a 100	100 a 125	125 a 150	150 a 175	175 a 200	200 a 225	>225
Calificación	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

Fuente: Cornare (2016)

La Tabla 2 presenta la calificación de la cercanía del potencial sitio de generación eléctrica a las vías de comunicación terrestre conformadas por carreteras principales y secundarias. Mientras más lejano quede el sitio de aprovechamiento hidroeléctrico de un camino (valor 1) más dificultoso y costoso será para la construcción de una central; en contraposición (valor 10) cuanto más cercana quede una vía principal, más favorable resultará el mencionado sitio (Gracia, 2014).

Tabla 2

Calificación de la cercanía (km) de un aprovechamiento eléctrico a un camino secundario

Distancia	<0.5	0.5 a 1	1 a 2	2 a 3	3 a 5	5 a 7	7 a 10	10 a 15	15 a 20	>20
Calificación	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

Fuente: Gracia (2014)

Para la Formación Geológica, factor muy importante, se propone evaluar en función a la naturaleza de la roca y su resistencia en términos geotécnicos para soportar cargas exteriores. La literatura específica, como Gonzales de Vallejo (2002) permitió elaborar la Tabla 3 para calificar al macizo rocoso y su ventaja como fundación de las obras hidráulicas, las estructuras y la casa de máquinas de la central hidroeléctrica. El numeral 1 describe a una formación muy poco favorable, mientras que el máximo valor de 10 refleja inmejorables condiciones de soporte.

Tabla 3

Calificación de la formación geológica como basamento del aprovechamiento hidroeléctrico

Roca intacta	Resistencia a compresión simple (mPa)		Clase	Calificación
	Valores medios	Rango de valores		
Andesita	210-320	100-500	R5	9
Anfibolita	280	210-530	R5	9
Anhidrita	90	80-130	R4	8
Arenisca	55-140	30-235	R4	8
Basalto	150-215	80-350	R5	9
Caliza	80-140	60-200	R4	8
Cuarcita	200-320	100-500	R5	9
Diabasa	240-350	130-365	R5	9
Diorita	180-245	120-335	R5	9
Dolerita	200-300	100-350	R5	9
Dolomía	90-250	65-350	R4	8
Esquisto	50-60	20-160	R4	8
Gabro	210-280	180-300	R5	9
Gneiss	160-200	85-250	R5	9
Granito	170-230	100-300	R5	9
Grauvaca	180	80-220	R5	9
Limolita	-	35-250	R3	5
Lutita	30-70	10-100	R3	5
Marga	70-140	70-190	R4	8
Mármol	120-200	60-50	R5	9
Pizarra	100-180	90-250	R5	9
Sal	12	5-30	R2	3
Toba	0	10-46	R2	3
Yeso	25	10-40	R2	3

Fuente: Gonzales de Vallejo (2002)

El análisis de la Geología Estructural consideró la presencia de fallas en el terreno, fallas que impedirían la viabilidad técnica del emplazamiento del aprovechamiento hidroeléctrico. A partir de datos propuesto por Cornare (2016) se compuso la Tabla 4 que califica la presencia y ausencia de fallas en una escala numérica.

Tabla 4

Calificación de la geología estructural según la presencia de fallas geológicas

Tipo	Falla	Falla inferida	Lineamiento	Zona sin falla
Calificación	2	4	6	10

Fuente: Cornare (2016)

Para la ponderación del mapa de amenaza de deslizamiento, se recurrió a los criterios de Rojas & Arismendi (s. f.) que figuran en la Tabla 5. Los valores de la Tabla 5 señalan el numeral 1 para aquellas zonas que presentan mayor peligro de deslizamiento del terreno y 10 para aquellas zonas donde es muy poco probable la ocurrencia de un deslizamiento del terreno según el mapa obtenido.

Tabla 5

Calificación de la amenaza a deslizamiento

Amenaza	Muy alta	Alta	Media	Baja	Muy baja	Sin amenaza
Calificación	1	2	4	6	8	10

Fuente: Rojas & Arismendi (s. f.)

