



Proyectos de ingeniería aplicada

Análisis espacial del potencial de electrificación de estanques destinados a la piscicultura en áreas tropicales de Bolivia, y primera estimación de la potencia agregada de generación distribuida, el ahorro en combustibles y emisiones de CO₂

Spatial analysis of the potential for electrification of ponds intended for fish farming in tropical areas of Bolivia and first estimate of the added power of distributed generation, fuel savings and CO₂ emissions.

 Michelle Fernández-Vázquez¹  Miguel Fernández-Fuentes²

Ingeniera ambiental / Innovación Sostenible y Escuela Militar de Ingeniería / Cochabamba / Bolivia / tdimichelle@gmail.com

Ingeniero eléctrico / IMMERSIVE SRL - Proyecto GENERIS / Cochabamba / Bolivia / miguel@immersive-srl.com

RESUMEN

La piscicultura es una actividad en expansión en el Trópico de Cochabamba, Bolivia, y representa una oportunidad clave para el desarrollo económico local bajo criterios de sostenibilidad. Sin embargo, el uso de motobombas a gasolina para el rellenado de estanques y también la oxigenación, genera emisiones significativas de CO₂ y altos costos operativos. Este estudio realizó un análisis espacial para estimar el potencial de electrificación de estanques piscícolas mediante sistemas de generación distribuida interconectados a la red eléctrica nacional. Se utilizaron datos geográficos en QGIS, considerando áreas buffer de 100 m y 500 m alrededor de la red eléctrica. Se determinó que el 83.57% de los 17,396 estanques registrados en 2023 se encuentran dentro de estas áreas, lo que representa una oportunidad significativa para reducir emisiones. La sustitución de combustibles fósiles por sistemas de generación distribuida permitiría evitar la emisión de aproximadamente 5856,3 toneladas de CO₂ por año, a través de la instalación de 2,49 MWp de paneles fotovoltaicos, generando de 30,7 GWh/año y una necesidad de inversión en la región de 6,7 millones de USD para este universo. Este cambio, además sería rentable para el piscicultor, debido al alto costo de la gasolina.

Estos resultados evidencian el alto potencial de implementación de tecnologías limpias en la piscicultura boliviana, alineadas con los objetivos de transición energética justa.

Palabras clave: Usos productivos de la energía, transición energética, generación distribuida fotovoltaica. Electrificación de la piscicultura.

ABSTRACT

Fish farming is a growing activity in the Tropics of Cochabamba, Bolivia, and represents a key opportunity for local economic development under sustainability criteria. However, the use of gasoline-powered water pumps for pond fill and oxygenation generates significant CO₂ emissions and high operating costs. This study conducted a spatial analysis to estimate the electrification potential of

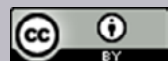
Citar como: Fernández-Vázquez, M., Fernández-Fuentes, M. Análisis espacial del potencial de electrificación de estanques destinados a la piscicultura en áreas tropicales de Bolivia, y primera estimación de la potencia agregada de generación distribuida, el ahorro en combustibles y emisiones de CO₂. *Revista Journal Boliviano De Ciencias*, 21(58) 117-134 <https://doi.org/10.52428/20758944.v21i58.1387>

Recepción: 16/07/2025

Aceptado: 17/11/2025

Publicado: 30/12/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Fernández-Vázquez, M., Fernández-Fuentes, M. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



fish farming ponds through distributed generation systems interconnected to the national electric grid. Geographic data were processed using QGIS, considering 100 m and 500 m buffer areas around the power grid. The results showed that 83.57% of the 17,396 ponds recorded in 2023 are located within these areas, presenting a significant opportunity to reduce emissions. Replacing fossil fuel use by distributed generation systems could prevent approximately 5.856,3 tons of CO₂ emissions per year, through the installation of 2,49 MWp of photovoltaic panels, generating 30,7 GWh/year and an investment need in the region of 6,7 million USD for this universe. This change would also be profitable for the fish farmer, due to the high cost of gasoline.

These findings highlight the strong potential for implementing clean technologies in Bolivian aquaculture, aligned with the goals of a just energy transition.

Keywords: Productive uses of energy, Energy transition, PV distributed generation. Fish farming electrification.

1. Introducción

Las actividades productivas deben encaminarse a la eficiencia y la sostenibilidad, incluyendo los aspectos ambientales, sociales, económicos y tecnológicos que mejoren su eficiencia y rentabilidad. Esto resulta prioritario al considerar que entre las principales amenazas y problemas que enfrenta la humanidad están la falta de alimento y los efectos del cambio climático. El ser humano se encuentra en un estado de vulnerabilidad dependiente de la posición geográfica y del desarrollo tecnológico para asegurar la supervivencia. En el sector alimentario es importante fomentar la generación de economías locales, ofrecer oportunidades de empleo e incrementar el nivel de bienestar de los productores, resaltando la importancia de un crecimiento de la producción de productos piscícolas (FAO, 2020; Gómez *et al.*, 2022).

La piscicultura puede tener un impacto ambiental positivo o negativo, dependiendo de las prácticas de producción utilizadas. La producción responsable puede contribuir a la conservación de los ecosistemas usando el agua de manera eficiente, la gestionando correctamente los residuos y protegiendo la biodiversidad y el entorno local. No obstante, una piscicultura intensiva mal manejada puede llegar a provocar disminución y/o contaminación del agua, pérdida de hábitats naturales, eutrofización de los cuerpos de agua, y pérdida de ecosistemas y biodiversidad (Faunagua, 2024). Por lo tanto, al igual que en otras actividades productivas como la agricultura, es de gran importancia disminuir la mayor cantidad posible de impactos ambientales negativos.

La piscicultura se expande rápidamente en la región del trópico de Cochabamba llegando a promover una permanente construcción de nuevos estanques de cultivo. Muchos estanques son construidos en espacios que solían ser pastizales o cultivos cercanos a centros poblados, pero a la larga esta situación podría llevar a la destrucción de bosques para la construcción de estanques y la transformación de ecosistemas acuáticos naturales (Faunagua, 2024).

Cultivar peces, implica crear criaderos en piscinas o estanques, por lo cual es fundamental realizar el llenado de agua y la oxigenación adecuada de los estanques para optimizar el crecimiento de los peces a través de máquinas que demandan fuentes de energía para su utilización constante. El método más común es el uso

de motobombas que sirven para rellenar los estanques de agua regularmente y también, en el caso de la oxigenación, absorben agua del estanque y la lanzan al aire, provocando que, en la caída, el agua entre en contacto con el oxígeno y remueva el volumen de la piscina (IMMERSIVE SRL, 2024).

Los informes del proyecto GENERIS sobre estudios de caso realizados en la comunidad de Mariposas, Municipio de Puerto Villarroel en Cochabamba, donde participó la Asociación de Piscicultores Iro de Mayo conformada por 73 familias productoras, muestran que los estanques para piscicultura en la zona tienen en promedio una superficie de 20 m x 50 m de área y produce 1000 kg de pescado en un periodo de 8 a 10 meses. La oxigenación es una práctica extendida en la región y se hace una vez a la semana por 3 horas aproximadamente por cada estanque, utilizando motobombas a gasolina. Este equipo consume en promedio 4,28 litros de gasolina en cada proceso, totalizando 171,4 litros de gasolina al año, emitiendo 402,9 kgCO₂/año (Faunagua, 2024; IMMERSIVE SRL, 2024).

