



Vigilada Mineducación

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA CREACIÓN DE UNA GRANJA
AGROVOLTAICA (APV) EN PAZ DE ARIPORO, CASANARE (COLOMBIA)
UTILIZANDO LA METODOLOGÍA ONUDI**

PRE-FEASIBILITY STUDY FOR THE CREATION OF AN AGRIVOLTAIC (APV) FARM
IN PAZ DE ARIPORO, CASANARE (COLOMBIA) USING THE UNIDO
METHODOLOGY

CARLOS HUMBERTO GÓMEZ

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de magíster en
Gerencia de Proyectos

Asesor

Jose Mauricio Tobar Guinand, PhD.

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE ADMINISTRACIÓN
MAESTRÍA EN GERENCIA DE PROYECTOS
BOGOTÁ
2025

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | RESUMEN..... | 9 |
| 2. | ABSTRACT..... | 10 |
| 3. | INTRODUCCIÓN..... | 11 |
| 4. | MARCO DE REFERENCIA Y CONTEXTO GENERAL..... | 13 |
| 4.1 | CONTEXTO GLOBAL..... | 13 |
| 4.1.1 | Interés de los agricultores por la APV en Alemania..... | 13 |
| 4.1.2 | Proyectos APV internacionales..... | 13 |
| 4.2 | CONTEXTO REGIONAL..... | 14 |
| 4.2.1 | Incentivos tributarios en Colombia..... | 15 |
| 4.2.2 | Proyectos APV en Colombia..... | 15 |
| 5 | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 16 |
| 5.1 | NOMBRE DEL PROYECTO..... | 16 |
| 6 | JUSTIFICACIÓN..... | 17 |
| 7 | OBJETIVOS..... | 18 |
| 7.1 | OBJETIVO GENERAL..... | 18 |
| 7.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 18 |
| 8 | POSICIONAMIENTO..... | 19 |
| 8.1 | UNIDAD DE ANÁLISIS Y OBJETO DE ESTUDIO..... | 19 |
| 8.2 | INTERESADOS..... | 19 |
| 9 | MARCO TEÓRICO O CONCEPTUAL..... | 22 |
| 9.1 | CONCEPTO DE ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA UN PROYECTO APV..... | 22 |
| 9.2 | MARCO ESTRATÉGICO Y SECTORIAL DE UN PROYECTO APV..... | 23 |
| 9.3 | COMPONENTE DE MERCADO PARA UN PROYECTO APV..... | 24 |
| 9.4 | COMPONENTE TÉCNICO PARA UN PROYECTO APV..... | 26 |
| 9.5 | ASPECTO AMBIENTAL..... | 28 |
| 9.6 | MARCO LEGAL PARA UN PROYECTO APV EN COLOMBIA..... | 29 |
| 9.7 | COMPONENTE FINANCIERO UN PROYECTO APV..... | 31 |
| 10. | ESTUDIO SECTORIAL Y ESTRATÉGICO..... | 33 |
| 10.1 | MACROENTORNO..... | 33 |

| | | |
|--------|---|----|
| 10.1.1 | Político | 33 |
| 10.1.2 | Económico | 34 |
| 10.1.3 | Social | 37 |
| 10.1.4 | Tecnológico..... | 38 |
| 10.1.5 | Ecológico | 40 |
| 10.1.6 | Legal | 40 |
| 10.2 | MICROENTORNO..... | 41 |
| 11.1.2 | 10.2.1 Ubicación y características del terreno..... | 41 |
| 10.2.2 | Infraestructura y recursos disponibles..... | 42 |
| 10.2.3 | Proveedores para la granja fotovoltaica y la actividad ganadera de la finca 42 | |
| 10.2.4 | Competencia y proyectos similares..... | 43 |
| 10.2.5 | Comunidad y factores sociales | 43 |
| 10.2.6 | Regulaciones locales y permisos | 44 |
| 10.3 | SECTOR Y SUBSECTOR | 44 |
| 11.1.3 | 10.3.1 Sector..... | 44 |
| 10.3.2 | Subsector..... | 44 |
| 10.3.3 | NÚCLEO | 44 |
| 10.4 | ANÁLISIS ESTRATÉGICO..... | 45 |
| 10.4.1 | Fortalezas (F)..... | 45 |
| 11.1.4 | 10.4.2 Oportunidades (O) | 46 |
| 11.1.5 | 10.4.3 Debilidades (D) | 46 |
| 10.4.4 | Amenazas (A) | 47 |
| 10.4.5 | Matriz DOFA | 47 |
| 10.4.6 | Desarrollo estratégico | 48 |
| 11. | ESTUDIO DE MERCADO | 50 |
| 11.1 | PRODUCTO O SERVICIO | 50 |
| 11.1.6 | 11.1.1 Descripción del producto o servicio y su valor agregado | 50 |
| 11.1.7 | Necesidad que se quiere solucionar | 50 |
| 11.1.8 | Perfil del consumidor y segmentos estratégicos | 50 |
| 11.1.9 | Posible diversificación..... | 51 |

| | | |
|--------|--|----|
| 11.2 | DEMANDA..... | 51 |
| 11.2.2 | 11.2.1 Demanda de energía eléctrica | 51 |
| 11.2.3 | Demanda de ganadería y agricultura | 52 |
| 11.3 | OFERTA..... | 52 |
| 11.4 | COMPETENCIA | 52 |
| 11.5 | CUOTAS DE MERCADO | 53 |
| 11.6 | PRECIO..... | 53 |
| 11.7 | TENDENCIAS DEL ENTORNO..... | 54 |
| 11.8 | PRESUPUESTO DE INGRESOS | 54 |
| 11.8.1 | Ingreso Anual por Venta de Energía (IAVE) | 54 |
| 11.8.2 | Ingreso Anual por Venta de Ganado (IAVG)..... | 54 |
| 11.8.3 | Ingreso Anual Granja APV (IGAPV)..... | 55 |
| 12. | ESTUDIO TÉCNICO..... | 56 |
| 12.1 | ANÁLISIS DE LA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA | 56 |
| 12.1.1 | Macrolocalización del proyecto | 56 |
| 12.1.2 | Microlocalización del proyecto | 56 |
| 12.2 | TAMAÑO DE LA GRANJA APV | 57 |
| 12.3 | CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA | 57 |
| 12.4 | HORIZONTE DE TIEMPO DEL PROYECTO..... | 59 |
| 12.5 | INGENIERÍA DEL PROYECTO..... | 60 |
| 12.6 | CÁLCULOS TÉCNICOS PARA LA GENERACIÓN SOLAR..... | 60 |
| 12.6.1 | Cantidad de paneles solares..... | 60 |
| 12.6.2 | Cantidad de inversores | 61 |
| 12.6.3 | Disposición de los inversores..... | 61 |
| 12.6.4 | Altura de la estructura | 61 |
| 12.6.5 | Tipo de estructura | 62 |
| 12.6.6 | Cantidad de terreno necesario | 62 |
| 12.6.7 | Cálculo del transformador para 0,99 MW solar | 62 |
| 12.6.8 | Cálculo del conductor aéreo para la red trifásica: | 63 |
| 12.7 | PRESUPUESTO DE INVERSIONES | 64 |
| 12.7.1 | Presupuesto estimado del proyecto APV (Capex) | 64 |

| | |
|--|----|
| 12.7.2 Presupuesto anual de operación APV (Opex) | 65 |
| 12.7.3 Presupuesto anual para gasto en ganadería | 66 |
| 13. ESTUDIO AMBIENTAL | 67 |
| 13.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO..... | 67 |
| 13.2 TRÁMITE ANTE AUTORIDAD AMBIENTAL:..... | 67 |
| 13.3 CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL BÁSICA..... | 68 |
| 13.4 IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES | 68 |
| 13.5 PLAN DE MANEJO AMBIENTAL (PMA)..... | 69 |
| 13.6 PLAN DE CONTINGENCIA..... | 69 |
| 13.7 CIERRE Y DESMONTAJE | 69 |
| 14. ESTUDIO ORGANIZACIONAL Y LEGAL..... | 70 |
| 14.1 TIPO DE ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO..... | 70 |
| 14.2 ORGANIGRAMA | 70 |
| 14.3 MANEJO DE CONTRATOS | 71 |
| 14.4 REQUERIMIENTOS LEGALES..... | 72 |
| 15. ESTUDIO ECONÓMICO | 74 |
| 15.1 PRESUPUESTO DE INVERSIONES | 74 |
| 15.1.1 Inversiones fijas | 74 |
| 15.2 INVERSIONES DIFERIDAS | 74 |
| 15.3 CAPITAL DE TRABAJO | 74 |
| 15.4 PRESUPUESTO DE COSTOS DE OPERACIÓN..... | 74 |
| 15.4.1 Costos de operación | 74 |
| 15.4.2 Costos por depreciación y amortización | 75 |
| 15.4.3 Costos financieros..... | 75 |
| 15.5 PRESUPUESTO DE INGRESOS..... | 75 |
| 15.6 CONSTRUCCIÓN DE LOS FLUJOS DE CAJA | 76 |
| 15.7 EVALUACIÓN FINANCIERA..... | 77 |
| 16. ANÁLISIS DE RIESGO Y SENSIBILIDAD..... | 79 |
| 16.1 ANÁLISIS PESTEL DEL PROYECTO GRANJA APV | 79 |
| 16.2 MATRIZ DE IMPACTO DEL PROYECTO GRANJA APV | 80 |
| 16.3 MAPA DE RIESGO DEL PROYECTO GRANJA APV | 81 |

| | |
|--|----|
| 16.4 ACCIONES DE MITIGACIÓN DE RIESGOS | 81 |
| 16.4.1.1 Político | 81 |
| 16.4.1.2 Económico | 82 |
| 16.4.1.3 Social | 82 |
| 16.4.1.4 Técnico | 82 |
| 16.4.1.5 Ecológico/Ambiental..... | 82 |
| 16.4.1.6 Legal | 83 |
| 17. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 84 |
| 17.1. CONCLUSIONES..... | 84 |
| 17.2 RECOMENDACIONES | 85 |
| 18. REFERENCIAS | 86 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Informe IRENA Crecimiento de la energía solar..... | 38 |
| Tabla 2. Porcentajes por tecnología Informe XM 12 de enero de 2025..... | 38 |
| Tabla 3. Tabla de generación promedio mensual SOLARGIS, 2025 | 58 |
| Tabla 4. Presupuesto estimado costo directo APV (Capex) (COP)..... | 65 |
| Tabla 5. Presupuesto estimado costo directo APV (Capex) (COP)..... | 65 |
| Tabla 6. Tabla de presupuesto mantenimiento APV (Opex) (COP) | 66 |
| Tabla 7. Tabla de presupuesto anual para gasto en ganadería (COP)..... | 66 |
| Tabla 8. Tabla de identificación de impactos ambientales | 68 |
| Tabla 9. Tabla matriz de impacto del proyecto granja APV | 77 |
| Tabla 10. Tabla de análisis PESTEL del proyecto granja APV | 79 |
| Tabla 11. Tabla matriz de impacto del proyecto granja APV | 80 |

LISTA DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| Ilustración 1. Evolución de empleo global energías renovables por tecnología. IRENA 2023..... | 37 |
| Ilustración 2. Perfil horario promedio de irradiación Wh/m ² SOLARGIS, 2025..... | 59 |
| Ilustración 3. Organigrama ejecución proyecto de generación solar..... | 70 |
| Ilustración 4. Operación granja APV..... | 71 |
| Ilustración 5. Mapa de riesgo proyecto granja APV..... | 81 |

1. RESUMEN

Este estudio de prefactibilidad evalúa la viabilidad de construir y operar una granja agrovoltaica (APV) en la finca Las Delicias, ubicada en la vereda La Peral, municipio de Paz de Ariporo, Casanare (Colombia). El proyecto plantea una capacidad de generación de 0,99 MW a partir de energía solar, lo cual permite la producción de electricidad limpia y el aprovechamiento del suelo para actividades agrícolas bajo los paneles solares. La viabilidad del proyecto depende de un análisis detallado de factores regulatorios, económicos y tecnológicos, así como de su alineación con las necesidades energéticas y ambientales de la región. Para ello, se examinan tanto factores externos como internos que pueden influir en su implementación, considerando la transición energética global, el cambio climático, el marco regulatorio colombiano y el potencial solar del área. Además, se emplea la metodología de la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONU DI) para estructurar el estudio y garantizar una evaluación rigurosa y metodológicamente sólida.

Palabras clave: agrovoltaica, estudio de prefactibilidad, energía solar, transición energética, viabilidad técnica y económica, desarrollo sostenible, Casanare, ONU DI, cambio climático, Colombia.

2. ABSTRACT

This pre-feasibility study evaluates the viability of constructing and operating an agrivoltaic (APV) farm at Las Delicias, located in the village of La Peral, municipality of Paz de Ariporo, Casanare (Colombia). The project proposes a generation capacity of 0,99 MW from solar energy, enabling the production of clean electricity and the simultaneous use of land for agricultural activities beneath the solar panels. The project's viability depends on a detailed analysis of regulatory, economic, and technological factors, as well as its alignment with the region's energy and environmental needs. To this end, both external and internal factors that may influence its implementation are examined, considering the global energy transition, climate change, the Colombian regulatory framework, and the area's solar potential. Furthermore, the methodology of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) is used to structure the study and ensure a rigorous and methodologically sound evaluation.

Keywords: agrivoltaics, pre-feasibility study, solar energy, energy transition, technical and economic viability, sustainable development, Casanare, UNIDO, climate change, Colombia.

3. INTRODUCCIÓN

El cambio climático y el calentamiento global han impulsado la transición hacia fuentes de energía renovable en diversos países, aunque con enfoques divergentes. La decisión de Estados Unidos de retirarse del Acuerdo de París está generando incertidumbre sobre el compromiso global con la descarbonización, mientras que la crisis energética en Europa ha llevado a países como Alemania a reconsiderar la generación nuclear para garantizar el suministro. En la India, la migración de campesinos hacia centros urbanos ha generado una problemática de seguridad alimentaria debido al arriendo masivo de tierras para proyectos solares convencionales, lo cual evidencia la necesidad de soluciones energéticas sostenibles que no comprometan la producción de alimentos.

En este contexto, las granjas agrovoltaica (APV) surgen como una alternativa innovadora, que permiten la coexistencia de producción agropecuaria y generación de energía fotovoltaica. A diferencia de los parques solares convencionales, las APV maximizan el uso del suelo, mejoran la eficiencia hídrica y favorecen la biodiversidad. Colombia, alineada con su política de transición energética, ha establecido incentivos tributarios para la generación con fuentes renovables no convencionales (FRNC), lo cual representa una oportunidad para la implementación de estos sistemas en regiones con alto potencial solar, como Casanare.

En consecuencia, el presente estudio evalúa la prefactibilidad de una granja APV de 0,99 MW en una finca ganadera en el municipio de Paz de Ariporo, Casanare, una región caracterizada por su alta incidencia solar y sus condiciones edafoclimáticas propicias para la integración de actividades agropecuarias y energéticas. El interés del propietario del predio en diversificar su producción, así como la posibilidad de acceder a diversas fuentes de financiación, refuerzan la viabilidad del proyecto. Además, se considera el impacto ambiental positivo que esta iniciativa podría tener al reducir las emisiones de CO₂ asociadas a la ganadería y a la generación de energía eléctrica con combustibles fósiles, al contribuir a la mitigación del cambio climático y al fortalecimiento de la matriz energética nacional.

No obstante, en algunas regiones del país, los operadores de red no tienen preparados sus sistemas para recibir energía distribuida de generación de nuevos proyectos renovables, los pequeños y medianos productores agrícolas tienen dificultades para acceder a créditos para invertir en energías limpias, la inversión en tecnología fotovoltaica es elevada y, aunque Colombia ha avanzado normativamente para impulsar la inversión en energías renovables, no hay un marco legal claro para la implementación de los sistemas APV que integran la producción agrícola con la generación de energía solar.

4. MARCO DE REFERENCIA Y CONTEXTO GENERAL

4.1 CONTEXTO GLOBAL

La creación de la granja APV en Paz de Ariporo se enmarca en el contexto global de transición energética, sostenibilidad ambiental y optimización del uso del suelo. A nivel nacional, se alinea con los objetivos de diversificación de la matriz energética, la promoción de energías renovables y el desarrollo agrario sostenible.