Para el mapa de Amenaza de Inundación se adoptó la orientación de Cornare (2016) mostrada en la Tabla 6. En ella, el valor 1 califica a una zona restrictiva constituida por llanuras aluviales y un valor de 10 calificación favorable para las zonas donde no existe amenaza de inundaciones.

Tabla 6

Calificación del riesgo por inundación

Nivel del riesgo	Nivel de riesgo	Calificación
Llanuras aluviales de inundación ocasional	10	1
Planicies de inundación permanente	9	2
Planicies de inundación ocasional a estacional	8	3
Planicies de inundación estacional a permanente	7	4
Torrenteras	6	5
Planicies de inundación ocasional	5	6
Zona sin amenaza	0	10

Fuente: Cornare (2016)

La Tabla 7 presenta la ponderación relativa de cada variable técnica frente a las otras. (Romero, 2018)

Tabla 7

Valores de ponderación a los mapas de los factores técnicos

Factor	Influencia (%)	Variable	Peso (%)
Factores físicos	50	Formaciones geológicas	50
		Geología estructural	25
		Amenaza por movimiento de deslizamiento	10
		Riesgo por inundación	15
Factor espacial	50	Distancia a Infraestructura vial existente	50
		Distancia a sitios de interconexión o subestaciones	50

Fuente: Romero (2018)

Por otra parte, se incorpora la evaluación de las restricciones ambientales en el análisis multivariado. Las restricciones ambientales pueden hacer inviable el proyecto o simplemente encarecerlo. La inviabilidad se refleja en atención a la normativa ambiental del país. En este caso se consideraron tres tipos de variables:

- Restricciones ambientales.
- Componente abiótico.
- Componente socioeconómico.

Las restricciones ambientales hacen referencia a toda aquella restricción de cualquier índole ambiental y, estando reglamentada, no es posible hacer ningún desarrollo de infraestructura, a menos que tenga destino exclusivo para aprovechamientos hidroeléctrico como en este caso. En base a experiencias pasadas y revisión literaria se elaboró la Tabla 8:

Tabla 8

Calificación de las restricciones ambientales normativas

Área Protegida	Categoría	Base Legal	Calificación
Apolobamba	Área Natural de Manejo Integrado Nacional	DS 10070 del 07/01/1972 - DS 25652 del 14/01/2000	3
Aguarague	Área Natural de Manejo Integrado	DL 2083 del 20/04/2000	3
Amboró	Área Natural de Manejo Integrado	DS 11254 del 20/12/1973 - DS 20423 del 16/08/1984 - DS 22939 del 11/10/1991 DS 24137 del 03/10/1995	3
Kaa-iyá del Gran Chaco	Área Natural de Manejo Integrado	DS 24122 del 21/09/1995	4
Madidi	Área Natural de Manejo Integrado	DS 24123 del 21/09/1995	3
El Palmar	Área Natural de Manejo Integrado	DS 24623 del 20/05/1997	3
Otuquis	Área Natural de Manejo Integrado	DS 24762 del 31/07/1997	3
Iñaño	Área Natural de Manejo Integrado	Ley No. 2727 del 28 de mayo de 2004	2
San Matías	Área Natural de Manejo Integrado	SD 24734 del 31/07/1997	3
Cotapata	Área Natural de Manejo Integrado	DS 23547 del 09/07/1993	3
Noel Kempff Mercado	Parque Nacional	DS 16646 del 28/06/1979 - Ley 978 del 04/03/1988 - DS 21997	1
Toro Toro	Parque Nacional	DS 22269 del 26/07/1989 - Ley 1370 del 13/11/1992	1
Carrasco	Parque Nacional	DS 22940 del 11/10/1991 - RM 157-86 del 22/04/1986 - RM 381/88 del 09/12/1988	1
Otuquis	Parque Nacional	DS 24762 del 31/07/1997	3
Tunari	Parque Nacional	DS 6045 del 30/03/1962 - Ley 253 del 04/11/1963 - DS 15872 del 06/08/1978 _ 1262 del 13/09/1991__	1
Sajama	Parque Nacional	SD s/n del 02/08/1939 - Ley s/n del 05/11/1945	1
Isiboro Securo	Parque Nacional y Territorio Indígena	DL 7401 del 22/11/1965 - DS 22610 del 24/09/1990 - RR CDF RN 012/90	1
Cordillera de Sama	Reserva Biológica	DS 22721 del 30/01/1991	1
Pilón Lajas	Reserva de la Biosfera y Territorio Indígena	DS 23110 del 09/04/1992	1
Estación Biológica del Beni	Reserva de la Biosfera	DS 19191 del 05/10/1982 DS 22611 del 24/09/1990	1
Eduardo Avaroa	Reserva Nacional de Fauna Andina	DS 11239 del 13/12/1973 - DS 19313 del 14/05/1981 - SD 18431 del 26/06/1981	1
Tariqua	Reserva Nacional de Flora y Fauna	DS 22277 del 02/08/1989 - Ley 1328 del 23/04/1992	1
Manuripi	Reserva Nacional de Vida Silvestre Amazónica	DS 11252 del 20/12/1973	1
Zona sin área protegida			10