La disponibilidad de motobombas es generalizada en la zona, prácticamente todos los productores tienen más de un equipo, con una potencia entre 3 HP y 4 HP y su difusión ha sido tal, que en los paquetes de los programas de apoyo a piscicultores de diferentes proyectos gubernamentales, la motobomba es un equipo integral, junto a la excavación de estanques, dotación de alevines y otros.

Adicionalmente, la escasez de gasolina en la región se ha agudizado, al igual que en el resto del país, comprar gasolina en bidones es muy dificultoso, ya que existe prioridad para el autotransporte, medidas como el DS 4910 de 12 de abril de 2023 y el DS 5353 de 19 de marzo 2025 evidencian esta situación.

Es este contexto, el cambio de fuente energética de gasolina a electricidad proveniente de la energía solar, es una opción que el proyecto GENERIS decidió estudiar de manera práctica. Aunque existe un hecho particular, la oxigenación se realiza en la madrugada, en horarios donde no hay energía solar. Esta situación plantea como opción convencional, el diseñar un sistema fotovoltaico con baterías para el almacenamiento de energía y, poder accionar la bomba en horarios donde no hay acceso a la radiación solar, sin embargo, esta solución que incluye baterías, es altamente costosa (Fernández F. 2019).

De esa manera, se decidió utilizar un esquema de generación distribuida (GD), mucho más económico y que no utiliza baterías. En este sistema de GD los paneles fotovoltaicos generan electricidad y a través de un inversor de red, la inyectan directamente a la red de consumo en 220 V AC; en caso de existir un excedente, es posible inyectar esa energía a la red de distribución, utilizando un medidor bidireccional. En el marco del Decreto Supremo (DS) 4477 (2021) y el DS 5167 (2024) que permiten el intercambio de energía entre la red eléctrica y los sistemas fotovoltaicos, se puede reponer la electricidad consumida en la madrugada durante el resto del día, así sería posible utilizar la electricidad de la red en cualquier horario. En términos simples, la red actúa como una batería. La normativa permite que se realice un balance bianual de entregas y retiros de energía.

La principal condición para utilizar este esquema, es el acceso a la red eléctrica por parte de los piscicultores. Los estanques de aproximadamente 1000 m², están distribuidos al interior del predio de los productores, a lo largo de pasajes internos de gran longitud; para poder llevar la electricidad a los estanques de peces es necesario realizar la construcción de redes de distribución internas que permitan

llegar a todos los estanques con tomas de fuerza, para que ahí se enchufe la bomba eléctrica portátil o el oxigenador. En los casos de estudio, se ha identificado la necesidad de construir redes distribución interna que van desde 250 m hasta 750 m de longitud.

Bajo esas premisas se realizaron instalaciones prototipo demostrando que esta medida, puede disminuir la demanda de gasolina para esta actividad productiva, pero también convertirse en una forma de disminuir el impacto ambiental negativo de la producción piscícola del país, además de mejorar la rentabilidad de esta actividad económica.

Sin embargo, surge el cuestionamiento si esta alternativa planteada es válida para un universo importante de piscicultores, pues si bien el recurso solar es ampliamente aprovechable y disponible en la zona (Fernández Morales, 2012), el acceso a la red en áreas rurales puede ser, en principio una limitante para utilizar la opción de generación distribuida.

Con las condicionantes descritas, el alcance de esta investigación pretende estimar el potencial de estanques dedicados a la piscicultura que podrían estar conectados a la red distribución, ubicados en el trópico cochabambino, utilizando un Sistema de Información Geográfica e imágenes satelitales de la zona, con el fin de desplazar el consumo de combustibles fósiles de motobombas y oxigenadores, y reemplazarlos por equipo eléctrico. Paralelamente, en cada predio se instalaría un sistema fotovoltaico de generación distribuida, el que posibilitaría generar toda la electricidad demandada por las bombas y oxigenadores, y al realizar el intercambio de energía con la red, no incrementaría la factura de las familias. Bajo esta acción se lograría disminuir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero y los costos de producción piscícola bajo un enfoque de transición energética justa.

2. Metodología

De manera específica se planteó la posibilidad de realizar un análisis espacial de los estanques de piscicultura y su relación con la red de baja tensión en las zonas analizadas. En las áreas coincidentes se realizarían análisis de cobertura suponiendo una extensión de la red de baja tensión de 100 m (límite para áreas de concesión de la empresa eléctrica), hasta un máximo de 500 m.

Para realizar esta investigación se partió de la información generada por Faunagua, quienes referencia más de 22.000 estanques para piscicultura en 10 Municipios de Cochabamba y Santa Cruz.

De esta manera se obtuvieron diferentes capas de información geográfica; del estudio de Faunagua (2024), se analizó un archivo shape con la georreferenciación de estanques presentes en 2023 en los municipios de Villa Tunari, Puerto Villarroel, Chimoré, Shinahota y Entre Ríos. También se obtuvo un archivo shape de la Red Eléctrica de Bolivia, realizado por el Ministerio de Hidrocarburos y Energía.

Ambas capas de información fueron tratadas en QGIS 3.4, superponiéndolas y posteriormente generando un área Buffer de 100 m y de 500 m alrededor de las líneas de la Red. Estos rangos fueron considerados en base a los criterios de cobertura

Aquellos estanques que se encontraron dentro de estas áreas buffer se seleccionaron para posteriormente calcular el porcentaje de estanques que podrían oxigenarse a partir de un sistema de generación distribuida que alimente las bombas de agua.

Una vez que se identificaron los estanques se los segmentó en función a su distancia a la red. Con el universo probable que tenga acceso a la red, se procederá a realizar extrapolaciones sobre la cantidad de gasolina que podrá desplazarse, las emisiones evitadas, la potencia total en generación distribuida que se podría instalar, las inversiones necesarias y las implicaciones de esta medida para impulsar un proceso de transición energética en este sector productivo.

3. Resultados

3.1 Análisis espacial del acceso a la red eléctrica de estanques de piscicultura

La cantidad de estanques presentes en el Trópico Cochabambino en el año 2023 fue de 17396 (Faunagua, 2024). Estos se observan en la Figura 1, y fueron superpuestos a la capa de la Red que se observa en la Figura 2.