4.1.1 Interés de los agricultores por la APV en Alemania

En febrero de 2023, el Instituto Fraunhofer de Sistemas de Energía Solar (Fraunhofer ISE) y la Universidad de Göttingen realizaron un estudio con el fin de analizar la disposición de los agricultores a integrar la APV en sus operaciones, para lo cual aplicaron una encuesta virtual a 214 agricultores alemanes, de los cuales, el 72,4 % de los encuestados mostró interés frente a los proyectos APV y les interesó integrarlos en sus operaciones. Los aspectos más relevantes de interés de acuerdo con el estudio son los ingresos adicionales que podrían percibir por la generación de electricidad con energía renovable solar y el desarrollo sostenible de las actividades agrarias (Fraunhofer ISE, 2023).

4.1.2 Proyectos APV internacionales

Al año 2021, varios países habían implementado granjas APV de investigación y explotación industrial, alcanzado 14 GWp de capacidad instalada. En Asia, la de mayor capacidad la tiene China, con una granja APV de 700 MWp, en la cual se cultivan bayas bajo los paneles de captación solar; Japón cuenta con más de 3000 granjas APV y Corea del Sur planea implementar 100.000 sistemas de granjas APV, en respuesta al éxodo rural que están ocasionando los sistemas convencionales de generación fotovoltaica que requieren el uso exclusivo del suelo (Trommsdorff et al., 2022).

En Europa, Alemania tiene una de las granjas APV de mayor capacidad con un sistema de paneles verticales de 4,1 MWp dedicada al cultivo de heno (Enkhardt et al., 2020). Francia está implementando sistemas de granjas APV en viñedos y frutales (Sun'Agri, 2025). En la India, el estudio del Indo-German Energy Forum (IGEF) documentó sistemas granjas APV con potencia instalada de hasta 7 MWp (Rahman et al., 2023).

En Suramérica, Chile realizó las primeras investigaciones en la Universidad de O'Higgins, la Universidad de Chile y Fraunhofer Chile Research a partir del año 2017 con tecnología APV. En el 2024, la Universidad Adventista de Chile puso en operación un piloto en una granja APV de producción de cerezos. Uno de los proyectos comerciales de gran envergadura lo desarrolló y construyó la empresa O'Energy con el proyecto Ayla Solar, con capacidad total de 9 MWp, cerca de la ciudad Rancagua por valor de USD 12 millones (O'Energy, 2023).

Según la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), la capacidad total fotovoltaica instalada a nivel mundial es de 1.470 GW (IRENA, 2024), de los cuales sólo 20 GW provienen de las granjas APV (Fraunhofer ISE, 2023).

4.2 CONTEXTO REGIONAL

El estudio se enmarca en la necesidad de diversificar la matriz energética del municipio de Paz de Aripuro, Casanare, mediante la implementación de tecnologías de generación de energía limpia. Además, responde a la tendencia global de APV, que busca maximizar la eficiencia del suelo combinando producción agrícola y generación de energía renovable.

En términos regionales, el proyecto se desarrolla en una zona rural con potencial solar elevado, lo cual lo hace idóneo para la instalación de paneles fotovoltaicos. A nivel de política energética, está alineado con las estrategias nacionales para la transición energética y la reducción de la huella de carbono.

4.2.1 Incentivos tributarios en Colombia

El gobierno colombiano, a través del artículo 174 de la Ley 1955 de 2019, permitió a las personas naturales o jurídicas obligadas a declarar renta, deducir de su renta en un plazo no mayor a 15 años el cincuenta 50 % del total de la inversión realizada para la generación de energía eléctrica con fuentes no convencionales de energía (FNCE) que hayan sido certificadas por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) como proyecto de generación una vez el sistema comience a operar. Además, exoneró del pago del impuesto al valor agregado (IVA) a los componentes de un sistema solar como el inversor de energía para sistema de energía solar con paneles, paneles solares y controlador de carga para sistema de energía solar con paneles.

4.2.2 Proyectos APV en Colombia

De acuerdo con un informe de PV Magazine (2024), en Colombia se están realizando estudios de viabilidad de proyectos de granjas APV para una capacidad instalada de 0,99 MW en Mompos (Bolívar) y en La Paz (Santander), y se comenzará a sembrar melón bajo paneles solares en un sistema que está generando energía eléctrica limpia ubicado en San Diego (Cesar).

También hay iniciativas de sistemas APV en Casanare: la Alcaldía del municipio de Aguazul publicó en junio de 2024 una licitación pública por una cuantía de COP 394.751.030 para llevar a cabo estudios de prefactibilidad para evaluar la viabilidad de sistemas APV en la región (Municipio de Aguazul, 2024).

5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se estima que menos del 2 % de la capacidad fotovoltaica a nivel mundial proviene de las granjas APV, y varios estudios comienzan a mostrar el impacto del uso exclusivo de terrenos fértiles para generación de energía eléctrica, puesto que los propietarios alquilan grandes extensiones de tierra que cambian el uso del suelo. Así, se plantea la hipótesis de inseguridad alimentaria vs. generación de energía eléctrica limpia. Este estudio de prefactibilidad nace del interés de un propietario de invertir en un proyecto fotovoltaico para aprovechar los incentivos tributarios y la posibilidad de establecer un contrato a largo plazo con el operador local de red para la venta de energía eléctrica limpia, sin perder la posibilidad de usar el terreno bajo los paneles solares para las actividades agropecuarias que desarrolla actualmente en el predio.

5.1 NOMBRE DEL PROYECTO

Estudio de prefactibilidad para la creación de una granja agrovoltaica (APV) en la finca Las Delicias, ubicada en la vereda La Peral, municipio de Paz de Ariporo, Casanare (Colombia), utilizando la metodología ONUDI (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial).

6 JUSTIFICACIÓN

Aspectos como la política de transición energética del gobierno colombiano, el crecimiento proyectado de energía fotovoltaica en el país, los incentivos fiscales por la construcción de parques fotovoltaicos, las condiciones favorables de energía solar en Casanare, la optimización del uso del suelo, el posible aumento de la rentabilidad de la hacienda y el interés del propietario del predio permiten presentar la propuesta de elaborar el estudio de prefactibilidad para la creación de una granja APV para evaluar su viabilidad.

7 OBJETIVOS

7.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar un estudio de prefactibilidad para la creación de una granja APV en la finca Las Delicias, ubicada en la vereda La Peral, municipio de Paz de Ariporo, Casanare, utilizando la metodología ONUDI para evaluar la viabilidad del proyecto.

7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El estudio de prefactibilidad de la granja APV se estructura bajo la metodología de la ONUDI, contemplando seis análisis clave:

- Estudio sectorial y estratégico: examinar los factores del entorno macro y microeconómico, realizando un análisis DOFA para establecer una estrategia integral del proyecto.
- Estudio de mercado: evaluar la demanda local de energía, la viabilidad de vender excedentes al operador de red y la certificación ante la UPME para acceder a beneficios tributarios en el marco de la transición energética.
- Estudio técnico: evaluar la factibilidad técnica considerando aspectos como radiación solar, características del terreno, tipo de tecnología solar y actividad agropecuaria.
- Estudio ambiental: analizar los posibles impactos ambientales, la biodiversidad afectada, los requisitos legales y proponer medidas de mitigación y sostenibilidad.
- Estudio legal: revisar el marco jurídico aplicable, los permisos y trámites necesarios en temas de energías renovables, uso del suelo y regulaciones ambientales y agropecuarias.
- Estudio económico y financiero: estimar los costos del proyecto, analizar fuentes de financiación, los incentivos fiscales, y calcular indicadores financieros.

8 POSICIONAMIENTO

Según Hernández et al. (2006), “así como un estudio cuantitativo se basa en otros previos, el estudio cualitativo se fundamenta en sí mismo” (p. 604). Esta investigación es de tipo cuantitativo porque se basa en estudios previos que se han desarrollado para implementar proyectos de granjas APV.

8.1 UNIDAD DE ANÁLISIS Y OBJETO DE ESTUDIO

- Unidad de análisis: finca en Casanare, incluyendo su capacidad para integrar un sistema APV.
- Objeto de estudio: viabilidad del proyecto de la creación de una granja APV en una finca ganadera en el municipio de Paz de Ariporo, Casanare.
- Clasificación del estudio: este estudio de prefactibilidad se clasifica dentro de los estudios técnicos y económicos para proyectos de energías renovables y desarrollo APV. Se encuentra en la fase preliminar de análisis para determinar la viabilidad técnica, ambiental, financiera y operativa de la implementación de una granja APV. Desde un enfoque sectorial, el estudio puede enmarcarse de la siguiente manera:
 - Energías renovables: evaluación de la generación de energía solar fotovoltaica como fuente no convencional.
 - APV: análisis del uso dual del suelo para la producción de energía y actividades agrícolas.
 - Desarrollo rural sostenible: optimización del uso del territorio para mejorar la productividad y sostenibilidad del agro en la región.

8.2 INTERESADOS

- Propietarios de la finca Las Delicias: tienen interés en la rentabilidad del proyecto y la optimización del uso del suelo.

- Inversionistas privados: empresas o individuos que financian la instalación del sistema APV y esperan un retorno de inversión.
- Entidades del sector energético: la UPME evalúa la viabilidad de conexión a la red y apoya el desarrollo de energías renovables en Colombia. XM (operador del mercado eléctrico colombiano) regula la inyección de energía a la red y la comercialización de la electricidad generada. ENERCA S.A. E.S.P. es el posible comprador de la energía eléctrica generada por la granja APV.
- Sector agrícola y ganadero: los productores agropecuarios locales pueden beneficiarse de mejores condiciones de producción bajo la sombra de los paneles solares; las cooperativas agropecuarias pueden participar en la producción y comercialización de cultivos generados bajo el sistema APV; y los ganaderos de la región podrían estar interesados en sistemas de pastoreo bajo paneles solares que mejoren la productividad del suelo.
- Gobierno de Colombia y entidades reguladoras: la Alcaldía de Paz de Ariporo y la Gobernación de Casanare pueden promover el proyecto dentro de sus planes de desarrollo sostenible. El Ministerio de Minas y Energía es el responsable de las políticas energéticas y fomento de energías renovables en Colombia. La ANLA (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales) requiere estudios de impacto ambiental y otorga permisos ambientales. Por último, el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) proporciona información climática relevante para la evaluación del recurso solar.
- Comunidades locales y sociedad civil: los habitantes de la vereda La Peral pueden beneficiarse de empleo, infraestructura y acceso a energía más limpia. ONG ambientales podrían estar interesadas en el impacto ecológico positivo del proyecto. Por último, universidades y centros de investigación pueden desarrollar estudios sobre la APV en la región y optimizar su implementación.
- Empresas y proveedores tecnológicos: algunos proveedores tienen la capacidad de suministrar la tecnología necesaria para la implementación del sistema. También conviene destacar las empresas de instalación y mantenimiento como expertos en el montaje y operación del sistema APV; y las entidades financieras y

bancos, que pueden ofrecer financiamiento, créditos verdes o incentivos para la inversión en energías renovables.

9 MARCO TEÓRICO O CONCEPTUAL

9.1 CONCEPTO DE ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA UN PROYECTO APV

Un estudio de prefactibilidad constituye una evaluación preliminar, pero detallada, que tiene como objetivo determinar si un proyecto en etapa temprana posee las condiciones necesarias para ser desarrollado. Este tipo de análisis reduce la incertidumbre y el riesgo de inversión, ya que entrega información técnica, económica, legal y ambiental que permite tomar decisiones estratégicas informadas. A partir de sus resultados, se establece si es recomendable avanzar hacia una fase de factibilidad completa o si conviene descartar la iniciativa (ONUUDI, 2010).

La metodología de prefactibilidad propuesta por la ONUUDI ha sido ampliamente implementada en América Latina, especialmente en proyectos industriales, agroenergéticos y de desarrollo sostenible. Esta metodología estructura el análisis del proyecto en componentes específicos que abarcan desde la tecnología requerida hasta las condiciones del entorno, lo cual brinda una evaluación integral de la viabilidad del proyecto.

En el contexto del uso sostenible del territorio, la APV surge como una estrategia innovadora que combina la producción agrícola con la generación de energía solar fotovoltaica sobre una misma superficie. Este concepto fue introducido en 1981 por los investigadores Adolf Goetzberger y Armin Zastrow, del ISE, como una alternativa para enfrentar de forma simultánea el cambio climático y la inseguridad alimentaria (Fraunhofer ISE, 2023).

El modelo APV promueve un uso más eficiente del suelo, particularmente relevante en regiones con alta radiación solar como el municipio de Paz de Ariporo, Casanare, ubicada en los Llanos Orientales de Colombia. Según Dupraz et al. (2011), la instalación de paneles solares sobre cultivos puede incluso mejorar el rendimiento agrícola en determinadas condiciones, gracias a la sombra parcial que disminuye la

evapotranspiración, reduce el estrés térmico y favorece la creación de un microclima más estable para las plantas.

Investigaciones posteriores han demostrado que es factible cultivar forrajes, tubérculos, frutales y cereales bajo estructuras fotovoltaicas sin afectar la productividad. Este enfoque es particularmente útil en climas cálidos y secos, como los de la región de Casanare, donde la gestión del agua es un factor crítico. Además, se ha documentado que el ganado puede beneficiarse del confort térmico proporcionado por los paneles, lo cual se traduce en mejores condiciones de bienestar animal (Barron-Gafford et al., 2019; Marrou et al., 2013).

La integración de sistemas APV también permite prácticas agrícolas sostenibles como el uso rotacional de cultivos y pasturas, la implementación de sistemas silvopastoriles, y una gestión hídrica más eficiente, lo cual contribuye a una mayor resiliencia climática y a la sostenibilidad en el uso del suelo.

9.2 MARCO ESTRATÉGICO Y SECTORIAL DE UN PROYECTO APV

El componente estratégico de un estudio de prefactibilidad permite ubicar el proyecto dentro del marco de desarrollo regional, nacional y sectorial, alineándolo con los objetivos de sostenibilidad y transición energética. En el caso de Colombia, un proyecto APV como el propuesto en Paz de Ariporo, Casanare, debe integrarse con políticas nacionales como la Ley 1715 de 2014 sobre energías renovables, el Plan Energético Nacional (UPME), y la Estrategia Nacional de Cambio Climático. Asimismo, este tipo de iniciativas contribuyen a metas globales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y los compromisos climáticos establecidos en el Acuerdo de París. Factores como la estabilidad institucional, los incentivos para energías limpias y la presencia de zonas con alta irradiación solar como los Llanos Orientales fortalecen la viabilidad del proyecto (González & Calderón, 2022).

El estudio sectorial evalúa la dinámica del sector agropecuario y energético, y Colombia ha mostrado avances en ambos sectores: por un lado, el departamento de Casanare es un importante productor agrícola y ganadero; por otro, el país ha impulsado la diversificación de su matriz energética a través del fomento de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), especialmente solar y eólica. En este contexto, los proyectos APV ofrecen una solución sinérgica que permite mantener la productividad del suelo agrícola mientras se genera energía limpia, lo cual cobra relevancia en zonas de alta exposición solar como Paz de Ariporo.

A nivel internacional, Colombia firmó el Acuerdo de París en 2015, comprometiéndose a limitar el aumento de la temperatura global por debajo de los 2 °C. Esto se tradujo en políticas nacionales como las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC), donde el país asumió la meta de reducir en un 51 % sus emisiones de gases de efecto invernadero al año 2030 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020). Sin embargo, eventos recientes, como el retiro de Estados Unidos del Acuerdo en 2025, generaron incertidumbre global sobre el cumplimiento colectivo de los objetivos climáticos, dada su relevancia como emisor histórico de carbono (Human Rights Watch, 2025). Adicionalmente, la crisis energética en Europa, provocada por la reducción del suministro de gas ruso, evidenció la fragilidad de los sistemas energéticos dependientes de fuentes fósiles. Este evento también resaltó la urgencia de fortalecer las infraestructuras renovables como parte de la resiliencia energética a largo plazo (IRENA, 2022).

Pese a estos desafíos, Colombia ha mantenido su compromiso con la transición energética y ha consolidado su posición como referente regional en energías limpias, lo cual refuerza el entorno favorable para proyectos como la granja APV propuesto en Casanare.