Fuente: (GeoBolivia, s.f.)

La evaluación de cada uno de los parámetros ambientales, de la misma manera que en la evaluación técnica, se calificó entre valores de 1 a 10, siendo 1 el valor totalmente restrictivo ambientalmente (ausencia de normativa legal que permita el desarrollo hidroeléctrico) y 10 el valor más favorable para la zona donde no exista área protegida, ecosistemas estratégicos o coberturas boscosas. A partir de la revisión bibliográfica se elaboró la Tabla 9:

Tabla 9

Calificación componente biótico

Clasificación Tipo de Bosque	Calificación
Bosque amazónico	5
Bosque andino	8
Bosque chaqueño	9
Bosque chiquitano	6
Bosque seco interandino	9
Bosque tucumano - boliviano	7
Bosque de llanura inundable	4
Bosque pantanal	7
Bosque de yungas	6
Zona sin Bosque	10

Fuente: (GeoBolivia, s.f.)

Se ha considerado el bosque como el más favorable de los hábitats para la biota, a pesar de que bofedales y praderas por encima de los 4000 msnm son también ambientes para la vida; sin embargo, por la profusión de vida en los bosques, se consideró a ellos como elemento representativo para la evaluación. La Tabla 9 presenta valores entre 5 a 10 donde el valor de 10 presenta zonas sin bosques. A medida que la profusión de bosques crece, la calificación decrece.

En las restricciones del componente socioeconómico se pueden encontrar los siguientes elementos a considerar:

- Centros poblados
- Población a reasentar
- Presencia de comunidades indígenas.

Como última variable se obtuvo la siguiente tabla para el componente socioeconómico:

Tabla 10

Calificación de la distancia del sitio de la central con respecto a centros poblados

Rango de distancias (km)	Calificación
≤ 0,5	10
0,51 – 1	9
1,01 – 2	8
2,01 – 3	7
3,01 – 5	6
5,01 – 7	5
7,01 – 10	4
10,01 – 15	3
15,01 – 20	2
> 20	1

Fuente: Alfonso, Medina & Corredor (s. f.)

La asignación de peso a los centros poblados, se presenta según la tabla anterior en base a la distancia que existe entre zonas de desarrollo potencial hidroeléctrico y comunidades, centros poblados o municipios. Como resultado de la evaluación de la variable del componente socioeconómico, se tienen las calificaciones entre rango de 1 a 10, siendo el 1 una calificación casi restrictiva debido a que la distancia hacia un centro poblado es muy lejana y el valor de 10 una calificación totalmente favorable por la cercanía que presenta hacia un centro poblado, comunidad o municipio. Los factores de ponderación de las variables ambientales se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11