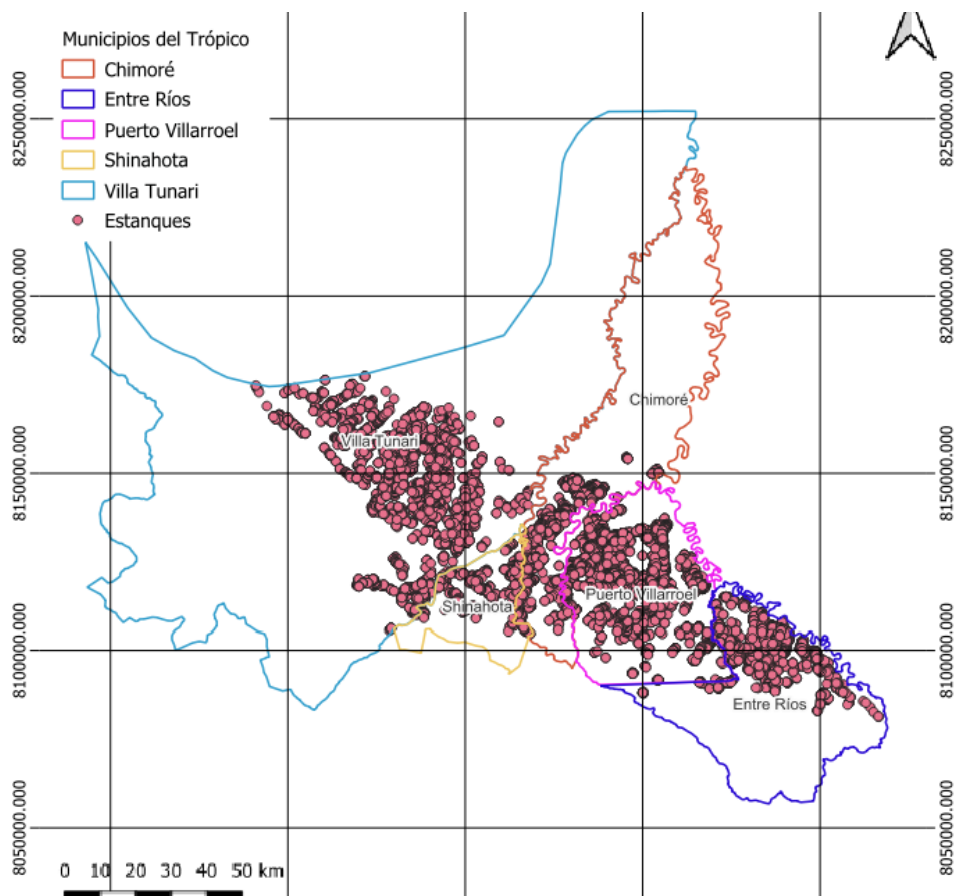


Figura N° 1. Estanques piscícolas del Trópico de Cochabamba. Fuente: Faunagua, 2024)

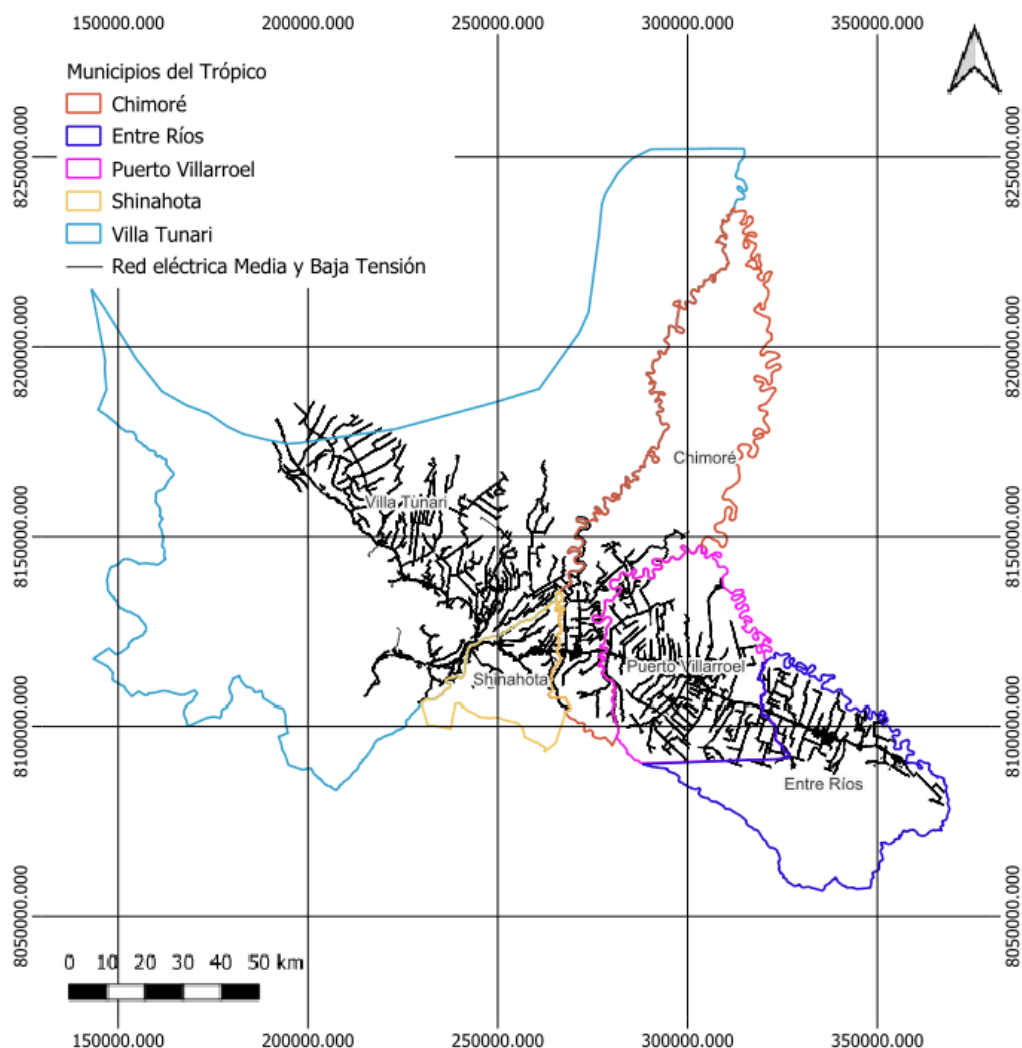


Figura N° 2. Red Eléctrica en el Trópico de Cochabamba. Fuente: Faunagua, 2024.

En la Figura 3 se muestra una parte del procesamiento de imágenes en el sector sureste del Trópico de Cochabamba, entre los municipios de Puerto Villarroel y Entre Ríos. Las líneas moradas representan un área buffer de 100 m alrededor de la red, mientras que las líneas naranjas representan el área buffer de 500 m alrededor de la Red eléctrica.

Posteriormente, se muestran en verde oscuro los estanques que se encuentran a 100 m o menos de distancia de la Red, mientras que en rosado se representan los estanques que no entran dentro del primer área buffer.