9.3 COMPONENTE DE MERCADO PARA UN PROYECTO APV

El estudio de mercado es un componente esencial en la evaluación de prefactibilidad, ya que permite identificar la existencia y las características de la demanda potencial, determinar el tamaño del mercado, establecer la segmentación de clientes y analizar la oferta actual de bienes o servicios asociados al proyecto. Este análisis también contempla variables clave como el comportamiento de los precios, los canales de distribución, las barreras comerciales y la disponibilidad de productos sustitutos. Su objetivo es prever con precisión las condiciones de colocación de los bienes y servicios generados, tales como energía eléctrica, productos agrícolas o servicios ecosistémicos (Kotler & Keller, 2021).

En el caso específico de los proyectos APV, el mercado está compuesto por múltiples segmentos: usuarios del servicio eléctrico (residencial, comercial o industrial), consumidores de productos agrícolas y potenciales compradores de servicios ambientales (como bonos de carbono o certificaciones sostenibles). El desarrollo de estos sistemas permite aprovechar el mismo terreno para la producción simultánea de energía solar y alimentos, generando una oferta diversificada que puede adaptarse a las condiciones del mercado regional y nacional.

La tecnología fotovoltaica se basa en la conversión directa de la luz solar en electricidad mediante celdas elaboradas con materiales semiconductores, principalmente silicio. En la última década, esta tecnología ha experimentado una reducción significativa de costos, lo cual ha impulsado su adopción tanto en países desarrollados como en economías emergentes. Precisamente, el crecimiento sostenido de las energías renovables a nivel global ha creado oportunidades para la inversión y comercialización de energía limpia en diversos mercados, incentivando modelos productivos sostenibles como los APV (IRENA, 2021).

El departamento de Casanare, y en particular el municipio de Paz de Ariporo, ofrece condiciones favorables para la implementación de sistemas APV. Tradicionalmente, la economía local ha estado centrada en ganadería extensiva, cultivos transitorios y producción petrolera, pero en los últimos años ha comenzado un proceso de

diversificación energética y productiva. La región cuenta con altos niveles de radiación solar (superiores a 5,5 kWh/m²/día) y amplias extensiones de tierras fértiles, lo cual permite compatibilizar la generación eléctrica con la producción agrícola o pecuaria.

La instalación de sistemas fotovoltaicos elevados puede beneficiar directamente la productividad agropecuaria, al reducir la evaporación del agua, proporcionar sombra al ganado y mejorar las condiciones micro climáticas para los cultivos. Estudios recientes han demostrado que cultivos como forrajes, tubérculos, frutales y pastos pueden crecer adecuadamente bajo condiciones de sombra parcial generadas por los paneles solares (Barron-Gafford et al., 2019). Además, el país ha comenzado a implementar proyectos solares como la planta fotovoltaica de Yopal (3,5 MWp), que evidencia el creciente interés en energías limpias por parte del sector público y privado (UPME, 2022).

Pese a estas condiciones favorables, los proyectos agrovoltaicos en Casanare se encuentran aún en una fase incipiente. Por lo tanto, existe una oportunidad de insertarse tempranamente en el mercado, aprovechar incentivos disponibles y consolidar un modelo replicable en otras zonas rurales con características agroclimáticas similares.

9.4 COMPONENTE TÉCNICO PARA UN PROYECTO APV

El análisis técnico comprende el estudio detallado de los elementos relacionados con el proceso productivo, la tecnología requerida, la infraestructura necesaria, la ubicación del proyecto, así como la disponibilidad de insumos, mano de obra y las condiciones físicas y ambientales del sitio. En esta etapa se realiza una estimación preliminar de los costos asociados a la adquisición de equipos, el diseño del sistema, las obras civiles y la logística de operación y mantenimiento. Asimismo, se consideran y comparan diferentes alternativas tecnológicas para seleccionar la más eficiente y sostenible, de acuerdo con los objetivos del proyecto (ONUFI, 2010).

En el caso de Paz de Ariporo, municipio ubicado en el departamento de Casanare, se identifican condiciones particularmente favorables para la generación de energía solar.

Según el Atlas de Radiación Solar de Colombia, esta región presenta una irradiación promedio anual de 5.319,4 Wh/m²/día, lo cual la convierte en una de las zonas con mayor potencial solar del país (Asociación Nacional de Empresarios de Colombia [ANDI], 2017). Adicionalmente, el IDEAM reporta una media de 6 horas de brillo solar diario, con picos de hasta 8,3 horas durante los meses secos, que favorecen el rendimiento fotovoltaico (IDEAM & UPME, 2017).

La empresa ENERCA S.A. E.S.P., encargada de la distribución y comercialización de energía en Casanare, ha iniciado procesos de modernización orientados a facilitar la integración de energías renovables en su red. En este contexto, proyectos APV de menos de 1 MWp podrían establecer contratos bilaterales de compraventa de energía (PPA) con ENERCA, en caso de que se cumplan con los requisitos legales y técnicos para su conexión a las redes locales.

Los avances tecnológicos en el campo APV incluyen paneles bifaciales, sistemas de almacenamiento de energía y estructuras elevadas que permiten el uso simultáneo del suelo para cultivos o ganadería. Estas innovaciones incrementan la eficiencia energética del sistema y permiten una integración productiva más amplia, alineada con modelos de agricultura sostenible (Dupraz et al., 2011).

Los sistemas de energía solar tienen los siguientes componentes tecnológicos:

- Módulos fotovoltaicos: son dispositivos que transforman la radiación solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Están compuestos por celdas solares fabricadas comúnmente con silicio monocristalino, policristalino o tecnologías de película delgada, encapsuladas en materiales resistentes como vidrio templado y marcos de aluminio para garantizar su durabilidad frente a condiciones ambientales adversas. Los módulos de silicio monocristalino ofrecen mayor eficiencia, especialmente en condiciones de baja radiación, mientras que los policristalinos presentan menores costos de fabricación. Entretanto, los módulos bifaciales pueden captar radiación tanto en su cara frontal como en la posterior,

incrementando la generación de energía total. El rendimiento de estos módulos depende de varios factores como la intensidad de la radiación solar, la temperatura ambiente y el ángulo de inclinación. Además, tecnologías como las celdas PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) han mejorado la eficiencia mediante la reducción de pérdidas energéticas (Luque & Hegedus, 2011).

- Inversores fotovoltaicos: son componentes fundamentales en un sistema solar, ya que convierten la corriente continua (CC) generada por los paneles en corriente alterna (CA), apta para el consumo doméstico o comercial. Existen diversos tipos, como inversores de cadena, microinversores e inversores centrales, cuya elección depende del tamaño y diseño del sistema. Los modelos modernos incorporan funciones de monitoreo remoto, gestión inteligente de la energía, y sistemas MPPT (Maximum Power Point Tracking) que optimizan la producción en tiempo real (Kalogirou, 2014).
- Medida de potencia generada por el sistema de energía solar (kW): es una unidad de potencia equivalente a 1.000 vatios. En el contexto de las energías renovables, se utiliza para medir la capacidad instalada de un sistema. La energía producida por dicho sistema se expresa en kilovatios-hora (kWh), que representa la cantidad de energía generada durante una hora de funcionamiento a 1 kW de potencia (International Electrotechnical Commission [IEC], 2017). En proyectos APV, estas unidades permiten dimensionar la capacidad de generación y estimar los ingresos potenciales por venta de energía.

9.5 ASPECTO AMBIENTAL

El cambio climático constituye uno de los principales retos globales del siglo XXI, cuyo abordaje requiere una cooperación internacional efectiva, especialmente entre los países con mayores niveles de emisiones contaminantes. En este marco, el Acuerdo de París, firmado en 2015, ha sido un instrumento fundamental para fomentar la transición energética hacia fuentes renovables, limpias y sostenibles, que promueve compromisos

concretos para la reducción de gases de efecto invernadero (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2015).

En el contexto rural colombiano, particularmente en regiones como Paz de Ariporo, Casanare, se hace necesario fortalecer la sostenibilidad agropecuaria, entendida como la capacidad de los sistemas productivos para mantener su productividad y funcionalidad a largo plazo, incluso frente a condiciones adversas. Esta sostenibilidad depende del uso eficiente de los recursos naturales renovables, tales como el agua, el suelo y la biodiversidad, esenciales para la actividad agropecuaria (Conway & Barbier, 1990).

La tecnología APV representa una solución innovadora que integra la producción agrícola con la generación de energía solar, y ofrece beneficios ambientales y productivos. Este enfoque contribuye a la mitigación del cambio climático al reducir la huella de carbono asociada tanto a la agricultura como a la generación energética. Además, la sombra proyectada por los paneles solares disminuye la evaporación del agua del suelo, mejora la retención de humedad y protege a los cultivos de la radiación solar excesiva, lo cual es especialmente valioso en zonas cálidas como los Llanos Orientales (Barron-Gafford et al., 2019).

Por otro lado, la diversificación de actividades productivas derivada de la implementación de proyectos APV fortalece la resiliencia del sector agropecuario frente a los efectos del cambio climático. Al ofrecer fuentes alternativas de ingreso, los sistemas APV permite a los productores locales adaptarse mejor a fenómenos climáticos extremos e impredecibles, como sequías o lluvias intensas (Dinesh & Pearce, 2016). Esta sinergia entre sostenibilidad ambiental y productividad agrícola convierte a la APV en una herramienta estratégica para el desarrollo rural sostenible en municipios como Paz de Ariporo.

9.6 MACO LEGAL PARA UN PROYECTO APV EN COLOMBIA

El componente legal de un estudio de prefactibilidad permite identificar y analizar el marco normativo vigente que incide directamente en el desarrollo del proyecto. Este análisis

abarca aspectos como el cumplimiento de normas ambientales, la obtención de permisos y licencias, la propiedad o tenencia de la tierra, los derechos de uso del recurso solar y del agua, y las restricciones territoriales o de ordenamiento. También se evalúan los riesgos jurídicos asociados al proyecto, así como los requisitos para la constitución legal del ente promotor o responsable, bien sea una empresa, cooperativa o alianza público-privada.

La seguridad jurídica y el cumplimiento normativo son condiciones fundamentales para acceder a financiación, garantizar la sostenibilidad a largo plazo del proyecto y evitar sanciones o suspensiones durante su ejecución. En el caso colombiano, el país ha construido un marco normativo robusto para impulsar la transición energética mediante el fomento de las FNCER, dentro de las cuales se enmarca la energía solar utilizada en proyectos APV:

- UPME: es la entidad encargada de certificar los proyectos FNCER, requisito indispensable para acceder a los beneficios fiscales y planificar su integración al Sistema Interconectado Nacional (SIN).
- Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG): a través de diversas resoluciones, ha creado mecanismos regulatorios para facilitar la interconexión de pequeñas plantas solares, especialmente aquellas bajo esquemas de autoconsumo con excedentes y contratos bilaterales, lo cual resulta clave para proyectos menores a 1 MW, como los que podrían desarrollarse en Paz de Ariporo.
- Ley 1715 de 2014 y sus desarrollos posteriores: la Ley 1715 de 2014 establece el marco legal para la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. Esta ley promueve el desarrollo de proyectos de generación distribuida y autogeneración a pequeña escala, otorgando beneficios tributarios y arancelarios a los inversionistas como la deducción del impuesto sobre la renta hasta del 50 % en un período de cinco años, la exclusión del IVA y de aranceles para la importación de tecnología para la implementación de parques solares, y la depreciación acelerada de activos.

- Ley 2099 de 2021: fortalece y amplía el alcance de la Ley 1715 de 2014, reconociendo la transición energética como política de Estado. Incorpora nuevas tecnologías limpias, promueve la innovación energética y establece medidas para mejorar el acceso a la energía en zonas rurales y no interconectadas.
- Decreto 2236 de 2023 – Comunidades energéticas: este decreto reglamenta la participación de personas naturales y jurídicas en la cadena de valor de la electricidad mediante el uso de FNCER, combustibles renovables y recursos energéticos distribuidos, estableciendo el modelo de comunidades energéticas.
- Resolución CREG 101 070 de 2025 – Uso de activos de conexión: esta resolución sustituye y amplía las reglas existentes para permitir el uso de activos de conexión de propiedad de usuarios no regulados para conectar generación y demanda al SIN.
- Resolución CREG 101 072 de 2025 – Comunidades energéticas: esta resolución establece las reglas técnicas y comerciales para integrar comunidades energéticas al sistema eléctrico colombiano, promoviendo esquemas como la autogeneración remota y el productor marginal remoto.
- Resolución UPME 135 de 2025 – Incentivos tributarios: esta resolución establece los requisitos, el procedimiento y las tarifas a cobrar para evaluar las solicitudes y emitir los certificados que permitan acceder a los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014.

A pesar de los avances, la rentabilidad de los proyectos APV está expuesta a factores externos como los cambios en las tarifas de energía, los subsidios gubernamentales, la imposición de aranceles a la tecnología importada o las modificaciones regulatorias. Estos elementos pueden influir positiva o negativamente en la viabilidad financiera de este tipo de iniciativas (IRENA, 2020).

9.7 COMPONENTE FINANCIERO UN PROYECTO APV

El análisis económico constituye una etapa fundamental dentro del estudio de prefactibilidad, ya que permite evaluar si el proyecto APV propuesto en Paz de Ariporo, Casanare, es financieramente viable. Para ello, se elaboran proyecciones de flujos de caja que contemplan la inversión inicial, los costos operativos, los ingresos esperados por la venta de energía y, en caso de aplicarse, productos agropecuarios. Esta información se utiliza para calcular indicadores clave de rentabilidad y riesgo del proyecto.

Entre los indicadores utilizados se encuentran el Valor Actual Neto (VAN), que permite estimar el valor presente de los beneficios netos del proyecto; la Tasa Interna de Retorno (TIR), que indica la rentabilidad esperada; el Período de Recuperación (PR), que muestra el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial; y el Índice de Rentabilidad (IR), que refleja la relación entre beneficios y costos.

Adicionalmente, se incorpora un análisis de sensibilidad, el cual evalúa el impacto de posibles variaciones en variables críticas como el precio de la energía, los costos de instalación, el rendimiento de los paneles solares o la productividad agrícola. Este análisis permite identificar los escenarios de mayor riesgo y facilita la toma de decisiones estratégicas en condiciones de incertidumbre (Sapag Chain & Sapag, 2014).

10. ESTUDIO SECTORIAL Y ESTRATÉGICO

10.1 MACROENTORNO

El análisis PESTEL permite evaluar el entorno macroeconómico del proyecto considerando los siguientes aspectos.

10.1.1 Político

En cuanto a la política de transición energética, el Decreto 1403 de 2024 obliga a los autogeneradores a gran escala y a los productores marginales a suscribir un contrato de respaldo con el operador de red o el transportador al que estén conectados. Estos contratos, diseñados por las empresas operadoras, buscan garantizar la confiabilidad y estabilidad del servicio eléctrico.

Además, el Concepto 2664 de 2024 de la CREG establece que los excedentes de energía acumulados por los autogeneradores pueden ser permutados por su consumo de la red en el período de facturación. Por estos excedentes, el comercializador cobrará al autogenerador el costo de comercialización correspondiente. Estos lineamientos reflejan el compromiso del gobierno colombiano con la promoción de las energías renovables y la eficiencia en el uso de la energía eléctrica. Sin embargo, no existe un decreto específico que obligue a los operadores de red a pagar directamente por la energía solar generada por los usuarios. En cambio, se establecen mecanismos como los contratos de respaldo y la permuta de excedentes para regular la relación entre los autogeneradores y los operadores de red.

Es importante destacar que, en el marco de la Ley 1715 de 2014, se han promovido incentivos y regulaciones para fomentar el uso de fuentes no convencionales de energía renovable, incluyendo la energía solar. No obstante, la implementación de políticas y mecanismos específicos continúa evolucionando para adaptarse a las necesidades del sector energético colombiano.

Sobre los recursos para la política de transición energética, el gobierno colombiano aseguró un rubro para la ejecución de la política de transición energética mediante el documento CONPES 4075 de 2022, argumentando que el reemplazo de combustibles fósiles por fuentes de energía renovable para la generación de energía eléctrica permite un crecimiento sostenible, aumenta la confiabilidad energética y disminuye la emisión de gases efecto invernadero y mejora la salud pública.