Factores de ponderación de la calificación de las restricciones ambientales

Factor	Influencia	Variable	Peso
Restricciones normativas (RAN)	40	Área Natural de Manejo Integrado Nacional	100
		Área Natural de Manejo Integrado	
		Parque Nacional	
		Parque Nacional y Territorio Indígena	
		Reserva Biológica	
		Reserva de la Biosfera y Territorio Indígena	
		Reserva de la Biosfera	
		Reserva Nacional de Fauna Andina	
		Reserva Nacional de Flora y Fauna	
Componente abiótico (CA)	30	Reserva Nacional de Vida Silvestre Amazónica	100
		Bosque Amazónico	
		Bosque Andino	
		Bosque Chaqueño	
		Bosque Chiquitano	
		Bosque Seco Interandino	
		Bosque Tucumano - Boliviano	
		Bosque de Llanura Inundable	
		Bosque Pantanal	
Componente Socioeconómico (Cs)	30	Bosque de Yungas	100
		Zona sin Bosque	
		Presencia de comunidades indígenas	
		Cabeceras Municipales	
		Centros Poblados	

Fuente: Romero (2018)

La evaluación general de las restricciones ambientales se realizó de acuerdo a revisiones especializadas de expertos en el área, obteniéndose los pesos ponderados requeridos. Aplicando los factores de ponderación se tiene como resultado un solo mapa de evaluación de variables ambientales para zonas de desarrollo hidroeléctrico potencial.

La intersección de capas del factor técnico y el factor ambiental da como resultado zonas aptas para desarrollo hidroeléctrico para su posterior emplazamiento de una central hidroeléctrica.

La evaluación general para los pesos ponderados se presenta en la Tabla 12 según revisiones bibliográficas:

Tabla 12

Factores de ponderación de la calificación de los factores técnicos y ambientales

Factor	Peso
Factor técnico	50%
Factor ambiental	50%

Fuente: (Romero, 2018)

Con los mapas y las tablas de ponderación para cada uno de los factores, se obtienen los sitios más promisorios para el emplazamiento de una central hidroeléctrica.

La aplicación de la metodología propuesta proporciona un mapa mostrando que toda la zona norte del