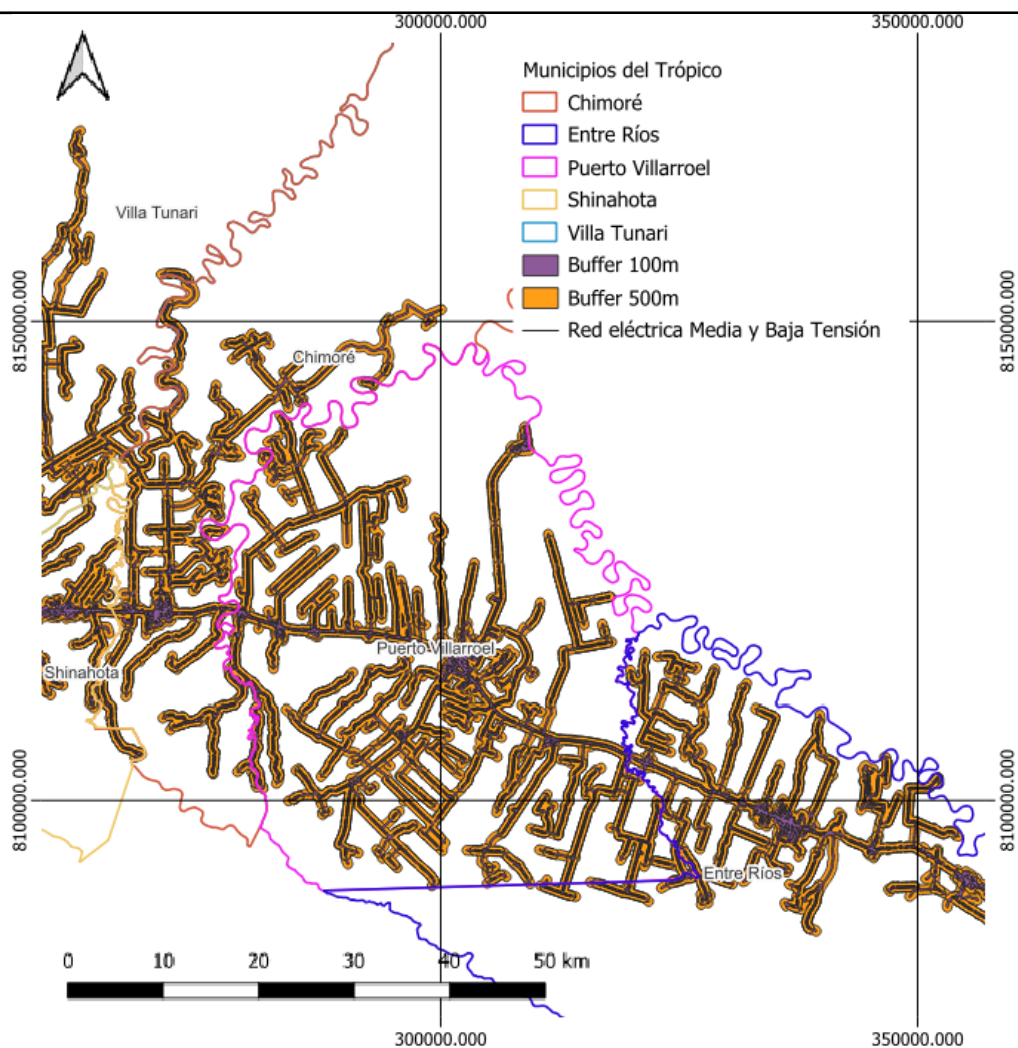


Figura N° 3. Áreas Buffer en Entre Ríos (a 100 m y 500 m). Fuente: Elaboración propia.

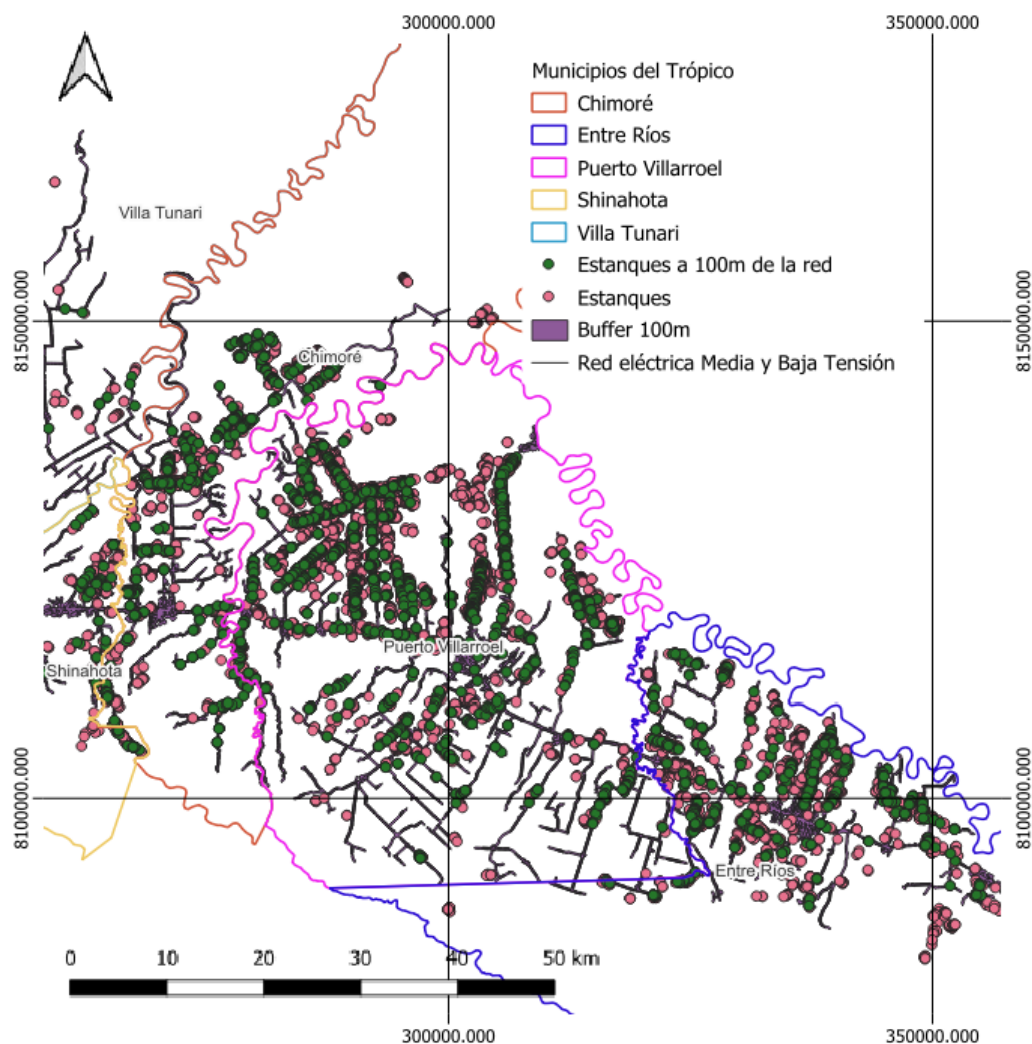


Figura N° 4. Estanques ubicados a 100 m o menos de la Red. Fuente: Elaboración propia.

Por último, en verde claro se encuentran representados los estanques se ubican hasta a 500 m de distancia de la Red, siendo factible su oxigenación con sistemas de generación distribuida.