10.1.2 Económico

10.1.2.1 Seguridad alimentaria vs. seguridad energética

Thomas et al. (2023) afirmó, en un estudio realizado en la India, que un aspecto social relevante es que los agricultores prefieren alquilar sus tierras a largo plazo para la construcción y operación de parques solares convencionales que requieren el uso exclusivo del suelo y dedicarse a otro tipo de actividad, un tema que preocupa a los autores del estudio, en tanto se crea una cultura que atenta contra la seguridad alimentaria de la población.

10.1.2.2 Sostenibilidad del sector agrario

La industria agraria ha experimentado desafíos en la gestión de recursos hídricos y la dependencia de fuentes de energía costosas y poco sostenibles. Los estudios recientes muestran un aumento en la viabilidad de sistemas APV que pueden integrar la producción de energía renovable con actividades agrícolas y pecuarias, mejorando la eficiencia y sostenibilidad. (Thomas et al., 2023).

10.1.2.3 Factores macroeconómicos en Colombia

La dimensión económica del análisis PESTEL se centra en los factores macroeconómicos que pueden influir positiva o negativamente en la viabilidad y

sostenibilidad de un proyecto. En el caso colombiano, esta dimensión es particularmente relevante debido a la volatilidad de algunos indicadores clave, como la inflación, el tipo de cambio, el crecimiento económico, el desempleo y el déficit fiscal, entre otros.

Uno de los principales indicadores económicos que impacta los proyectos de inversión en Colombia es la inflación. Este fenómeno afecta el poder adquisitivo, los costos de producción y la rentabilidad de las inversiones. Según el DANE (2024), en 2023, la inflación anual cerró en 9,28 %, una cifra elevada que presionó tanto los costos de operación como la demanda agregada. Este nivel de inflación también ha provocado ajustes en las tasas de interés por parte del Banco de la República, lo cual encarece el acceso al financiamiento para nuevos proyectos.

Otro factor crítico es la devaluación del peso colombiano, que ha sido persistente en los últimos años debido a factores internos y externos, como la incertidumbre política y la variabilidad en los precios del petróleo. Una moneda débil incrementa el costo de los bienes importados, incluyendo tecnología e insumos necesarios para sectores como el energético o el agrícola, impactando directamente la ejecución y sostenibilidad financiera de proyectos APV.

En 2024, la economía colombiana experimentó un crecimiento moderado de 1,7 %, impulsado por una recuperación gradual de la demanda interna, el consumo privado y la inversión en infraestructura, como el metro de Bogotá. Sin embargo, sectores como la construcción y la industria manufacturera enfrentaron desafíos, y la inversión en vivienda se contrajo. La inflación se redujo significativamente, ubicándose en 5,2 % al cierre del año, y la tasa de desempleo disminuyó a 9,7 % a nivel nacional, con una reducción más marcada en áreas rurales (Banco de la República, 2025).

Para 2025, las proyecciones de crecimiento económico para Colombia varían según diferentes entidades. El Banco de la República estima un crecimiento de 2,6 %, respaldado por un consumo resiliente y una recuperación de la inversión. El Fondo Monetario Internacional (FMI) proyecta un crecimiento de 2,4 %, mientras que la

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) anticipa un crecimiento de 2,5 %. Esto sugiere que Colombia podría superar el promedio de crecimiento de América Latina y el Caribe, estimado en 2,5 % para 2025 (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2025).

A pesar de estas perspectivas, persisten desafíos estructurales que podrían limitar el crecimiento económico. La inversión continúa siendo baja en comparación con promedios históricos, y sectores como la construcción enfrentan dificultades debido a altas tasas de interés y retrasos en subsidios estatales. Además, el déficit fiscal y la necesidad de consolidación de las finanzas públicas son factores que podrían afectar la sostenibilidad del crecimiento a mediano plazo.

En resumen, aunque se anticipa una mejora en el crecimiento económico de Colombia para 2025, es fundamental abordar los desafíos estructurales y fiscales para garantizar una recuperación sostenible y equitativa. En cuanto al desempleo, Colombia ha tenido históricamente tasas elevadas en comparación con otros países de la región. En abril de 2024, la tasa nacional se ubicó en 10,6 %, lo cual representa un reto para la estabilidad económica, pero también una oportunidad para generar empleo formal mediante nuevos emprendimientos y proyectos sostenibles (DANE, 2024).

Finalmente, el déficit fiscal es una preocupación constante. El gobierno colombiano ha enfrentado presiones para aumentar el gasto público sin comprometer la sostenibilidad de la deuda. Un alto déficit puede reducir la capacidad del Estado para financiar incentivos o subsidios a proyectos innovadores, como las granjas APV, y generar desconfianza entre inversionistas.

Por tanto, el contexto económico colombiano presenta tanto desafíos como oportunidades para el desarrollo de proyectos. Comprender y anticipar la evolución de estos indicadores es esencial para la planificación estratégica y la evaluación de riesgos en estudios de prefactibilidad.

10.1.2.4 Inversión estimada para la construcción de la granja APV

En Colombia se han desarrollado estudios enfocados en los sistemas APV. Cusva García (2022) presenta un análisis sobre sus beneficios, acompañado de un caso de estudio. En su trabajo, el autor propone un cálculo del costo del sistema APV que incluye el precio de los paneles e inversores, además de un método de inversión en bienes de capital (CAPEX). Para la obra civil, estima un costo del 27 %, mientras que añade un sobrecosto del 30 % al sistema debido a la mayor complejidad de instalación en comparación con los sistemas solares tradicionales. Asimismo, menciona la Resolución CREG 030 de 2018, la cual establece las normas para que los usuarios puedan generar y comercializar energía eléctrica en el país. Finalmente, sugiere un costo de operación y mantenimiento equivalente al 5 % de la inversión total, considerando un periodo de 20 años, que corresponde a la vida útil estimada de un panel solar.

10.1.3 Social

IRENA, en colaboración con la Organización Internacional de Trabajo (OIT), en el informe anual del año 2023 estimó que el sector de energías renovables generó 13,7 millones de empleos en el 2022, de los cuales el sector solar fotovoltaico fue el más relevante con 4,9 millones (IRENA & OIT, 2023).



Ilustración 1. Evolución de empleo global energías renovables por tecnología. IRENA 2023

Fuente: IRENA & ILO (2023).

10.1.4 Tecnológico

10.1.4.1 Crecimiento de la energía solar en el mundo

De acuerdo con el informe de IRENA (2024), a nivel mundial se generaban 179.639 MW en el año 2014, mientras que al 2023 se estaban generando 1.418.016 MW. Esto muestra un incremento importante en este tipo de energía como respuesta de los países para reemplazar la generación de energía eléctrica con fuentes fósiles y disminuir las emisiones de CO₂. Según datos extraídos del informe, el crecimiento de la energía solar desde el 2014 hasta el 2023 fue el siguiente:

| Energía solar | | | | | | | | | | |
|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|-----------|
| CAP (MW) | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
| Mundo | 179.639 | 228.081 | 300.146 | 395.854 | 491.988 | 595.027 | 726.229 | 870.643 | 1.070.851 | 1.418.016 |
| Sur América | 453 | 901 | 1.529 | 3.712 | 5.652 | 8.579 | 13.422 | 21.259 | 34.698 | 49.392 |
| Colombia | 1 | 1 | 2 | 11 | 13 | 13 | 83 | 181 | 480 | 716 |

Tabla 1. Informe IRENA Crecimiento de la energía solar

Fuente: IRENA (2024).

10.1.4.2 Participación de la energía solar en la matriz energética de Colombia

En Colombia, XM reportó que, con corte al 31 de diciembre de 2024, la matriz de generación del SIN tiene los siguientes porcentajes por tecnología:

| Tecnología | Capacidad Efectiva Neta (MW) | Porcentaje |
|------------|------------------------------|------------|
| Hidráulico | 13.219,7 | 62% |
| Térmico | 6.246,1 | 29% |
| Solar | 1.903,0 | 9% |

Tabla 2. Porcentajes por tecnología Informe XM 12 de enero de 2025

Fuente: XM (2025).

10.1.4.3 Paneles solares elevados y móviles

Los sistemas APV emplean estructuras elevadas permitir el crecimiento de cultivos debajo de los paneles solares. Este diseño reduce la competencia por el uso del suelo y puede generar microclimas que benefician la producción agrícola (Dupraz et al., 2011). Además, algunos sistemas incorporan mecanismos móviles que permiten ajustar la altura de los paneles en función del ciclo de crecimiento de los cultivos, proporcionando sombra parcial o total según sea necesario (Dinesh & Pearce, 2016).

10.1.4.4 Sistemas de seguimiento solar

El seguimiento solar permite orientar los paneles fotovoltaicos a lo largo del día para maximizar la captación de radiación solar. En el contexto APV, estos sistemas no solo aumentan la eficiencia energética, sino que también pueden configurarse para reducir la insolación en momentos de alta radiación, protegiendo los cultivos o los animales del estrés térmico y disminuyendo la evaporación del suelo (Amaducci et al., 2018). Según estudios recientes, los sistemas de seguimiento pueden mejorar la eficiencia de los parques APV en hasta 15 % y 20 %, en comparación con sistemas fijos (Weselek et al., 2019).

10.1.4.5 Uso de materiales semitransparentes

El empleo de paneles solares semitransparentes permite el paso parcial de la radiación solar en espectros adecuados para la fotosíntesis. Algunas tecnologías actuales utilizan células fotovoltaicas de perovskita o de silicio delgado para optimizar la transmisión de luz roja y azul, esenciales para el crecimiento de los cultivos (Liu et al., 2021). Estos sistemas han mostrado impacto positivo en el rendimiento de cultivos como lechugas y fresas, al reducir el estrés lumínico sin comprometer significativamente la producción de energía (Barron-Gafford et al., 2019).

10.1.4.6 Sistemas de riego inteligente y sensores IoT

El uso de sensores de humedad del suelo, temperatura y radiación permite mejorar la gestión hídrica en sistemas APV. A través del Internet de las Cosas (IoT), estos dispositivos recopilan datos en tiempo real para optimizar el riego, reduciendo el consumo de agua y mejorando la eficiencia de los cultivos (Hassanpour et al., 2020). Además, se han desarrollado algoritmos de inteligencia artificial que ajustan automáticamente la irrigación en función de las condiciones climáticas y las necesidades específicas de cada cultivo, lo cual puede generar ahorros de agua de hasta un 30 % (Kim et al., 2022).

10.1.5 Ecológico

Se requiere de una participación sustancial de las energías renovables para mitigar las externalidades del cambio climático. De acuerdo con un estudio realizado en la India, la agricultura es una industria que demanda gran cantidad de energía y ha sido el pilar de la economía de ese país en varias décadas. Aspectos como urbanización, globalización y ciclos climáticos erráticos han desplazado comunidades de los campos agrícolas. Mientras la población sigue creciendo y demandando grandes cantidades de energía y alimentos, se están utilizando grandes cantidades de tierra productiva y fértil para cubrir las de paneles solares durante la vida útil del proyecto, evidenciándose el conflicto entre energía-alimentación-terras (Thomas et al., 2023).

10.1.6 Legal

- Marco normativo: en Colombia, la Ley 1715 de 2014 establece el marco regulatorio para la integración de energías renovables en el sistema eléctrico. Además, las políticas de incentivos fiscales y los programas de transición energética impulsan el desarrollo de proyectos sostenibles como las granjas APV.
- Recuperación del 50 % de la inversión total: el artículo 174 de la Ley 1955 de 2019, mediante el cual se modificó el artículo 11 de la Ley 1715 de 2014, permitió, a las

personas naturales o jurídicas obligadas a declarar renta, deducir de su renta en un plazo no mayor a 15 años el cincuenta 50 % del total de la inversión realizada para la generación de energía eléctrica con FNCE que haya sido certificada por la UPME como proyecto de generación una vez el sistema comience a operar.

- Exoneración del pago de IVA de los componentes tecnológicos: el artículo 174 de la Ley 1955 de 2019 exoneró del pago del IVA a los componentes de un sistema solar, como el inversor de energía para sistema de energía solar con paneles, paneles solares y controlador de carga para sistema de energía solar con paneles.

10.2 MICROENTORNO

10.2.1 Ubicación y características del terreno

La finca Las Delicias se encuentra ubicada en la vereda La Peral, Paz de Ariporo, Casanare, y el área tiene las siguientes características:

- Irradiación solar: Paz de Ariporo presenta condiciones favorables para la implementación de una granja APV debido a su elevada irradiancia solar. Según datos del IDEAM, la irradiación global horizontal media en Colombia varía entre 5,5 y 6,0 kWh/m²/día, y Paz de Ariporo se encuentra en el rango superior de este espectro.
- Condiciones del suelo: evaluación de su aptitud para cultivos y carga estructural de los soportes fotovoltaicos.
- Topografía: el relieve plano o con pendiente leve del predio favorece la instalación de paneles solares.
- Accesibilidad: proximidad a vías de transporte para el traslado de equipos y materiales.
- Disponibilidad de agua: fuentes hídricas cercanas para el riego de cultivos bajo los paneles.

10.2.2 Infraestructura y recursos disponibles

Cerca de la finca Las Delicias existe infraestructura eléctrica de media tensión del operador de red ENERCA S.A. E.S.P., y actualmente la finca tiene ganado bovino. A continuación, se describen los recursos disponibles:

- Red de distribución eléctrica: conexión posible a la red de distribución trifásica de 13,2 kV a 300 metros para inyección de energía. Además, a 900 metros del predio hay una subestación de energía de 34,5 kV/13,2 kV de 5 MW.
- Infraestructura agrícola: condiciones actuales de la finca para producción agrícola o ganadera.

10.2.3 Proveedores para la granja fotovoltaica y la actividad ganadera de la finca

Para la construcción del proyecto fotovoltaico y para el desarrollo actual de la actividad ganadera se cuenta con los siguientes proveedores:

- Suministro de paneles solares e inversores: hay proveedores de equipos solares que ofrecen garantía y asesoría en el municipio de Yopal (capital de Casanare) ubicado a 30 minutos del predio. Se pueden solicitar cotizaciones a proveedores locales y nacionales, y se recomiendan los proveedores locales para la garantía de los equipos.
- Mano de obra calificada: en Casanare hay disponibilidad de técnicos para la instalación de sistemas fotovoltaicos, ingenieros con experiencia en diseño y montaje de sistemas fotovoltaicos y empresas privadas que prestan el servicio de suministro e instalación. El montaje del parque se puede hacer por administración (uno de los propietarios del predio está interesado en hacerlo bajo esta modalidad) o contratación de una empresa que preste este tipo de servicios (aumentaría el AIU y las expectativas económicas de la empresa contratista).

- Logística de transporte: Yopal se encuentra a 30 minutos por carretera de la finca, lo cual facilita el transporte de los equipos hasta la zona de implementación. Bogotá se encuentra aproximadamente a 8 horas por carretera del predio, lo cual incrementa el precio del transporte.
- Actividad ganadera: el predio actualmente tiene actividad ganadera, cuenta con proveedores locales, una familia cuida el predio y el ganado, los dueños del predio administran directamente.

10.2.4 Competencia y proyectos similares

En la región hay proyectos fotovoltaicos convencionales en operación, los cuales venden la energía generada al operador local de red (ENERCA) y a operadores de hidrocarburos como las empresas Geopark y Parex, sin embargo, no se evidencian proyectos APV en operación. El enfoque de este proyecto, que integra la producción ganadera con la producción de energía eléctrica verde, optimiza el uso del suelo y aporta a la matriz energética del país.

10.2.5 Comunidad y factores sociales

En la región se encuentran los siguientes factores sociales:

- Percepción de la comunidad local: posibles beneficios en empleo, desarrollo económico y sostenibilidad energética.
- Apoyo de organizaciones y entidades: se pueden gestionar alianzas con asociaciones campesinas o cooperativas para fortalecer el impacto social del proyecto en sus fases de construcción y operación.
- Potenciales conflictos: no se perciben preocupaciones ambientales o culturales que puedan generar resistencia al proyecto APV.