69°W 66°W 63°W 60°W

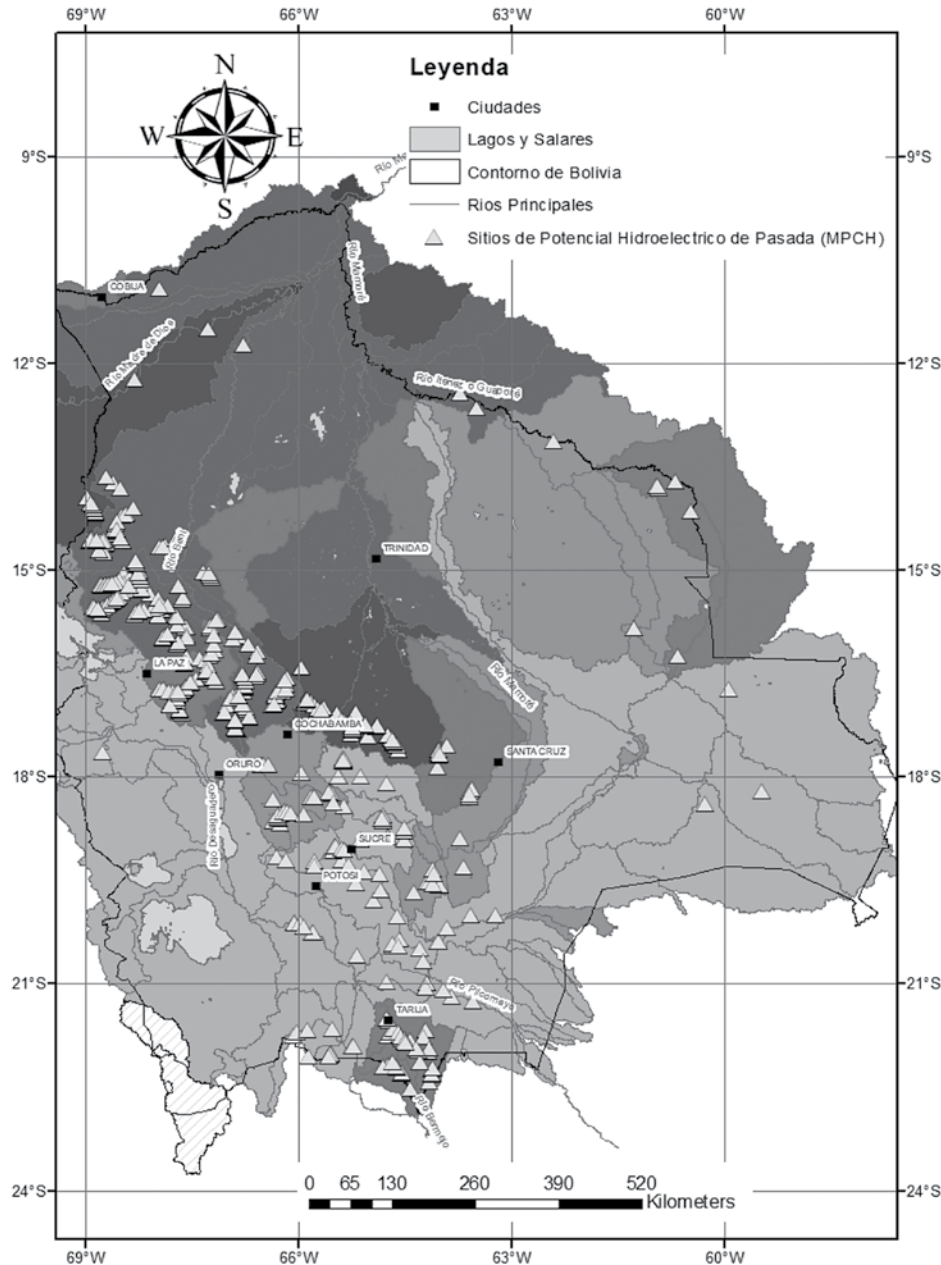


Figura 2. Sitios potenciales para centrales hidroeléctricas de pasada.

Finalmente, en la Figura 3 y en la Tabla 13 se muestran los diez mejores sitios para implementar centrales hidroeléctricas de pasada.