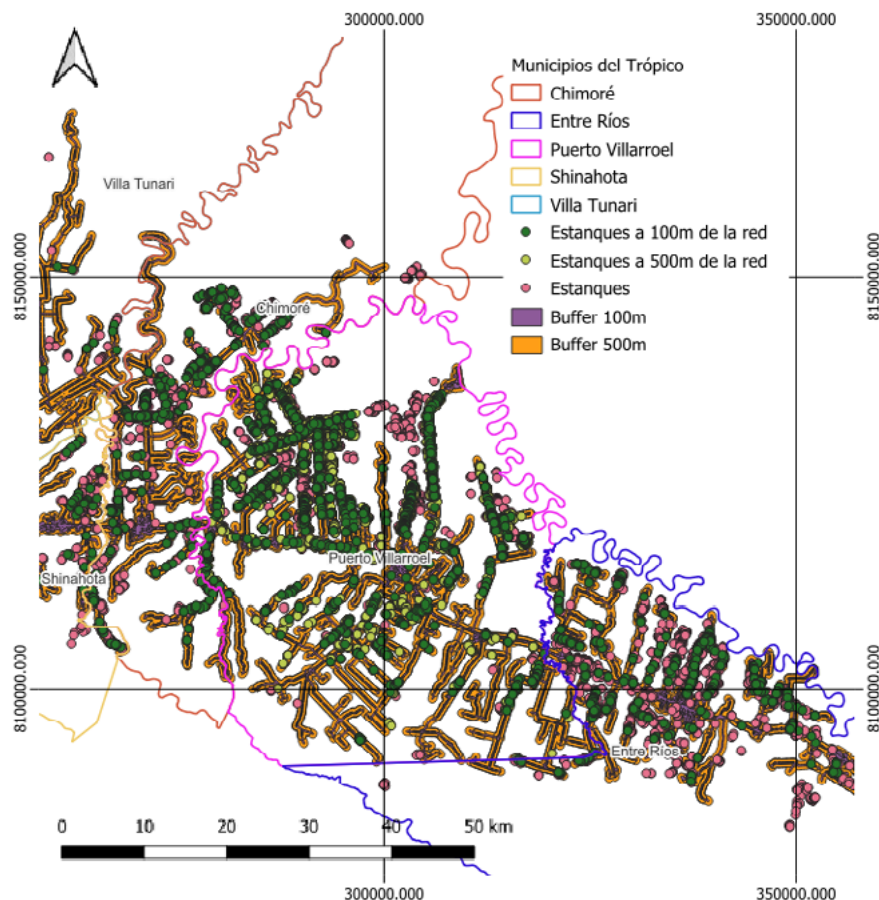


Figura N° 5. Estanques con posibilidad de conexión a la Red (500 m de distancia). Fuente: Elaboración propia.

Los datos numéricos de los estanques analizados se encuentran en la Tabla 1, la misma indica que el 83.57% de los estanques para producción piscícola del Trópico de Cochabamba podría obtener electricidad de la Red para conectar sus bombas eléctricas y dejar de utilizar gasolina como combustible. Cabe recalcar que este estudio considera la distancia a la Red como factor determinante para la transición energética de esta actividad productiva.

Tabla N° 1. Estanques a 100 m, 500 m y más de 500 m (S/C) de la Red

Municipio	Es 100m	%Es 100m	Es 100-500m	%Es 100-500 m	EsS/C	%S/C	EsTotales
Chimoré	608	30,74	1.169	59,10	201	10,16	1.978
Entre Ríos	635	23,12	1.592	57,98	519	18,90	2.746
Puerto Villarroel	2.069	26,50	4.558	58,38	1.181	15,13	7.808
Shinahota	179	27,67	394	60,90	74	11,44	647
Villa Tunari	1.406	33,34	1.927	45,70	884	20,96	4.217
Trópico de Cbba.	4.897	28,15	9.640	55,42	2.859	16,43	17.396

Fuente: Elaboración propia.

Donde, Es100 m: cantidad de estanques a 100 m o menos de la red; %Es100 m: porcentaje de estanques a 100 m o menos de la red con respecto al total de estanques por municipio; Es 100-500 m: cantidad de estanques ubicados de 100 m a 500 m de la red; %Es 100-500 m: porcentaje de estanques de 100 a 500 m de la red con respecto al total de estanques por municipio; EsS/C: cantidad de estanques a más de 500 m de la red, %S/C: porcentaje de estanques a más de 500 m de la red. De esta manera se tendría un universo de 14.537 estanques en el área de cobertura de la red eléctrica.

3.2 Descripción del paquete tecnológico a implementar

El paquete tecnológico a implementar está conformado por 3 componentes: a) la red de distribución interna que permite acercar la electricidad a los estanques de los piscicultores, en condiciones de calidad de energía y seguridad (ante lluvias y otros incidentes); b) los equipos que utilicen la electricidad: básicamente bombas eléctricas adaptadas para que puedan funcionar como equipos portátiles (similar a las motobombas que utilizan y que se desplazan a cada estanque) y los oxigenadores eléctricos; c) el sistema fotovoltaico de generación distribuida que permite la generación de electricidad limpia y, el intercambio de energía con la red eléctrica.

En cuanto a la extensión de la red eléctrica de servicio público, es una responsabilidad y atribución de la empresa distribuidora. En la zona, una gran mayoría de los productores tienen conexión a la red, por lo que no se constituye en una barrera. En cambio, las extensiones internas de la red, para llegar a los estanques, son de responsabilidad del productor. GENERIS ha realizado instalaciones piloto, y de estos casos se ha podido estimar los costos de extensión de redes, que cumplan las exigencias técnicas según las normas (caídas de voltaje, pérdidas, etc.) cuidando que los diámetros de conductores y otros sean los correctos. Una ventaja en la zona objeto del estudio, es que la topografía es llana, sin pendientes abruptas y otros

accidentes geográficos. Justamente esta topografía llana hace que el territorio sea apto para piscicultura.

Sobre esta base de campo, se ha considerado el caso de mayor extensión (750 m para 14 piscinas, 250 m para 5 piscinas) y estas condiciones han permitido establecer un costo promedio unitario por estanque.

La selección de la energía solar como fuente renovable para su utilización en el trópico de Cochabamba, ha sido realizada considerando la radiación solar promedio de la región Primero de Mayo, obtenida de la base de datos de la NASA para el periodo 2001-2020, la cual alcanza un valor medio anual de 4.41 kWh/m²día (Figura 6.)