10.2.6 Regulaciones locales y permisos

Para la construcción y operación de la granja APV se deben tener en cuenta las siguientes regulaciones:

- Normativas municipales y departamentales: regulaciones ambientales y de uso del suelo, trámite ante Corporinoquia y el municipio de Paz de Ariporo.
- Licencias y trámites: permisos requeridos para la instalación y operación del sistema APV con el operador de red local ENERCA S.A. E.S.P.
- Incentivos gubernamentales: posibles subsidios o beneficios fiscales para proyectos de energías renovables, trámite ante la UPME.

10.3 SECTOR Y SUBSECTOR

10.3.1 Sector

El proyecto de la granja APV pertenece a los siguientes sectores: al sector energético por generar energía eléctrica a partir de energía solar, y al sector agrícola por permitir las actividades agrarias, como la siembra, la cosecha o el pastoreo en el área bajo los paneles solares.

10.3.2 Subsector

El proyecto de la granja APV se ubica en el subsector de generación de energía solar fotovoltaica, clasificación que permite inscribirlo ante la UPME para obtener los beneficios tributarios actuales y la venta de los excedentes de energía al operador de red local.

10.3.3 NÚCLEO

El código CIU 3511 de la DIAN incluye la generación de energía eléctrica con fuentes renovables de energía solar realizada por personas naturales o jurídicas en el país, conectadas al SIN.

10.4 ANÁLISIS ESTRATÉGICO

Para evaluar la viabilidad del proyecto, se empleó la matriz DOFA (debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas), una herramienta de análisis estratégico que permite identificar los factores internos y externos que pueden influir en su desarrollo. Mediante este enfoque, se analizaron las ventajas competitivas del proyecto, las oportunidades del entorno, las limitaciones internas y los riesgos externos, con el fin de proporcionar una visión integral para la toma de decisiones y el diseño de estrategias de mitigación y aprovechamiento de oportunidades.

10.4.1 Fortalezas (F)

Se identifican las siguientes fortalezas para la implementación del proyecto APV:

- Ubicación estratégica del predio, con cercanía a vías de transporte y red trifásica de 13,2 kV.
- Diversificación de ingresos al combinar energía solar con producción ganadera o agrícola.
- Recuperación de la inversión en un plazo de 3 a 4 años con una vida útil del sistema entre 25 y 30 años.
- Uso eficiente del terreno, permitiendo la coexistencia de paneles solares y actividades ganaderas.
- Mejora del bienestar animal mediante la sombra proporcionada por los paneles solares.
- Conservación de recursos hídricos al reducir la evaporación del agua en el suelo.

- Contribución a la sostenibilidad ambiental y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

10.4.2 Oportunidades (O)

Se identifican las siguientes oportunidades para la implementación del proyecto APV:

- Diversificación de ingresos con la venta de excedentes de energía eléctrica.
- Reducción de costos operativos al destinar parte de la energía generada al autoconsumo.
- Aprovechamiento de incentivos gubernamentales, como exenciones fiscales y deducciones en el impuesto de renta.
- Reducción de la huella de carbono mediante el uso de energía renovable.
- Fomento de la biodiversidad mediante la integración de cultivos y ganadería en el sistema APV.
- Mejoras en la productividad ganadera al proporcionar condiciones térmicas favorables.
- Optimización del uso del suelo sin desplazar actividades agropecuarias.

10.4.3 Debilidades (D)

Se identifican las siguientes debilidades para la implementación del proyecto APV:

- Costos iniciales elevados para la instalación del sistema.
- Complejidad en la gestión y operación de actividades combinadas (agrícolas y energéticas).
- Posible impacto en la productividad ganadera por interferencias con la infraestructura solar.
- Requerimientos de mantenimiento y seguridad adicionales debido a la presencia de animales.

- Factores climáticos y geográficos pueden afectar la eficiencia del sistema.

10.4.4 Amenazas (A)

Se identifican las siguientes amenazas para la implementación del proyecto APV:

- Retiro del actual gobierno de Estados Unidos de Norteamérica del Acuerdo de París, lo cual podría afectar la financiación de energías renovables.
- Retorno de Alemania a la energía nuclear, disminuyendo el interés global en energías renovables.
- Reducción de las metas de CO₂ para 2030, lo cual podría disminuir incentivos para energías limpias.
- Presencia de grupos armados ilegales y riesgos de seguridad en Casanare.
- Impacto de bloqueos y protestas que podrían afectar la implementación del proyecto.
- Posibles conflictos sociales y resistencia de la comunidad local ante cambios en el uso del suelo.

10.4.5 Matriz DOFA

| FACTORES INTERNOS \ FACTORES EXTERNOS | OPORTUNIDADES (O) | AMENAZAS (A) |
|---|--|--|
| FORTALEZAS (F) | Estrategias FO (Fortalezas + Oportunidades) | Estrategias FA (Fortalezas + Amenazas) |
| 1. Ubicación estratégica del predio, con cercanía a vías de transporte y redes eléctricas. | 1. Utilizar la ubicación estratégica y la infraestructura existente para facilitar la venta de excedentes energéticos y reducir costos operativos. | 1. Aprovechar la cercanía a vías de transporte y redes eléctricas para mejorar la logística y seguridad del proyecto ante posibles riesgos de orden público. |
| 2. Diversificación de ingresos al combinar energía solar con producción ganadera. | 2. Fomentar acuerdos con el gobierno y empresas privadas para garantizar la compra de energía excedente y asegurar la rentabilidad del proyecto. | 2. Implementar programas de educación ambiental y social para reducir la resistencia de la comunidad al proyecto APV. |
| 3. Recuperación de la inversión en un plazo de 3 a 4 años con una vida útil del sistema entre 25 y 30 años. | 3. Acceder a incentivos gubernamentales para acelerar la recuperación de la inversión y hacer el proyecto más competitivo. | 3. Generar alianzas con entidades financieras que brinden apoyo en caso de cambios en la política energética global. |

| | | |
|---|--|---|
| 4. Uso eficiente del terreno, permitiendo la coexistencia de paneles solares y actividades ganaderas. | 4. Optimizar el uso del suelo sin desplazar las actividades agropecuarias, generando mayores ingresos. | 4. Diseñar un modelo de negocio resiliente a cambios en regulaciones ambientales y de energías renovables. |
| 5. Mejora del bienestar animal mediante la sombra proporcionada por los paneles solares. | 5. Implementar programas de certificación en bienestar animal para aumentar el valor agregado de la producción ganadera. | 5. Promover el impacto positivo del proyecto en la sostenibilidad ambiental para contrarrestar posibles restricciones gubernamentales futuras. |
| DEBILIDADES (D) | Estrategias DO (Debilidades + Oportunidades) | Estrategias DA (Debilidades + Amenazas) |
| 1. Costos iniciales elevados para la instalación del sistema. | 1. Aprovechar incentivos fiscales y deducciones en impuestos para reducir los costos iniciales. | 1. Buscar financiamiento alternativo y subsidios para mitigar el impacto de posibles cambios en la financiación internacional de energías renovables. |
| 2. Complejidad en la gestión y operación de actividades combinadas (agrícolas y energéticas). | 2. Desarrollar capacitaciones y manuales de operación para optimizar la gestión del sistema APV. | 2. Implementar protocolos de seguridad para garantizar la operatividad en un contexto de posibles riesgos sociales. |
| 3. Posible impacto en la productividad ganadera por interferencias con la infraestructura solar. | 3. Diseñar estrategias de manejo ganadero que integren de manera eficiente el uso del espacio con la infraestructura fotovoltaica. | 3. Realizar estudios de impacto ambiental y social para minimizar conflictos con la comunidad y asegurar la viabilidad del proyecto. |
| 4. Requerimientos de mantenimiento y seguridad adicionales debido a la presencia de animales. | 4. Implementar tecnologías de monitoreo remoto para optimizar la seguridad y el mantenimiento de los paneles solares. | 4. Asegurar un plan de contingencia en caso de bloqueos o conflictos sociales que afecten el acceso al mantenimiento del sistema. |
| 5. Factores climáticos y geográficos pueden afectar la eficiencia del sistema. | 5. Desarrollar estrategias de mitigación ante factores climáticos, como estructuras ajustables o tecnologías de almacenamiento de energía. | 5. Evaluar la diversificación de fuentes energéticas para reducir la vulnerabilidad ante posibles cambios en el rendimiento de los paneles solares. |

Matriz DOFA proyecto granja APV en Paz de Ariporo Casanare

Fuente: elaboración propia.

10.4.6 Desarrollo estratégico

- Aprovechamiento de incentivos y financiamiento: gestionar beneficios fiscales establecidos en la Ley 1715 de 2014 para reducir costos iniciales. Tramitar la certificación de la generación de energía eléctrica con FNCE de la granja APV ante la UPME. Suscribir un contrato de respaldo con el operador de red ENERCA S.A. E.S.P. Buscar alianzas con instituciones financieras y programas de energías renovables para obtener créditos accesibles.
- Optimización del uso del suelo: integrar cultivos de forraje y leguminosas bajo los paneles para mejorar la productividad del terreno. Implementar técnicas de conservación de suelos para prevenir la erosión y mejorar la retención de agua.

- Seguridad y protección de la infraestructura: implementar tecnologías de vigilancia y seguridad para proteger los paneles solares de vandalismo y sabotaje. Establecer acuerdos con comunidades locales para generar empleo y fortalecer la seguridad en la zona.
- Capacitación y desarrollo de conocimiento: crear programas de capacitación para ganaderos y técnicos en manejo de tecnologías APV. Fomentar la investigación en universidades para optimizar la adaptabilidad de los sistemas APV a las condiciones climáticas de Casanare.
- Sostenibilidad y adaptación al cambio climático: desarrollar estrategias para mitigar los impactos del clima extremo sobre la infraestructura fotovoltaica. Diseñar sistemas de almacenamiento de energía para garantizar el suministro en períodos de baja radiación solar.

Con estas estrategias, se busca consolidar un modelo de APV rentable y sostenible, aprovechando las oportunidades y minimizando los riesgos en el contexto de Casanare.

11. ESTUDIO DE MERCADO

11.1 PRODUCTO O SERVICIO

11.1.1 Descripción del producto o servicio y su valor agregado

La granja APV proyectada tendrá un enfoque dual:

- Generación de energía fotovoltaica: mediante una planta de menos de 1 MW, con potencial de venta a la red y autoconsumo.
- Producción agropecuaria sostenible: específicamente, producción ganadera (cría y levante de bovinos) y forrajes (pasto de corte).

11.1.2 Necesidad que se quiere solucionar

La implementación de granjas APV busca abordar múltiples desafíos:

- Diversificación de ingresos: al combinar agricultura y generación de energía, se reducen los riesgos económicos asociados a la dependencia de una sola actividad.
- Sostenibilidad ambiental: se promueve el uso de energías renovables, disminuyendo la huella de carbono y contribuyendo a la mitigación del cambio climático.
- Eficiencia en el uso del suelo: se maximiza la productividad por unidad de área al integrar dos actividades complementarias.

11.1.3 Perfil del consumidor y segmentos estratégicos

- Productores agrícolas locales: interesados en diversificar sus fuentes de ingresos y adoptar prácticas sostenibles.

- Comercializador de energía local: regulado por la CREG en Colombia y empresas privadas de hidrocarburos en el sector.
- Instituciones públicas y privadas: comprometidas con la responsabilidad social y la sostenibilidad, interesadas en proyectos innovadores que combinen producción agrícola y generación de energía limpia.

11.1.4 Posible diversificación

- Turismo ecológico: ofrecer visitas educativas para promover la conciencia ambiental y mostrar prácticas sostenibles.
- Investigación y desarrollo: colaborar con instituciones académicas en estudios sobre eficiencia agrícola y energética en sistemas APV.

11.2 DEMANDA

11.2.2 11.2.1 Demanda de energía eléctrica

La UPME (2023) proyecta un crecimiento sostenido de la demanda eléctrica nacional entre 2023 y 2037, con un aumento promedio anual del 3,5 %. La región Orinoquía (Casanare incluido) se caracteriza por altos costos de transporte y distribución, lo cual incrementa el interés por fuentes locales de generación distribuida.

En cuanto a la demanda específica en la granja:

- Se estima que el consumo eléctrico interno será de aproximadamente 150 kWh/mes para labores agropecuarias (bombeo, iluminación, cercas eléctricas).
- Con la instalación de paneles solares con una capacidad total de 1 MWp, se estima una generación anual de aproximadamente 1.500 MWh, considerando un factor de planta del 17 %, con potencial de venta mediante contrato PPA con ENERCA S.A. E.S.P., o con una empresa privada de la región. bajo esquema bilateral.

11.2.3 Demanda de ganadería y agricultura

Es importante puntualizar que la granja tiene 100 hectáreas dedicadas a ganadería:

- Ganado: con una densidad de 1,0 unidades animales por hectárea, se podrían manejar 100 cabezas de ganado.
- Producción de carne: suponiendo un rendimiento de 250 kg de carne por animal, se obtendrían 18.750 kg anuales.
- Producción de leche: con un promedio de 10 litros por vaca al día, se producirían 547.500 litros anuales.

11.3 OFERTA

En el sector de energía la generación distribuida con FNCER en el departamento del Casanare aún es incipiente. Al año 2024, no se registran más de 15 proyectos solares de pequeña escala (<1 MW) conectados al SIN (XM, 2024). Esto indica baja competencia y una oportunidad de posicionamiento temprano.

Además, en el sector de producción ganadería y agricultura, la oferta de ganado bovino en Paz de Ariporo es alta, pero orientada principalmente a pastoreo extensivo, con baja tecnificación. La introducción de un modelo intensivo bajo sombra solar representa una ventaja competitiva.

11.4 COMPETENCIA

La competencia se divide en dos sectores:

- Energía: empresas solares urbanas, cooperativas rurales y algunos proyectos del gobierno departamental. Sin embargo, no hay competencia directa en esquemas APV.

- Agropecuaria: fincas tradicionales de ganadería extensiva. La competencia no ha adoptado modelos de integración energética ni prácticas regenerativas, lo que permite diferenciarse.

11.5 CUOTAS DE MERCADO

Dado el tamaño del proyecto, se estima:

- Energía: participación inicial del 0,5 % de la demanda local de Paz de Ariporo. Progresivamente ampliable si se escalan los sistemas.
- Ganadería: hasta 0,2 % del mercado regional de novillos de levante en el primer año, con posibilidad de duplicar al tercer año.
- Cultivos forrajeros: hasta 5 toneladas mensuales en oferta local, con una cuota esperada del 3 % en el municipio.

11.6 PRECIO

A continuación, se estiman los precios de venta de energía eléctrica y de ganado bovino en la región:

- Energía eléctrica: el precio de venta del kilo vatio hora para el mercado regulado de energía eléctrica en Colombia fue de COP 532 por kWh en bolsa en enero 2025; en el caso del mercado no regulado con contratos bilaterales a largo plazo se espera que el promedio de venta sea de COP 320 kWh (XM, 2025). Para el presente estudio se tomará el precio de COP 400 por kW/h.
- Ganadería: el precio novillo levante para 2024 fue de COP 6.500 por kg en pie (Federación Colombiana de Ganaderos [Fedegán], 2024). El margen bruto proyectado es de 25 % en sistemas semiestabulados con forraje controlado. En la zona, el precio de novillos de engorde de 400 a 500 kg tiene un promedio de COP 8.500 por kg en pie.

11.7 TENDENCIAS DEL ENTORNO

Actualmente, en Colombia hay una política pública favorable para la inversión en proyectos solares reguladas en las Leyes 1715/2014 y 2099/2021. La sostenibilidad de los sectores de energía y alimentación están en auge: se presenta un aumento en la demanda de alimentos y energía con bajo impacto ambiental y el Estado está facilitando acceso a incentivos como beneficios tributarios, acceso a líneas verdes del Banco Agrario y Bancóldex.