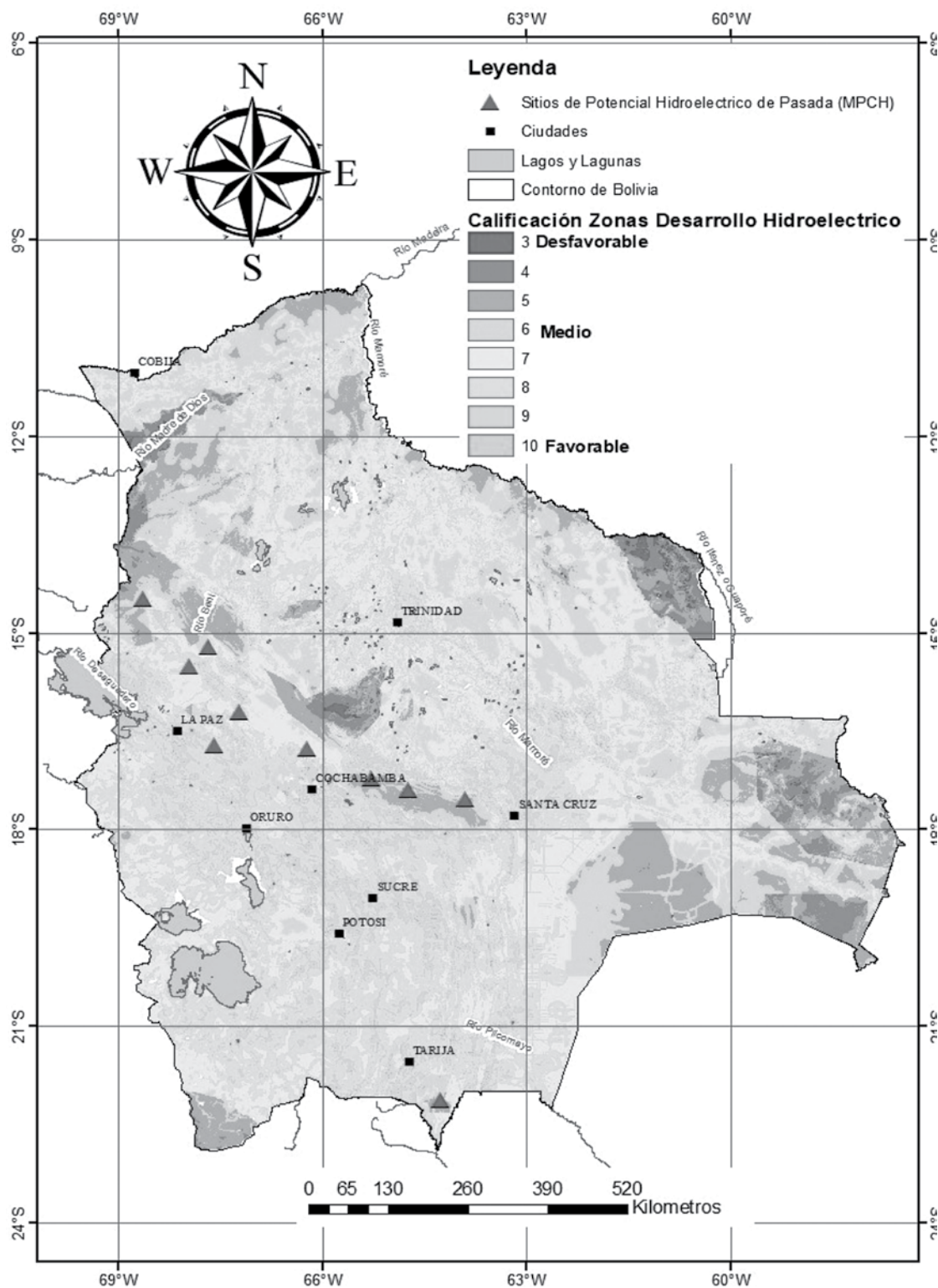


Figura 3. Diez mejores sitios para emplazar un aprovechamiento hidroeléctrico de pasada en la geografía de Bolivia, resultado de la aplicación de la metodología de análisis multivariado propuesto en esta investigación.

Tabla 13

Los diez mejores sitios para emplazar una central hidroeléctrica de pasada, según la metodología del análisis multivariado propuesto en la investigación

ID	Obra de Toma		Casa de Máquinas		Calificación de mayor a menor	Potencia (MW)	Departamento	Provincia
	Coordenada Este	Coordenada Norte	Coordenada Este	Coordenada Norte				
269	690691	8206326	691258	8206863	9	49.3	La Paz	Sud Yungas
322	649853	8150712	650096	8151611	9	13.8	La Paz	Loayza
94	794813	8143568	795706	8143656	8	19.3	Cochabamba	Ayopaya
393	612652	8283066	613032	8283669	8	8.02	La Paz	Larecaja
235	538647	8397316	539278	8397948	7	37.04	La Paz	Franz Tamayo
278	641363	8315443	641746	8316284	7	42.4	La Paz	Larecaja
81	403782	8059200	404122	8060038	6	11.3	Santa Cruz	Ichilo
143	367872	7551320	368669	7551020	6	20.8	Tarija	Arce
198	315366	8075376	314778	8076105	6	38.6	Cochabamba	Carrasco
302	258937	8094508	258096	8094651	6	18.8	Cochabamba	Tiraque

Como se puede observar, los diez sitios encontrados se hallan en la faja subandina de la cordillera oriental. De los cinco mejores, cuatro están en el departamento de La Paz y uno en Cochabamba. Si se implementasen los cinco sitios, se estaría incrementando -en conjunto- en 127 MW de energía al Sistema Interconectado Nacional. Por ejemplo, una de las centrales hidroeléctricas del país es el proyecto San José I y San José II y que tienen una potencia instalada conjunta de 124 MW, el proyecto hidroeléctrico Masicuni tiene 80 MW y Banda Azul 69 MW. La comparativa de estos números destacan la promisión de la metodología aquí formulada.