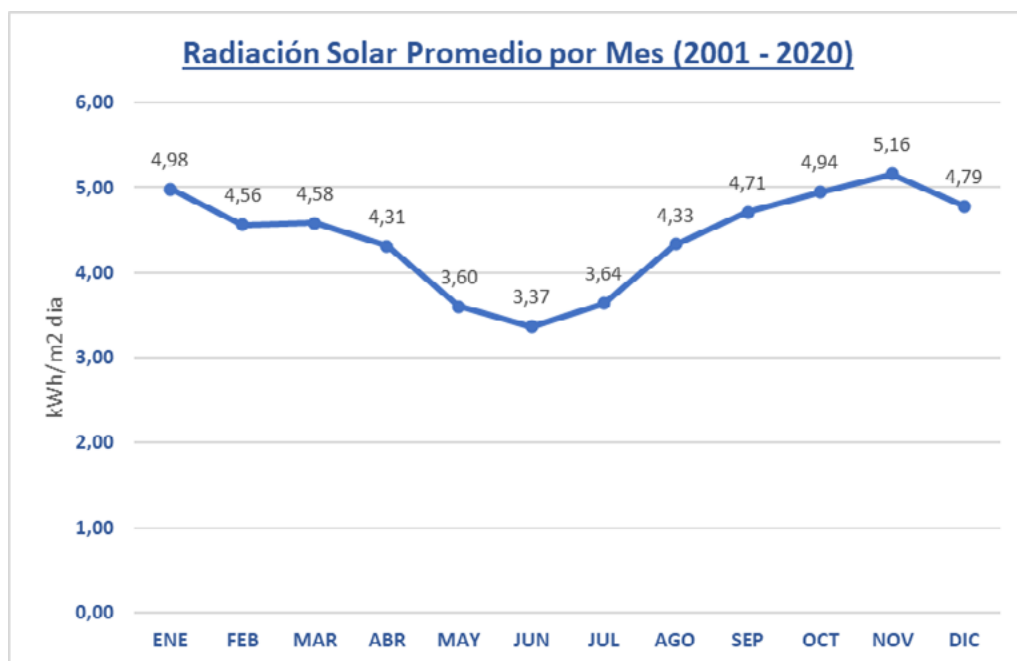


Figura N° 6. Radiación promedio mensual (kWh/m²día) para el periodo de 2001/2020. Fuente: Base de datos NASA 2001 – 2020

Los valores promedios de radiación anual para 20 años, que se muestran en la Figura 7, permiten apreciar el comportamiento regular a lo largo del tiempo de este potencial.

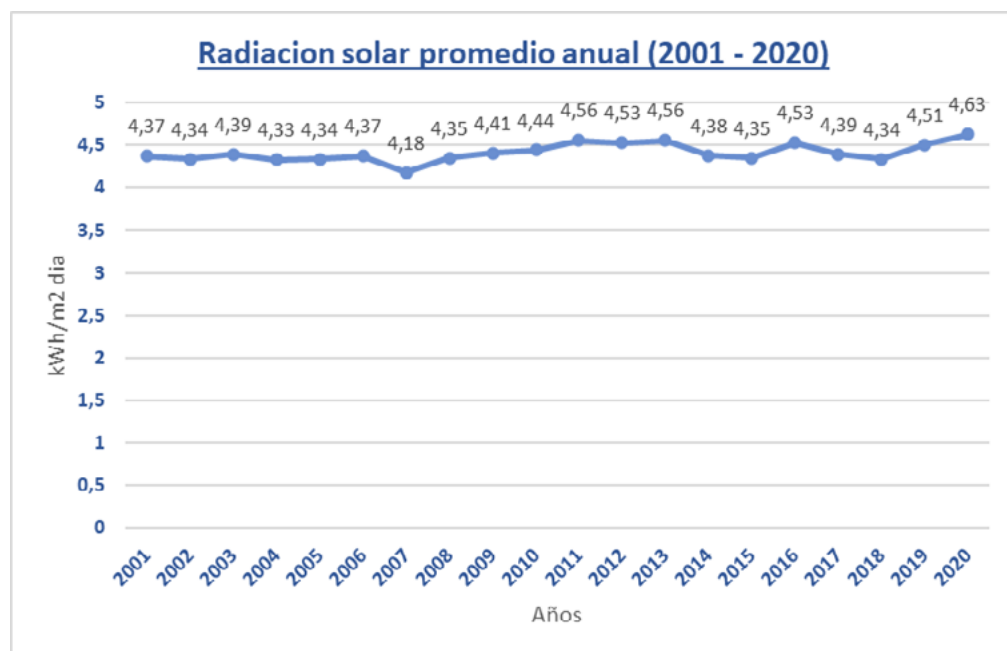


Figura N° 7. Radiación promedio [kWh/m²/día] anual para el periodo de 2001-2020. Fuente: Base de datos NASA 2001 – 2020

En cuanto al sistema de generación distribuida, este debe cumplir con las condiciones técnicas establecidas en el DS 4477 y DS 5167 y las resoluciones de la AETN (2024) que detallan los procedimientos específicos: el registro de empresas instaladoras (AETN N° 376/2024; registro e incorporación de generadores distribuidos a la red (AETN N° 379/2024); retribución de la energía inyectada a la red (AETN N° 380/2024).

Una representación esquemática de un sistema de generación distribuida, se muestra a continuación (Figura 8).

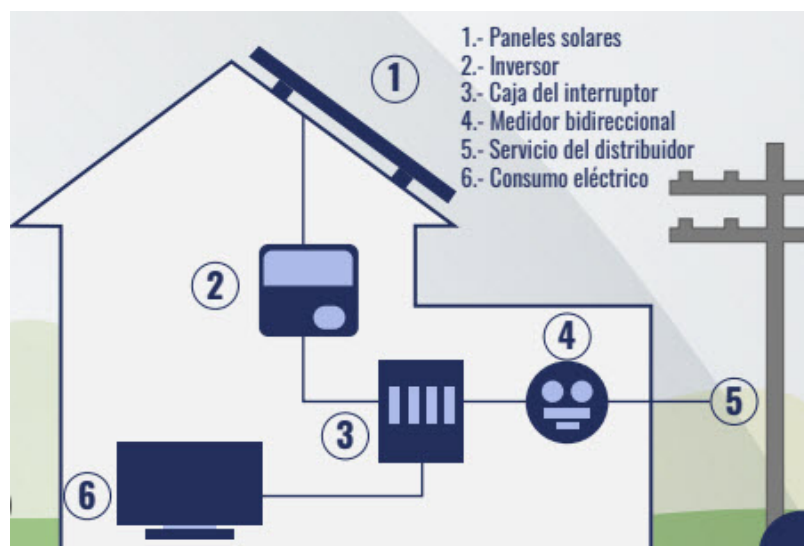


Figura N° 8. Componentes de un sistema de generación distribuida. Fuente: Elaboración propia.

El sistema de GD funcionará en paralelo con la red, priorizando el consumo directo de la energía generada para alimentar las cargas internas. No utiliza baterías. Toda la energía que genera, primero se la consume internamente en los usos que se tengan activados, y si existe un excedente, se lo inyecta a la red. La red eléctrica almacena la energía generada. Cuando no hay sol, la electricidad que se necesita, se la toma de la red. Se debe instalar un medidor bidireccional; este medidor registrará la electricidad que se inyecte a la red, pero también registrará la energía que se retire de la red.

Al final de cada mes la empresa distribuidora realiza la lectura de lo inyectado y lo consumido y, factura solamente por el consumo si hubiese. Pero, si el usuario ha generado más de lo que consumió, este excedente es guardado por la empresa, hasta el próximo mes. De esta manera si un día o varios no se consume la energía que se genere, esta energía estará almacenada en la red eléctrica hasta que la retiremos. De acuerdo al DS 5167, es posible almacenar energía hasta por 2 años.

De los proyectos piloto realizados se ha verificado que un sistema con 2,4 kWp en paneles fotovoltaicos y un inversor de 2 kWn AC, puede prestar el servicio a 14 estanques de 1000 m², oxigenando al menos 2 estanques por día, y cada uno por 3 horas, de acuerdo a la práctica productiva existente que es oxigenar un estanque al menos una vez a la semana.