11.8 PRESUPUESTO DE INGRESOS

11.8.1 Ingreso Anual por Venta de Energía (IAVE)

En el mercado no regulado (o mercado libre), los precios de venta de energía se negocian libremente entre generadores y compradores. La Resolución CREG 174 de 2021 señala que, para energía destinada a usuarios no regulados, “el precio de venta es pactado libremente”, es decir, no existe una tarifa fija. Tomando como referencia el precio de COP 400 COP por kWh, se calcula el ingreso anual de la siguiente forma:

Ingreso anual por venta de energía = kWh anual generados x precio promedio ponderado

kWh anual generados: $\approx 1.515.000$ kWh

Precio kWh: COP 400 por kWh

$$IAVGE = 1.515.000 \text{ kWh} \times \frac{\text{COP } 400}{1 \text{ kWh}}$$

$$IAVE \approx \text{COP } 606.000.000$$

11.8.2 Ingreso Anual por Venta de Ganado (IAVG)

Tomando como referencia la información del propietario de la finca Las Delicias y los precios del mercado, se calcularon los ingresos por venta de ganado:

- Área pastoreo ganado bovino: 100 hectáreas.
- Sistema de producción: ganadería extensiva, predominante en las sábanas inundables de Paz de Ariporo, vereda La Peral.
- Capacidad de carga: 1,0 unidad ganadera por hectárea, con prácticas tradicionales.
- Total de cabezas de ganado: 100.
- Tasa de natalidad: 22 %, es decir, 22 terneros al año.
- Peso promedio al destete: 180 kg.
- Precio de venta del ternero destetado: COP 6.500 por kg.
- Ingreso Anual por Venta de Terneros (IAVT): venta de 22 terneros anuales.

$$IAVT = 22 \times 180 \text{ kg} \times \frac{COP 6500}{1kg} = COP 25.740.000$$

- Ingreso Anual por Venta de Ganado de Engorde (IAVGE)
Promedio de venta anual de 35 novillos de engorde al año, con un peso promedio de 500 kg y un precio de COP 8.500 por kg:

$$IAVGE = 35 \times 500 \text{ kg} \times \frac{COP 8500}{1kg} = COP 148.750.000$$

- IAVG

$$IAVG = IAVT + IAVGE$$

$$= COP 25.740.000 + COP 148.750.000$$

$$IAVG \approx COP 174.490.000$$

11.8.3 Ingreso Anual Granja APV (IGAPV)

De acuerdo con los datos de mercado de venta de energía eléctrica no regulada, de la información del propietario de la finca Las Delicias y de los precios del mercado, el total de ingresos mensuales de la granja APV sería:

$$IAVGE = COP 606.000.000$$

$$IAVG = COP 174.490.000$$

$$IAPV = IAVGE + IAVG$$

$$COP\ 606.000.000 + COP\ 174.490.000$$

$$IGAPV \approx COP\ 780.490.000$$

12. ESTUDIO TÉCNICO

12.1 ANÁLISIS DE LA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA

12.1.1 Macrolocalización del proyecto

El proyecto de APV se ubica en el municipio de Paz de Ariporo, en el departamento de Casanare (Colombia), y para su ubicación de tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Irradiación solar: según el Atlas Solar elaborado por el IDEAM y la UPME, la región de la Orinoquía, en la cual se encuentra el municipio de Paz de Ariporo, presenta condiciones favorables para la implementación de una granja APV debido a su elevada irradiancia solar, promediando entre 5,5 y 6,0 kWh/m²/día.
- Punto de conexión: red de media tensión de 13.200 V del operador de red ENERCA S.A. E.S.P. a 300 metros.
- Subestación de energía cercana: situada a 900 metros de la APV de 5 MVA del operador de red ENERCA S.A. E.S.P.
- Accesibilidad: el predio se encuentra ubicado a 1 km de la vía Yopal, Arauca, facilitando el traslado de equipos y materiales.
- Disponibilidad de agua: fuentes hídricas cercanas para el riego de cultivos bajo los paneles.
- Propietario del predio: los inversionistas son los propietarios del predio.

12.1.2 Microlocalización del proyecto

Para la ubicación de los paneles solares se tiene en cuenta los siguientes criterios:

- Coordenadas geográficas: 5.905856°, -71.907803° (05°54'21", -071°54'28")
- Ubicación de los paneles: el área del predio más cercana a la red de media tensión existente.
- Topografía del área de ubicación de los paneles: el área del predio con inclinación menor a un 5 % o con pendiente leve que favorezca la instalación de paneles solares.
- Tipos de estructuras solares: estructuras solares fijas para permitir la incidencia solar sobre el cultivo agrícola en ciertas horas del día.

12.2 TAMAÑO DE LA GRANJA APV

La capacidad del parque APV se ha limitado estratégicamente a 0,99 MW (990 kW) con el fin de aprovechar los beneficios regulatorios que ofrece el mercado eléctrico colombiano. Este límite permite clasificar el proyecto dentro de la categoría de pequeños proyectos de generación distribuida, lo cual facilita su participación en el mercado no regulado sin requerir una licencia de generación por parte de la CREG ni conexión al SIN. Esta estrategia reduce significativamente los costos y tiempos asociados al desarrollo, tramitología y operación del proyecto. Además, la elección de este tamaño responde a consideraciones técnicas relacionadas con la disponibilidad de espacio agrícola, la compatibilidad con actividades productivas (cultivo o pastoreo) y la optimización del uso del recurso solar sin sobredimensionar la infraestructura eléctrica local. También se busca asegurar la viabilidad económica del proyecto a pequeña escala para hacer más práctica su implementación como modelo replicable en otras zonas rurales del Casanare y del país.

12.3 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La capacidad de generación anual estimada es de 1.515.000 kW/h, calculada a partir del promedio mensual de producción energética. La estimación detallada, obtenida mediante el *software* SOLARGIS, se presenta en la siguiente tabla:

| MES | PVOUT_specific | PVOUT_total | DNI |
|------------|----------------|-------------|--------------------|
| | kWh/kWp | kWh | kWh/m ² |
| Enero | 142,5 | 142.485,4 | 153,6 |
| Febrero | 126,9 | 126.946,1 | 123,5 |
| Marzo | 127,8 | 127.756,9 | 101,7 |
| Abril | 113,6 | 113.645,0 | 86,5 |
| Mayo | 118,8 | 118.828,9 | 102,8 |
| Junio | 109,2 | 109.237,5 | 98,8 |
| Julio | 117,8 | 117.778,8 | 107,8 |
| Agosto | 125,6 | 125.624,6 | 113 |
| Septiembre | 132,5 | 132.538,5 | 121,1 |
| Octubre | 137 | 136.994,1 | 121,5 |
| Noviembre | 128,1 | 128.110,9 | 116,3 |
| Diciembre | 137,3 | 137.335,2 | 141,1 |
| Año | 1.517,1 | 1.517.281,9 | 1.387,7 |

Tabla 3. Tabla de generación promedio mensual SOLARGIS, 2025

Fuente: SOLARGIS (s.f.).

Para efectos de cálculo, se aproxima a 1.515.000 kW/h de generación de energía eléctrica anual.

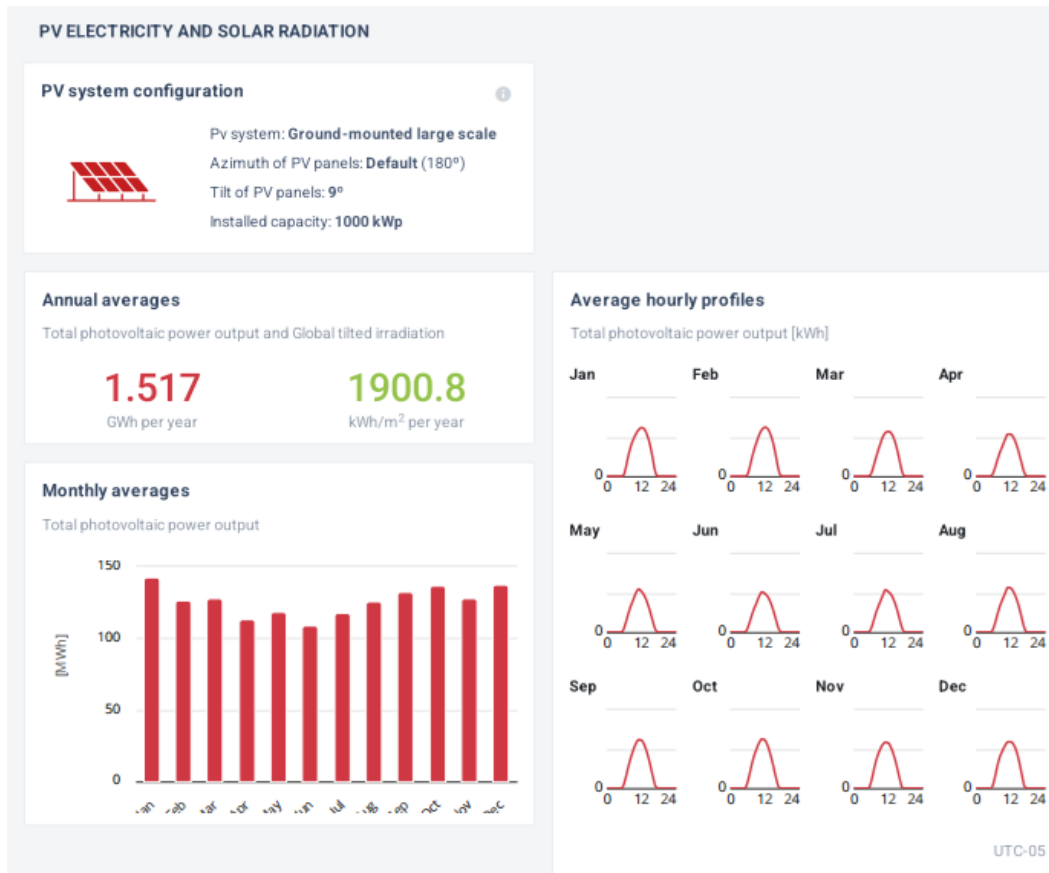


Ilustración 2. Perfil horario promedio de irradiación Wh/m² SOLARGIS, 2025

Fuente: SOLARGIS (s.f.).

12.4 HORIZONTE DE TIEMPO DEL PROYECTO

La granja APV se ha diseñado con un horizonte de tiempo de 20 años, período durante el cual se estima que la infraestructura fotovoltaica operará de manera eficiente y rentable. Esto permite realizar una evaluación técnica, económica y financiera completa, considerando la vida útil de los principales componentes del sistema (como los paneles solares y los inversores), así como los ciclos agrícolas y de mantenimiento asociados. A lo largo de estos 20 años se proyectan ingresos estables por la venta de energía en el mercado no regulado, así como beneficios agroproductivos derivados del uso compartido del terreno. Además, este plazo permite estimar con mayor precisión los flujos de caja, la TIR, el valor presente neto (VPN) y otros indicadores clave de viabilidad del proyecto.

12.5 INGENIERÍA DEL PROYECTO

El diseño de la granja APV contempla una capacidad instalada de 0,99 MW (990 kW), con infraestructura integrada para la producción simultánea de energía solar y actividades agropecuarias. Las obras físicas incluirán la adecuación del terreno, la instalación de estructuras de soporte, paneles solares y vías de acceso. Por tanto, se prioriza un diseño modular que facilite el montaje rápido y reduzca la intervención sobre el suelo productivo.

En consecuencia, se utilizará tecnología fotovoltaica de alta eficiencia, inversores adaptados a las condiciones locales y un sistema de monitoreo digital que permitirá gestionar la producción en tiempo real. La compatibilidad con prácticas agrícolas se garantizará mediante la selección de equipos y alturas adecuadas para los módulos solares.

El proyecto se desarrollará en tres fases: preparación, construcción y operación, con una duración total estimada de seis a ocho meses hasta su entrada en funcionamiento. La programación de actividades se coordinará con el calendario agrícola, buscando minimizar interferencias entre la operación energética y agroproductiva. En cuanto al manejo de insumos, se contemplan prácticas sostenibles tanto en el mantenimiento de la infraestructura eléctrica como en el manejo agrícola, priorizando insumos orgánicos, eficiencia hídrica y criterios de economía circular.

Este enfoque integral garantiza la viabilidad técnica del proyecto, su sostenibilidad operativa a 20 años y su potencial replicabilidad en otras regiones rurales del Casanare y del país.

12.6 CÁLCULOS TÉCNICOS PARA LA GENERACIÓN SOLAR

12.6.1 Cantidad de paneles solares

La cantidad de paneles solares requeridos se obtiene de la división de la capacidad requerida de 0,99 MW (990 kW) sobre la capacidad por panel, que es de 650 W, escogidos para el presente estudio, y da como resultado:

$$\text{Cantidad de paneles} = \frac{990.000 \text{ W}}{650 \text{ W}} \approx 1.523,07$$

Así, se requieren 1.524 paneles solares de 650 W.

12.6.2 Cantidad de inversores

La cantidad de inversores requeridos se obtiene de la división de la capacidad requerida de 0,99 MW (990 kW) sobre la capacidad por inversor, que es de 100 kW, escogidos para el presente estudio, y da como resultado:

$$\text{Cantidad de inversores} = \frac{990 \text{ kW}}{100 \text{ kW}} = 9,9$$

Por tanto, se deben instalar 10 inversores de 100 kW (operando a un 99 % de su capacidad nominal).

12.6.3 Disposición de los inversores

Se recomienda ubicar los inversores en centros agrupados (tipo estaciones o casetas técnicas), instalando de dos a tres por caseta para facilitar mantenimientos y proteger los equipos (cubiertos, con ventilación forzada), un borde de la parcela o en una franja técnica de servicios.

12.6.4 Altura de la estructura

Se recomienda 9° de inclinación de paneles solares, el azimut de 180° con una altura mínima libre para el pastoreo de ganado de 2,5 metros. Con estos datos, se puede encontrar la parte más alta de la estructura realizando el siguiente cálculo:

Configuración recomendada, inclinada: altura al borde inferior: 2,5 metros. Altura borde superior (por inclinación de paneles):

$$\Delta h = longitud \times \text{sen}(9^\circ), \text{ longitud} = 2,0 \text{ m}$$

$$\Delta h = 2,3 \times \text{sen}(9^\circ) \approx 2,3 \times 0.1564 \approx 0.3597 \text{ m}$$

$$\text{Altura máxima} = 2.5 + 0.3597 \approx 2.9 \text{ m}$$

12.6.5 Tipo de estructura

Se recomienda una estructura fija metálica galvanizada, montaje tipo elevado inclinado con el borde inferior de 2,5 metros y el superior de 2,9 metros, fundaciones en pilotes hincados o zapatas de concreto, dependiendo del estudio de suelos.

12.6.6 Cantidad de terreno necesario

Para calcular el área que ocupa el sistema de generación solar, se toman las dimensiones de un panel de 650 W de la ficha técnica: $2,3 \text{ m} \times 1,1 \text{ m} \approx 2,53 \text{ m}^2$. Por ende:

- Área neta ocupada: $1.524 \times 2,53 = 3.857 \text{ m}^2$
- Considerando pasillos, accesos, separación de filas y espacio de ganado (~50 % más):
 $3.857 \times 1,5 = 5.785 \text{ m}^2$.
- Superficie final recomendada: 5.800 m^2 (aproximadamente, 0,58 hectáreas).

12.6.7 Cálculo del transformador para 0,99 MW solar

Para un parque solar de 0,99 MW (990 kW), se calcula primero la potencia nominal requerida y luego se aplica un margen de seguridad. Suponiendo factor de potencia ≈ 1 (los inversores fotovoltaicos suelen inyectar básicamente potencia activa), la potencia aparente necesaria es ~ 990 KVA. Con un margen de seguridad del 10–20% se considera por ejemplo un 20% extra: Potencia real con margen: $0,99 \text{ MW} \times 1,20 = 1,188 \text{ MW}$. Considerando una eficiencia del transformador $\sim 98\%$, la potencia aparente requerida se ajusta: $1,188 \text{ MW} / 0,98 \approx 1,212 \text{ MVA}$ (1212 kVA). Así, se requiere un transformador de alrededor de 1,2–1,25 MVA. Según especificaciones de fabricantes, transformador 1.250 kVA 13,2 kV/208 V - 60 Hz.