4. Conclusiones

En la presente investigación se recopiló y generó información geoespacial como mapas de elevación digital, cuencas hidrográficas, balance hídrico, redes de drenaje, formaciones geológicas, fallas geológicas, mapa de amenaza de inundación, amenaza de deslizamiento, infraestructura de interconexión eléctrica, vías secundarias, áreas protegidas, centros poblados y bosques. Como resultado de la aplicación de la metodología a Bolivia, se han determinado 500 posibles ubicaciones de medianas y pequeñas centrales hidroeléctricas (MPCH) de pasada que ofrecen diferentes niveles de producción energética. En forma específica, se han identificado los diez

más promisorios sitios para implementar centrales hidroeléctricas en el país (Figura 3 y Tabla 12).

Se considera que la herramienta desarrollada puede convertirse en un instrumento de apoyo para la toma de decisiones al momento de la selección de las mejores alternativas de un proyecto en una etapa temprana. Sin embargo, se la debe considerar como el primer paso para desarrollar una metodología más robusta y completa.

Se reconoce que la inclusión de nuevas variables técnicas y ambientales, así como una discusión exhaustiva de los factores de ponderación de cada mapa, proporcionaría una evaluación más certera de sitios factibles para el desarrollo hidroeléctrico.

Agradecimientos

Se agradece al Laboratorio de Hidráulica de la FCyT de la UMSS y al Proyecto HYPOSO quienes fueron gestores y apoyo para la realización de este estudio.

5. Referencias bibliográficas

Alfonso, D., Medina, P., & Corredor, J. (s. f.). *Aplicación de sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la determinación de zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja*. Tunja: Tesis de Grado.

- Cornare. (2016). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Negro. Medellín - Colombia: Consorcio POMCAS.
- ESRI. (2017). ArcGIS. Obtenido de Superposición Ponderada (Spatial Analyst): <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/weighted-overlay.html>
- European Small Hydropower Association. (2006). *Guía para el desarrollo de pequeñas centrales hidroeléctricas*. Brussels - Belgium: European Renewable Energy Council.
- Gonzales de Vallejo, L. (2002). *Engineering rock mass classification: a complete manual for engineers*. Rosario - Argentina.
- Gracia. (2014). Aplicación de técnicas de análisis multicriterio a la localización óptima de extracciones de arenas y gravas en el entorno de Zaragoza. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 25 - 48.
- International Finance Corporation. (2015). *Hydroelectric Power*. Stuttgart - Germany: World Bank Group.
- Leyland, B. (2014). *Small Hydroelectric Engineering Practice*. London - England: Taylor & Francis Group. pag. 6.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2017). *Balance Hídrico Superficial de Bolivia*. La Paz - Bolivia: GIZ/PROAGRO.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2022). *Contribución Nacionalmente Determinada del Estado Plurinacional de Bolivia*. La Paz - Bolivia: MMAyA.
- Mosonyi, E. (1991). *Water Power Development - High Head Power Plants - Vol II/A*. Budapest - Hungary: akademiai Kiado.
- Ortiz, R. (2011). *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. Bogotá - Colombia: Xpress Estudio Gráfico.
- Ramos, H. (2000). *Guidelines for Design of Small Hydropower Plants*. Belfast - North Ireland: Western Regional Energy Agency.
- Rojas, C., & Arismendi, J. (s.f.). *Análisis Multicriterio en SIG para la Prospección de Yacimientos Minerales Auríferos*. Bogotá - Colombia: Facultad de Ingeniería - Universidad Jose Caldas.
- Romero, A. (2018). *Metodología para Determinar el Potencial hidroeléctrico y la prefactibilidad Preliminar de Proyectos de Generación con SIG*. Zalsburgo - Austria: Universidad de Zalsburg.