3.3 Caracterización operativa del sistema

Las motobombas y oxigenadores se utilizan preferentemente en la madrugada, a partir de las 4 am adelante. De esta manera los nuevos equipos eléctricos, deberán trabajar en ese horario. Un sistema fotovoltaico convencional tendría como única opción utilizar baterías, pues en el horario de funcionamiento no existe potencia solar. Sin embargo, al utilizar un sistema GD, la energía en ese horario se tomará de red eléctrica para el funcionamiento de los equipos; más adelante,

durante el día, la energía generada por los paneles fotovoltaicos se inyectará a la red, reponiendo el consumo realizado. En un sentido estricto, quien alimenta a la bomba y oxigenador es la red eléctrica convencional y no el sistema fotovoltaico de GD directamente. El medidor bidireccional que instala la empresa distribuidora se encarga de contabilizar los flujos de ingreso y salida de energía, de manera que lo más importante en el proceso de GD (y en general en energías renovables), es que en el dimensionamiento de los sistemas se realiza por energía demandada, y no por potencia.

En el marco del DS 5167, las instalaciones que se realicen corresponderán a la categoría de Nanogeneración (menor a 10 kW); para esta categoría no se exigen estudios de estabilidad u otros requisitos técnicos de despacho temporal. Por otro lado, la estabilidad de la red y calidad de servicio están regulados por la AETN y el reglamento de calidad de servicio respectivo.

3.4 Variables estandarizadas para un estanque de 1000 m²

Los datos relevados por el proyecto GENERIS en la zona de estudio en el Municipio de Puerto Villarroel, permiten caracterizar el estanque promedio de 1000 m². De esta manera se estima que cada estanque tiene las siguientes variables anuales (Tabla 2).

Tabla N° 2. Variables anuales promedio de un estanque de 1000 m²

Variable	Cantidad / año	Observaciones
Producción de pescado	1000 a 800 kg	Densidad 1 kg/m ² – 0,8 kg/m ²
Consumo de gasolina	171,4 litros	Para uso en motobombas/ oxigenadores
Precio de compra promedio	5,9 Bs/litro	Compra de surtidor y mercado negro
Emisiones en CO ₂	402,9 kg CO ₂ /año	Debido al uso de gasolina
Demanda de electricidad	2114,9 kWh/año	Para sustituir los 171,4 l gasolina
Potencia fotovoltaica por estanque	171 Wp	Potencia FV del SGD promedio/estanque
Inversión promedio por estanque	460,85 USD	Calculado para un estanque de 1000 m ² y que considera la extensión de red interna, el sistema GD y una bomba eléctrica u oxigenador por cada 7 piscinas

Fuente: datos de la Asociación Iero de Mayo – Mariposas – Puerto Villarroel, GENERIS 2024

3.5 Hallazgos en cuanto a rentabilidad

El análisis económico realizado por el proyecto GENERIS-IRDC, que se reporta en el informe: Las Energías Renovables Descentralizadas como oportunidad para enverdecer la cadena de valor piscícola de Bolivia. (Castelao Caruana *et. al.* 20205) para los diferentes estudios de caso, considera los costos de inversión en el equipo de generación distribuida (paneles fotovoltaicos, inversor de red, protecciones, estructuras, accesorios, costo de interconexión con la red y medidor bidireccional); los costos de extensión de redes internas en baja tensión (considerando normativa de electrificación rural, enchufes de fuerza con IP65); costos de una electrobomba 220 V, adaptada para funcionamiento portátil; adicionalmente el transporte y la instalación llave en mano.

Para el análisis de flujos se incluye costos de operación y mantenimiento anuales del sistema en su conjunto y el recambio del inversor el año 13. El principal beneficio es el desplazamiento de la gasolina, que se considera la fuente de repago de la inversión.

El análisis de rentabilidad y sensibilidad muestran los siguientes indicadores, considerando que se compra la totalidad de la gasolina al precio oficial, y también con el precio promedio actual de compra de la gasolina en la región.

Tabla N° 3. Sensibilidad de los indicadores al precio de la gasolina

Indicadores	Precio oficial (0,54 USD/litro)	Situación actual (1,6 el precio oficial) (0,864 USD/litro)
TIR	17%	30%
VAN	26805	74151
B/C	3,1	4,9
PRI	5	3,2

Fuente: GENERIS, Informes de rentabilidad de estudios de caso en piscicultura 2025

La alta rentabilidad en la situación actual muestra la conveniencia de las inversiones, y que el principal factor es el precio del combustible. Una variación de la inversión en un 50% adicional, aún genera una TIR de 19%, un VAN positivo, una relación B/C de 3,7 y un periodo de recuperación de la inversión de 4,9 años.

3.6 Extrapolación al universo identificado con potencial acceso a la red

Tomando en cuenta que cada estanque emite 402,9 kg de CO₂ al año, solamente por consumo de combustibles fósiles para la oxigenación, se podría evitar la emisión de 5856,3 TonCO₂/año correspondiente a los 14.537 estanques que se encuentran a menos de 500 m de la Red, como consecuencia del uso de 2,49 millones de litros anuales de gasolina.

También podría significar la instalación de 2.492,05 kWp de paneles fotovoltaicos (2,49 MW), y en energía eléctrica, considerando la demanda anual de 2.114,91 kWh por estanque, se podría tener una demanda agregada de 30,74 GWh/año.

Los costos de inversión en los proyectos piloto de generación distribuida realizados en la zona por GENERIS (IMMERSIVE, 2024), permiten estimar una inversión promedio por estanque de 1.000 m² de 460,85 USD (¹). Con estos datos iniciales, la inversión que se esperaría movilizar en la región podría alcanzar a 6,70 millones de USD para el universo en consideración (14.537 estanques).

¹ Estos costos consideran los sistemas fotovoltaicos de generación distribuida una bomba eléctrica adaptada, que sirve para oxigenar y bombear agua, la extensión de redes internas en baja tensión en 220 V al borde los estanques, transporte e instalación, registro de proyecto ante la empresa distribuidora.

4. Discusión

El uso de la energía en forma de electricidad representa un elemento importante en el ámbito social, económico y ambiental, sobre todo bajo una perspectiva de transición energética justa; por lo que resulta necesario promover la eficiencia en procesos productivos y crear condiciones óptimas para tener comunidades desarrolladas que puedan basar sus economías en energías limpias y eviten la migración hacia centros urbanos (Rodríguez-Gámez *et al.*, 2018).

La actividad de la piscicultura en el Figura N° 6 trópico de Cochabamba, sobre todo en el Municipio de Puerto Villarroel, ha generado una alta densidad de estanques y un número creciente de pequeños productores; esta situación ofrece un escenario estratégico para la implementación de soluciones de energía limpia y descentralizada. La electrificación de procesos como la oxigenación y el bombeo de agua, mediante sistemas de generación distribuida fotovoltaica conectados a la red, no solo reduce la dependencia de combustibles fósiles, sino que también disminuye la exposición de los productores a la volatilidad del mercado de hidrocarburos y las restricciones en el abastecimiento de gasolina.