12.6.8 Cálculo del conductor aéreo para la red trifásica:

La red trifásica por construir tiene una distancia aproximada de 300 m, una tensión de 13.200 V, una potencia aparente (S) de 1250 kVA, frecuencia de 60 Hz. El material del conductor es de aluminio con alma de acero (ACSR), con una caída de tensión permitida del 3%. Con estos datos se calculó la corriente de línea:

Primero, la corriente trifásica:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \times V}$$

$$I \approx 54.69 \text{ A}$$

Caída de tensión permitida: si acepta una caída de tensión del 3%:

$$\Delta V = 0.03 \times 13.200 \text{ V} = 396 \text{ V}$$

Sección del conductor: se usó la fórmula de caída de tensión en trifásico:

$$\Delta V = 3 \times I \times R$$

$$\text{donde } R = \rho \times \frac{2L}{S}, \text{ donde:}$$

ρ = resistividad del material: Aluminio: $0,0285 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

L = longitud en metros (300 m)

S = sección en mm^2

Luego, se reorganizó para despejar S :

$$S = \frac{2 \times \rho \times L \times \sqrt{3} \times I}{\Delta V} \quad S \approx 2.55 \text{mm}^2$$

Este valor es pequeño porque la corriente es relativamente baja, la tensión es alta y la red es aérea. Normalmente, para instalaciones aéreas se usan calibres estándar (AWG o mm^2 comercial). En la práctica, por normas mecánicas, térmicas y eléctricas, se usa: en aluminio, 2/0 AWG o 50mm^2 . Además, para redes de media tensión (13,2 kV), por regulación y seguridad, se usan conductores reforzados tipo ACSR (aluminio con alma de acero) y el conductor recomendado es de 2/0 ACSR.

12.7 PRESUPUESTO DE INVERSIONES

12.7.1 Presupuesto estimado del proyecto APV (Capex)

Los datos técnicos de la cantidad de paneles solares, inversores, tipo y elevación de estructura, la red de media tensión a construir, la capacidad del transformador a instalar, el tiempo estimado de construcción y el transporte de materiales permite estimar el presupuesto para la implementación del sistema de generación solar en COP 2.840.000.000, discriminados en los siguientes rublos:

| | |
|--|-----------------------------|
| Total, costo directo proyecto (Capex) | \$ 2.840.000.000 |
| Materiales de generación solar fotovoltaica | \$ 1.900.000.000 |
| Estructura de soporte | \$ 450.000.000 |
| Red trifásica, transformador y medición | \$ 145.000.000 |

| | |
|--|-------------------|
| Mano de obra civil | \$ 125.000.000 |
| Mano de obra instalación eléctrica sistema de generación solar | \$ 170.000.000 |
| Transporte de materiales | \$ 50.000.000 |

Tabla 4. Presupuesto estimado costo directo APV (Capex) (COP)

Fuente: elaboración propia.

Los gastos preoperativos incluyen los costos de estudio y diseños, los premisos y las legalizaciones, la administración del proyecto y los costos por la actividad ganadera durante ocho meses, dando como resultado COP 300.000.000, discriminados en los siguientes rublos:

| | |
|--|-----------------------|
| Total, gastos preoperativos | \$ 300.000.000 |
| Ingeniería estimada (Estudios y diseños) | \$ 70.000.000 |
| Permisos y legalización proyecto | \$ 40.000.000 |
| Administración proyecto y gastos ganadería 8 meses | \$ 190.000.000 |

Tabla 5. Presupuesto estimado costo directo APV (Capex) (COP)

Fuente: elaboración propia.

12.7.2 Presupuesto anual de operación APV (Opex)

El presupuesto de operación anual del sistema de generación solar incluye los siguientes costos: tres hidrolavados de los paneles solares al año para la eficiencia del sistema, una inspección técnica anual, los gastos administrativos, la mano de obra, el monitoreo remoto, una partida para mantenimiento correctivo y el pago de un seguro básico de operación, obteniendo el siguiente resultado:

| Total, presupuesto anual mantenimiento parque fotovoltaico | | | | | \$ 113.400.000 |
|---|---|---------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| Ítem | Descripción | Unidad | Cantidad | Valor unitario | Valor total |
| 1 | Hidro lavado de paneles solares (3 veces/año) | Unidad | 3 | \$ 5.000.000 | \$ 15.000.000 |
| 2 | Inspección técnica anual | Unidad | 1 | \$ 3.000.000 | \$ 3.000.000 |
| 3 | Administración (Aux admón.+ contabilidad) | Unidad | 12 | \$ 3.000.000 | \$ 36.000.000 |

| | | | | | |
|---|--|--------|----|---------------|---------------|
| 4 | Mano de obra (Técnico) | Unidad | 12 | \$ 2.500.000 | \$ 30.000.000 |
| 5 | Monitoreo remoto | Unidad | 12 | \$ 950.000 | \$ 11.400.000 |
| 6 | Mantenimiento correctivo (repuestos menores) | GL | 1 | \$ 8.000.000 | \$ 8.000.000 |
| 7 | Seguro básico de operación (opcional) | GL | 1 | \$ 10.000.000 | \$ 10.000.000 |

Tabla 6. Tabla de presupuesto mantenimiento APV (Opex) (COP)

Fuente: elaboración propia.

12.7.3 Presupuesto anual para gasto en ganadería

La operación anual ganadera incluye los siguientes costos: alimentación suplementaria del ganado bovino, gastos de veterinarios, desparasitantes, vitaminas, mano de obra para el cuidado del ganado, transporte y costos administrativos, obteniendo el siguiente resultado:

| Presupuesto anual gastos ganadería | | | | | \$ 46.600.000 |
|------------------------------------|---|--------|----------|----------------|---------------|
| Item | Descripción | Unidad | Cantidad | Valor unitario | Valor total |
| 1 | Alimentación suplementaria (sal mineral, melaza, bloques nutricionales) | Unidad | 6 | \$ 500.000 | \$ 3.000.000 |
| 2 | Gastos veterinarios (vacunas, desparasitantes, vitaminas) | Unidad | 1 | \$ 3.000.000 | \$ 3.000.000 |
| 3 | Mano de obra (Técnico) | Unidad | 12 | \$ 2.000.000 | \$ 24.000.000 |
| 4 | Reposición y manejo de ganado (transporte, marcas, compra ocasional) | GL | 1 | \$ 10.000.000 | \$ 5.000.000 |
| 5 | Mantenimiento de potreros (cercas, bebederos, pasturas) | Unidad | 12 | \$ 250.000 | \$ 3.000.000 |
| 6 | Reparaciones menores y herramientas | Unidad | 12 | \$ 300.000 | \$ 3.600.000 |
| 7 | Costos administrativos y transporte (guías, movilización, ventas) | GL | 1 | \$ 10.000.000 | \$ 5.000.000 |

Tabla 7. Tabla de presupuesto anual para gasto en ganadería (COP)

Fuente: elaboración propia.

13. ESTUDIO AMBIENTAL

13.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El predio se ubica en la vereda La Peral, del municipio de Paz de Ariporo, Casanare, en las coordenadas geográficas: 5.905856°, -71.907803° (05°54'21", -071°54'28"). El tipo de terreno es llano y actualmente el uso del suelo se destina para la producción de ganadería bovina.

De acuerdo con el estudio técnico, para una capacidad de generación de energía eléctrica de 0,99 MW se requieren 1.524 paneles solares de 650 Wp. Con el fin de permitir el pastoreo del ganado, los módulos se instalarían sobre una estructura cuyo borde inferior sería de 2,5 metros y el borde superior (por inclinación de paneles) sería de 2,9 metros, ocupando una superficie de 5.800 m² (aproximadamente, 0,58 hectáreas). El sistema de generación solar es de tipo *off-grid* (sin baterías), conexión directa a red media tensión que se ubica a 300 metros.

El tiempo proyectado para realizar la planeación y construcción del sistema solar es de 6 a 8 meses. Una vez el sistema comience la operación se estima un horizonte de tiempo del proyecto de 20 años.

13.2 TRÁMITE ANTE AUTORIDAD AMBIENTAL:

Debido a que la capacidad de generación de energía eléctrica es menor a 1 MW y que la granja no se encuentra ubicada en un parque nacional ni en un área protegida, no se requiere licencia ambiental. Se debe radicar una solicitud de evaluación previa o de no requerimiento de licencia ambiental ante la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial de la Macarena (Cormacarena), con los siguientes documentos: memoria técnica del proyecto, planos de ubicación geográfica, descripción de impactos ambientales, registro de predios y uso actual del suelo.

13.3 CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL BÁSICA

- Clima y precipitación: el área de influencia del proyecto tiene clima tropical de sabana, se presentan lluvias entre los meses de abril hasta noviembre, la precipitación media anual es aproximadamente de 2.959 mm, con una temperatura promedio de 23,3 °C.
- Suelo y geomorfología: el terreno es llano, apto para ganadería y con alta capacidad portante (> 1 kg/cm²) para estructuras livianas como son los sistemas de generación solar.
- Biodiversidad: el área está intervenida, dedicada a pastos ganaderos, y no se identifican especies endémicas o protegidas en la zona.
- Recursos hídricos: no hay cuerpos de agua superficial en el área directa de influencia del proyecto, no se prevé afectación a acuíferos.

13.4 IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES

De acuerdo con el tipo de intervención proyectada, se presenta la matriz de identificación de impactos ambientales en cada una de las fases, el impacto, el tipo de impacto, su intensidad y el manejo propuesto:

| Fase | Impacto | Tipo | Intensidad | Manejo propuesto |
|--------------|---|----------|------------|--|
| Construcción | Emisión de polvo y ruido | Negativo | Bajo | Riego de caminos, horario controlado |
| Construcción | Manejo de residuos sólidos | Negativo | Medio | Separación de residuos, disposición selectiva |
| Operación | Alteración visual mínima | Negativo | Bajo | Integración paisajística |
| Operación | Reducción de emisiones de CO ₂ | Positivo | Alto | Generación de energía eléctrica limpia, desplazamiento térmico |
| Operación | Sistema solar puesto a tierra | Positivo | Alto | Protege al ganado de electrocución por descargas atmosféricas |
| Operación | Sombra parcial para el ganado | Positivo | Medio | Reduce el estrés térmico del ganado |

Tabla 8. Tabla de identificación de impactos ambientales

Fuente: elaboración propia.

13.5 PLAN DE MANEJO AMBIENTAL (PMA)

- Subprogramas: para la ejecución del PMA se proponen los siguientes subprogramas: manejo de residuos de construcción, control de emisiones atmosféricas, educación y sensibilización ambiental para operarios, monitoreo bianual de cobertura vegetal.
- Indicadores de seguimiento: se proponen los siguientes indicadores: cumplimiento del plan de residuos (> 90 %); y quejas por ruido o polvo: 0, mantenimiento mensual preventivo.

13.6 PLAN DE CONTINGENCIA

Para controlar los riesgos que se pudiesen llegar a materializar, se proponen los siguientes planes de contingencia: dotar el campo de extintores tipo ABC para control de incendios, capacitar al personal de operación en el plan de emergencias, dotar el campo de kit de derrames para controlar vertimientos accidentales (aceites, lubricantes), instalar dispositivos de sobretensión (DPS) y sistema de puesta a tierra para drenar las sobretensiones generadas por descargas atmosféricas, coordinar con el operador de red ENERCA S.A. E.S.P. y con los bomberos del municipio en caso de una emergencia del sistema eléctrico.

13.7 CIERRE Y DESMONTAJE

Una vez terminado el tiempo de operación del sistema de generación solar, se debe proceder a desarmar la estructural sin uso de explosivos ni maquinaria pesada, disponer los materiales reciclables como estructuras, cables, paneles solares, inversores, entre otros, y recuperar el terreno donde se haya ubicado las estructuras metálicas de soporte, compactando el suelo y revegetando el área.

14. ESTUDIO ORGANIZACIONAL Y LEGAL

14.1 TIPO DE ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

La forma jurídica más flexible y común para proyectos empresariales es sociedad por acciones simplificada (S.A.S.).

14.2 ORGANIGRAMA

De acuerdo con el estudio técnico, para la administración de la construcción del proyecto de generación solar se requiere: a) dirección del proyecto: 1 persona (gerente general o director del proyecto, contrato a término fijo por 8 meses); b) asistencia administrativa: 1 persona (técnica administrativa, contrato a término indefinido); c) asesoría contable: 1 persona (contador público con tarjeta profesional vigente, contrato por prestación de servicios). Para la construcción del proyecto de generación solar se estima el siguiente recurso humano administrativo y operativo.

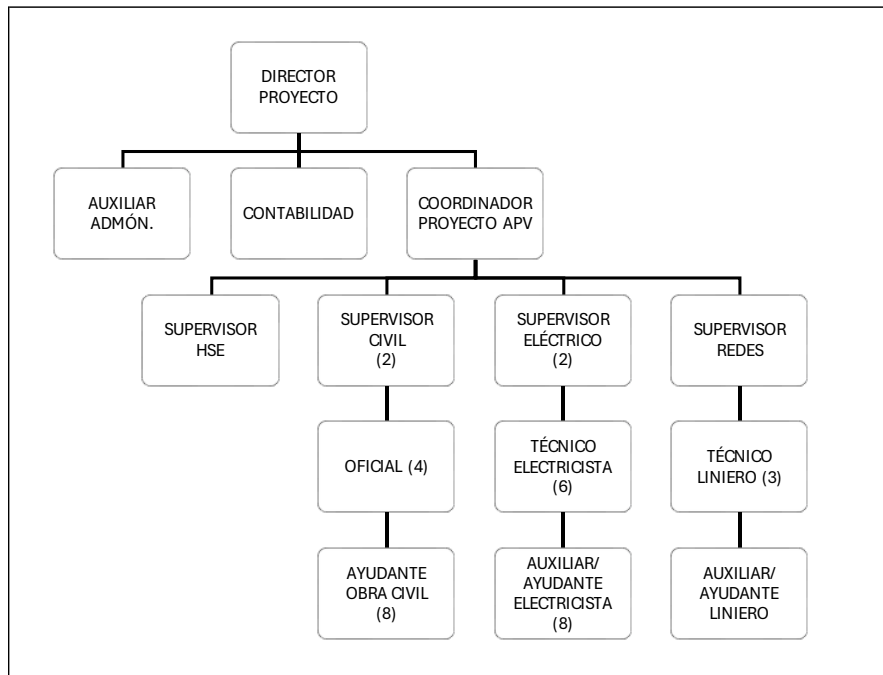


Ilustración 3. Organigrama ejecución proyecto de generación solar

Fuente: elaboración propia.

Para la operación anual de la granja APV se estiman los siguientes recursos humanos: a) administrador: 1 persona con experiencia en administración (contrato de prestación de servicios); b) asistencia administrativa: 1 persona (técnica administrativa, contrato a término indefinido); c) asesoría contable: 1 persona (contador público con tarjeta profesional vigente, contrato por prestación de servicios); d) auxiliar/ayudante electricista: 1 persona (ayudante electricista, contrato a término fijo); e) labriego: 1 persona (trabajador con experiencia en ganado bobino, contrato a término fijo).

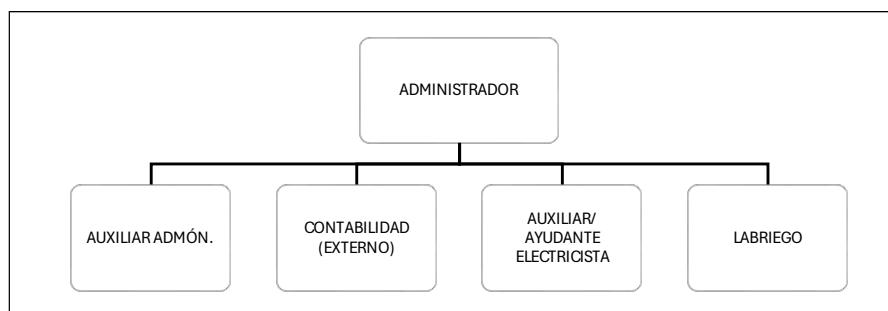


Ilustración 4. Operación granja APV

Fuente: elaboración propia.

14.3 MANEJO DE CONTRATOS

Los tipos de contratos que serán necesarios para la fase de ejecución del proyecto. Estos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Contratos de compra de equipos: contrato con garantía y soporte técnico de los paneles solares, inversores, estructuras metálicas, tableros eléctricos, transformador, y demás materiales eléctricos.
- Contratos de suministros y transporte: insumos agrícolas (fertilizantes, semillas, agua), materiales eléctricos, servicios logísticos para transporte de equipos y materiales. Contratos marco o por pedido específico.

- Contratos de asesorías y consultorías: estudios técnicos (diseño APV, estudios ambientales, ingeniería), financieros y legales. Contratos de prestación de servicios profesionales.
- Contratos laborales: para el personal operativo agrícola y técnico pueden ser contratos directos (a término fijo, indefinido, obra o labor) o tercerización a través de cooperativas o empresas de servicios temporales.