Los resultados evidencian que el 83.57% de los estanques se encuentran a menos de 500 m de la red eléctrica, lo que sugiere un altísimo potencial de conexión sin requerir infraestructuras complejas ni inversiones prohibitivas en líneas de media tensión. Esta cifra es especialmente relevante al considerar que la mayor parte de las motobombas funcionan de forma regular para tareas de oxigenación, generando un consumo anual considerable de gasolina y emisiones de CO₂.

La electrificación de los estanques piscícolas, mediante sistemas fotovoltaicos conectados a la red también permitiría avanzar hacia un modelo más resiliente y tecnológicamente moderno, facilitando la automatización parcial de algunos procesos, la implementación de sensores de calidad del agua, o incluso el control remoto de sistemas de oxigenación. Todo ello puede aumentar la productividad, mejorar la calidad del producto final y reducir los costos operativos a mediano plazo.

Este cambio de fuente de energía para el bombeo y oxigenación, permitiría desplazar 2,49 millones de litros anuales de gasolina, los mismo que representan a precios internacional de 1,247 USD/litro (ANH, 2025) poco más de 3,1 millones de USD por año que podrían dejar de importarse.

Por otra parte, si bien el análisis presentado es robusto en términos espaciales, aún queda por incorporar variables complementarias que puedan modular la viabilidad real de los sistemas propuestos. Por ejemplo, la distribución de los estanques en el terreno, la capacidad de inversión de las familias piscicultoras, la disponibilidad de asistencia técnica para el diseño e instalación de sistemas eléctricos, y la confiabilidad del suministro eléctrico en áreas rurales.

Es fundamental considerar la dimensión social y organizacional. Las asociaciones de productores podrían jugar un rol clave para negociar mejores condiciones para acceder a la tecnología, condiciones de financiamiento, y sobre todo, organizando la demanda. Una estrategia de este tipo, debería incorporar estrategias de formación y sensibilización para fortalecer la apropiación tecnológica, y asegurar que la electrificación se implemente con un enfoque inclusivo, sensible al género y a la diversidad de actores productivos.

5. Conclusiones y recomendaciones

El análisis espacial demuestra que la mayoría de los estanques piscícolas del trópico de Cochabamba se encuentran a una distancia viable (≤ 500 m) de la Red Eléctrica para su conexión, abriendo la posibilidad de implementar sistemas de oxigenación eléctrica con energía renovable.

La sustitución de motobombas a gasolina por sistemas eléctricos podría evitar la emisión de aproximadamente 5.856,3 Toneladas de CO₂ al año, representando una contribución concreta a la lucha contra el cambio climático desde el sector productivo rural.

Las inversiones que podrían movilizarse para la implementación de esta tecnología, permiten generar un ahorro directo en la importación de combustibles fósiles. Considerando los precios internacionales de estos combustibles, desde un punto de vista macroeconómico el ahorro anual al país por evitar la importación de 2,49 millones de litros gasolina permitiría recuperar la inversión inicial en aproximadamente en 3,12 años. Los sistemas fotovoltaicos que tienen una vida útil de al menos 20 años continuarán generando beneficios económicos y ambientales.

Esta transición energética representa un beneficio macroeconómico para Bolivia, al reducir la dependencia de importaciones de combustibles y aliviar la presión sobre las reservas internacionales, mejorando la seguridad energética de los productores y del país.

Desde la perspectiva de políticas públicas, la electrificación de la piscicultura en el Trópico de Cochabamba, se puede posicionar como una estrategia prioritaria dentro de los lineamientos de transición energética justa, al tener impactos positivos simultáneos en los ámbitos ambiental, social y económico. Esta medida se alinea con las metas nacionales esbozadas en las NDC (Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra, 2024) de reducción de emisiones, de incremento de la Generación Distribuida y con los principios de seguridad alimentaria sostenible.

Se recomienda que futuras investigaciones incorporen un enfoque integral que considere aspectos como:

- Viabilidad económica de los sistemas de generación distribuida en este campo específico, aplicando criterios de modularidad y escalamiento
- Identificación y gestión con los actores sociales de la región, para encontrar modelos organizativos que faciliten la adopción de la tecnología y su expansión.
- Disponibilidad de financiamiento y esquemas de incentivos, versus las capacidades de pago de los productores locales.
- Riesgos operativos y estabilidad del suministro eléctrico en relación a la generación distribuida.
- Opciones de automatización del proceso, podrían incrementar la productividad

Esta investigación podría ser utilizada como base para la elaboración de programas a mayor escala, que sirvan como modelos replicables en otras regiones tropicales del país.

Finalmente, el estudio integra análisis espacial, técnico y económico demostrando la viabilidad de la electrificación productiva con energía renovable, ofreciendo una metodología replicable en otros sectores rurales.

6. Referencias bibliográficas

Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra (APMT), 2022. *Contribuciones Nacionalmente Determinadas 2022 - 2030*.

Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), 2025. *Precios internacionales 2025*. <https://www.anh.gob.bo/w2019/contenido.php?s=13>

Castelao Caruana M.E., Parma M.E., Sarmiento J., Fernandez Fuentes M. (2025). *Las Energías Renovables Descentralizadas como oportunidad para enverdecer la cadena de valor piscícola de Bolivia*. GENERIS. <https://generis.com.bo/wp-content/uploads/2025/04/Informe-Piscicultura.pdf>

Fernandez, M. H., Morales, M.E.; IV Congreso Brasileiro de Energía Solar y V Conferencia Latino Americana del ISES, 2012; *Costos de generación de electricidad fotovoltaica en Bolivia y barreras para su expansión*.

FAO. (2020). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9229es>

Faunagua. (2024). *Estudio de producción acuícola y prácticas ambientales actuales a partir de una evaluación de imágenes satelitales, informes municipales, y visitas de campo*.

Fernandez Fuentes M. (2025). *Informes de rentabilidad de estudios de caso en piscicultura*. GENERIS

Gaceta Oficial de Bolivia (2023). *DS 4910 de 12 de Abril 2023*.

Gaceta Oficial de Bolivia (2025). *DS 5353 de 19 de Marzo 2025*

Gómez, A. T., Gómez, J. A. D., Rodarte, G. E. V., Baylon, J. S., & León, R. R. arbitrada de divulgación científica de la U. T. de. (2022). *Acuicultura: Seguridad alimentaria y su dependencia energética y tecnológica, casos estados de Colima y Jalisco*. *Reaxion Revista de Divulgación Científica*, 2. <http://reaxion.utleon.edu.mx/Art Impr Acuicultura seguridad alimentaria y su dependencia.html>

IMMERSIVE SRL. (2024). *Proyecto piloto: Oxigenadores para piscicultura*. GENERIS Bolivia.

Rodríguez-Gámez, M., Vázquez-Pérez, A., Vélez-Quiroz, A. M., & Saltos-Arauz, W. M. (2018). Mejora de la calidad de la energía con sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales. *Revista científica*, 33, 265-274. <https://doi.org/10.14483/23448350.13104>