14.4 REQUERIMIENTOS LEGALES

Para la aprobación de los diseños y la construcción del sistema de generación solar se deben realizar los siguientes trámites de acuerdo con la normativa actual:

- Licencias y permisos ambientales: permiso ambiental o concepto de no requerimiento (según el tamaño del proyecto) ante Cormacarena. Para proyectos de menos de 1 MW no se requiere licencia ambiental, generalmente se requiere una evaluación ambiental simplificada. Además, del uso del recurso hídrico, si se extrae agua superficial o subterránea. El permiso de vertimientos, si aplica, y el trámite de registro de predio con uso agrícola ante el ICA (si no lo tiene).
- Registros y trámites empresariales: para facilitar el contrato bilateral de venta de energía, la exenciones o beneficios de renta, la protección del patrimonio y el cruce de IVA se recomienda la creación de una S.A.S., para lo cual se debe gestionar el registro de la empresa en la Cámara de Comercio, el Registro Único Tributario (RUT) ante la DIAN, la inscripción en el régimen de facturación electrónica y la obtención del NIT.
- Trámites energéticos: el proyecto de generación de energía renovable debe registrarse ante la UPME para acceder a los beneficios establecidos en la Ley 1715 de 2014. Este registro es un requisito para la obtención de incentivos tributarios y arancelarios. Para la conexión de la APV a la red existente de media tensión (13.200 voltios) se requiere la aprobación del operador de red local, en este caso, ENERCA S.A. E.S.P., para lo cual es necesario cumplir con los

requisitos técnicos y de seguridad establecidos por la CREG y el operador de red. Se debe gestionar un contrato bilateral a largo plazo con ENERCA o con una empresa privada que requiera el servicio.

- Pago de seguridad social y laboral: todo el personal directo o de un contratista debe estar afiliado a la EPS, ARL, pensión y caja de compensación. Se debe cumplir con los estándares mínimos del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST), conforme con el Decreto 1072 de 2015 y la Resolución 0312 de 2019. Además, se debe registrar ante el ICA la actividad ganadera.
- Requisitos tributarios: se deben pagar los impuestos de renta, ICA, IVA (según actividad económica), teniendo en cuenta en la liquidación anual las exenciones o beneficios por inversión en energías renovables (Ley 1715 de 2014 y Ley 2099 de 2021).

15. ESTUDIO ECONÓMICO

15.1 PRESUPUESTO DE INVERSIONES

15.1.1 Inversiones fijas

De acuerdo con el estudio técnico, la implementación del sistema de generación solar tiene un presupuesto de COP 2.840.000.000. Esto incluye la compra e instalación de paneles solares, inversores, obras civiles, estructura de soporte, la red de media tensión a construir, el transformador a instalar, la mano de obra civil y eléctrica, y el transporte de materiales. No se requiere inversión en compra o alquiler del terreno, la finca es propiedad de los inversionistas.

15.2 INVERSIONES DIFERIDAS

Los gastos preoperativos con un presupuesto de COP 300.000.000, que incluye los costos de estudio y diseños, los permisos y legalizaciones, la administración del proyecto y los costos por la actividad ganadera durante ocho meses.

15.3 CAPITAL DE TRABAJO

Los inversionistas cuentan con un capital de trabajo en efectivo y bancos de COP 180.000.000.

15.4 PRESUPUESTO DE COSTOS DE OPERACIÓN

De acuerdo con el estudio técnico, para la operación de la granja APV se requieren las siguientes inversiones.

15.4.1 Costos de operación

El presupuesto de operación anual de COP 113.400.000 del sistema de generación solar incluye los siguientes costos: tres hidrolavados de los paneles solares al año para la eficiencia del sistema, una inspección técnica anual, los gastos administrativos, la mano de obra, el monitoreo remoto, una partida para mantenimiento correctivo y el pago de un seguro básico de operación.

El presupuesto de operación anual ganadera de COP 46.600.000 incluye los siguientes costos: alimentación suplementaria del ganado bovino, gastos de veterinarios, desparasitantes, vitaminas, mano de obra para el cuidado del ganado, transporte y costos administrativos.

15.4.2 Costos por depreciación y amortización

El costo de la inversión del proyecto de generación solar el cual se estima en COP 2.840.000.000, que se deprecia en 10 años. El costo de los activos diferidos o intangibles como los gastos preoperacionales están estimados en COP 300.000.000, y se amortiza en 5 años.

15.4.3 Costos financieros

Los intereses del capital de trabajo el cual tiene la suma de COP 180.000.000, y son costos deducibles de impuestos.

Para la ejecución del proyecto, cuyo presupuesto es de COP 3.320.000.000, se recomienda apalancar con crédito el 90 % de la inversión total, con un plazo de 10 años, y un interés efectivo anual de 12 %, para lo cual hay que presentar el cierre financiero y el contrato bilateral a la entidad bancaria. De acuerdo con el flujo de caja, se debe amortizar la suma de COP 2.300.286.825.

15.5 PRESUPUESTO DE INGRESOS

De acuerdo con el estudio de mercado, la energía destinada a usuarios del mercado no regulado se comercializa a un precio libremente pactado entre las partes, es decir, no está sujeta a una tarifa regulada. Tomando como referencia un precio de COP 400 por kWh y una capacidad anual de generación de 1.515.000 kWh, se estima que los ingresos por venta de energía alcanzarían COP \$606.000.000. Además, tomando como referencia la información del propietario de la finca y los precios del mercado, los ingresos anuales por venta de ganado se estiman en COP 174.490.000.

Por tanto, el total de ingresos operacionales anuales se estima en COP 780.490.000.

15.6 CONSTRUCCIÓN DE LOS FLUJOS DE CAJA

Para la construcción del flujo de caja se tuvieron en cuenta las variables horizonte de tiempo del proyecto en 20 años, con inversiones fijas de COP 2.840.000.000, inversiones diferidas de COP 300.000.000, ingresos operativos y costos operativos de COP 606.000.000, depreciación de activos a 10 años, amortización de costos preoperacionales a 5 años, el 90 % de la inversión total, la utilidad antes de impuestos, los impuestos del 33 %, y el capital de trabajo de COP 180.000.000. Se simularon 5 escenarios: cuotas fijas, abono constante de capital, intereses constantes, pago total al fina y cuotas decrecientes geométricas. A continuación, se presenta el resumen de escenarios:

| Resumen del escenario | | | | | | | |
|-----------------------------|--|----------------|---------------|----------------------|----------------------|------------------|--------------------|
| | Valores actuales: ujo de caja del proyecto | | Cuotas fijas | Abono constante de K | Intereses constantes | Pago total final | Cuotas decrec geom |
| Celdas cambiantes: | | | | | | | |
| SK\$41 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Celdas de resultado: | | | | | | | |
| FC_0 | -332.000.000 | -3.320.000.000 | -332.000.000 | -332.000.000 | -332.000.000 | -332.000.000 | -332.000.000 |
| FC_1 | 91.661.317 | 620.490.000 | 91.661.317 | -36.870.000 | 261.930.000 | 620.490.000 | -8.778.703 |
| FC_2 | 91.661.317 | 620.490.000 | 91.661.317 | -1.014.000 | 261.930.000 | 620.490.000 | 22.684.732 |
| FC_3 | 91.661.317 | 620.490.000 | 91.661.317 | 34.842.000 | 261.930.000 | 620.490.000 | 52.574.996 |
| FC_4 | 91.661.317 | 620.490.000 | 91.661.317 | 70.698.000 | 261.930.000 | 620.490.000 | 80.970.746 |
| FC_5 | 91.661.317 | 620.490.000 | 91.661.317 | 106.554.000 | 261.930.000 | 620.490.000 | 107.946.709 |
| FC_6 | 91.661.317 | 620.490.000 | 91.661.317 | 142.410.000 | 261.930.000 | 620.490.000 | 133.573.873 |
| FC_7 | 91.661.317 | 620.490.000 | 91.661.317 | 178.266.000 | 261.930.000 | 620.490.000 | 157.919.680 |
| FC_8 | 91.661.317 | 620.490.000 | 91.661.317 | 214.122.000 | 261.930.000 | 620.490.000 | 181.048.196 |
| FC_9 | 91.661.317 | 620.490.000 | 91.661.317 | 249.978.000 | 261.930.000 | 620.490.000 | 203.020.286 |
| FC_10 | 91.661.317 | 620.490.000 | 91.661.317 | 285.834.000 | -2.726.070.000 | 620.490.000 | 223.893.772 |
| FC_11 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 |
| FC_12 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 |
| FC_13 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 |
| FC_14 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 |
| FC_15 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 | 620.490.000 |
| FC_16 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 |
| FC_17 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 |
| FC_18 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 |
| FC_19 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 | 415.728.300 |
| FC_20 | 1.166.568.300 | 1.166.568.300 | 1.166.568.300 | 1.166.568.300 | 1.166.568.300 | 1.166.568.300 | 1.166.568.300 |
| TIO | 18% | 18% | 18% | 18% | 18% | 18% | 18% |
| VPN | 586.656.431 | -24.741.834 | 586.656.431 | 523.647.171 | 780.957.957 | 2.963.258.166 | 540.292.826 |
| TIR | 35% | 18% | 35% | 29% | 77% | 187% | 30% |
| BAUE | 109.599.143 | -4.622.269 | 109.599.143 | 97.827.755 | 145.898.551 | 553.595.835 | 100.937.496 |
| RBC | 1,08 | 0,99 | 1,08 | 1,07 | 1,12 | 1,69 | 1,08 |
| PRI | 6,34 | 11,00 | 6,34 | 9,13 | 12,02 | 14,00 | 8,61 |

Tabla 9. Tabla matriz de impacto del proyecto granja APV

Fuente: elaboración propia.

15.7 EVALUACIÓN FINANCIERA

- Estructura financiera del proyecto: recursos propios de COP 180.000.000 CO (5 %) en efectivo y bancos, además del terreno propiedad del inversionista.
- Financiación: apalancamiento mediante crédito con plazo de pago a 10 años del 90 % de la inversión, equivalente a COP 2.988.000.000.
- Condiciones financieras: tasa de interés de 12% anual, plazo a 10 años y sistema de amortización 5 años.
- Tasa mínima de retorno aceptable (TIO) o costo de oportunidad del capital exigido por el inversionista: 18% para la evaluación del proyecto.
- Exención de impuestos: 15 años de impuestos (33 %) por un valor total de COP 1.276.130.848, equivalente al 38 % del valor del proyecto < al 50% que autoriza el Estado.

El proyecto APV evaluado tiene los siguientes indicadores de rentabilidad de acuerdo con el flujo de caja de la opción 1 de cuotas fijas:

- VPN: COP 586.656.431, el valor positivo indica que el proyecto genera valor superior a la TIO.
- TIR: 35 %, cifra muy superior a la TIO, lo cual indica que el proyecto es rentable, facilita la aprobación del crédito y la confianza del inversionista.
- Horizonte del proyecto: teniendo en cuenta la vida útil de los equipos (paneles solares, cable, equipos de medición, transformador), se estima la reinversión de COP 200.000.000 en el año 11 para el cambio de los inversores en un tiempo de 20 años.
- Beneficio anual uniforme equivalente (BAUE): COP 109.599.143, rentabilidad anual promedio.
- Relación beneficio/costo (RBC): $1,08 > 1$, económicamente viable.
- Periodo de recuperación de la inversión: 6,34, rápida recuperación de la inversión.

16. ANÁLISIS DE RIESGO Y SENSIBILIDAD

16.1 ANÁLISIS PESTEL DEL PROYECTO GRANJA APV

De acuerdo con los estudios preliminares, se realizó el siguiente análisis PESTEL para identificar los riesgos asociados a la implementación y operación de la granja APV:

| | P | E |
|---|---|--|
| 1 | Debido a la inestabilidad política a nivel nacional, existe el riesgo de cambios abruptos en la política pública, lo que, a su vez, podría repercutir en la no ejecución del proyecto. | Debido a la variación de la tasa de cambio, existe el riesgo de afectar el costo de los equipos de generación eléctrica, lo que, a su vez, podría repercutir en sobrecostos del proyecto. |
| 2 | Debido a cambios políticos, existe el riesgo de la estatización de la infraestructura eléctrica, lo que, a su vez, podría repercutir pérdida parcial o total del control operativo del proyecto. | Debido al retrasos en el pago de energía por parte del operador, existe el riesgo de afectar el flujo de caja proyectado, lo que, a su vez, podría repercutir el no pago de la deuda o sobrecostos por pago de intereses de mora. |
| | S | T |
| 1 | Debido a conflictos sociales, existe el riesgo de bloqueos de vías que obstaculicen el transporte de equipos o personal, lo que, a su vez, podría repercutir en sobrecostos del proyecto por incumplimiento en la fecha de entrada en operación. | Debido a falla en los equipos de generación solar (inversores, paneles solares, medición, transformación), existe el riesgo de tener pérdidas técnicas, lo que, a su vez, podría repercutir en los sobrecostos por mantenimiento y la disminución de ingresos operacionales. |
| 2 | Debido a robo o vandalismo al sistema de generación solar, existe el riesgo de disminuir la producción de energía eléctrica, lo que, a su vez, podría repercutir en menor producción anual de energía esperada, afectando los ingresos operacionales. | Debido a falla en el diseño del sistema de generación solar, existe el riesgo de subdimensión el sistema, lo que, a su vez, podría repercutir, en menor producción anual de energía esperada, afectando los ingresos operacionales. |
| | E | L |
| 1 | Debido a inundaciones prolongadas, existe el riesgo de tener retrasos en las obras civiles, lo que, a su vez, podría repercutir en sobrecostos del proyecto. | Debido a demora en los permisos ambientales o de conexión a la red, existe el riesgo de tener retrasos en la entrada en operación del sistema solar, lo que, a su vez, podría repercutir en sobrecostos preoperacionales del proyecto. |
| 2 | Debido a niveles de irradiación menor al esperado, existe el riesgo de tener menor producción de energía, lo que, a su vez, podría repercutir en la disminución de ingresos operacionales. | Debido a cambios de normatividad legal, existe el riesgo de pérdida del alivio fiscal de exoneración de impuestos, lo que, a su vez, podría repercutir la disminución de ingresos operacionales afectando el pago de la deuda. |

Tabla 10. Tabla de análisis PESTEL del proyecto granja APV

Fuente: elaboración propia.

16.2 MATRIZ DE IMPACTO DEL PROYECTO GRANJA APV

| ID | PROBABILIDAD | IMPACTO | CALIFICACIÓN (P+I)/2 | FECHA DEL RIESGO | ESTRATEGIA DE RESPUESTA | DUEÑO |
|----|--------------|---------|-------------------------|---------------------|-------------------------------|----------------|
| P1 | 20 | 20 | 20 | Indeterminada | Asumir | Inversionista |
| P2 | 20 | 20 | 20 | Indeterminada | Asumir | Inversionista |
| E1 | 50 | 20 | 35 | Indeterminada | Reducir | Inversionista |
| E2 | 30 | 20 | 25 | Indeterminada | Transferir | Operador local |
| S1 | 70 | 20 | 45 | Indeterminada | Asumir | Inversionista |
| S2 | 50 | 30 | 40 | Indeterminada | Reducir | Inversionista |
| T1 | 40 | 20 | 30 | Indeterminada | Reducir | Inversionista |
| T2 | 20 | 60 | 40 | Indeterminada | Asumir | Inversionista |
| E1 | 30 | 20 | 25 | Indeterminada | Asumir | Inversionista |
| E2 | 50 | 50 | 50 | Indeterminada | Asumir | Inversionista |
| L1 | 60 | 40 | 50 | Indeterminada | Asumir | Inversionista |
| L2 | 40 | 80 | 60 | Indeterminada | Transferir | Inversionista |

Tabla 11. Tabla matriz de impacto del proyecto granja APV

Fuente: elaboración propia.

Criterios de evaluación:

| | |
|----------------|-----------------|
| Priority Score | Priority Rating |
| 0 - 20 | Muy bajo |
| 21 - 40 | Bajo |
| 41 - 60 | Medio |
| 81 -100 | Muy alto |

16.3 MAPA DE RIESGO DEL PROYECTO GRANJA APV

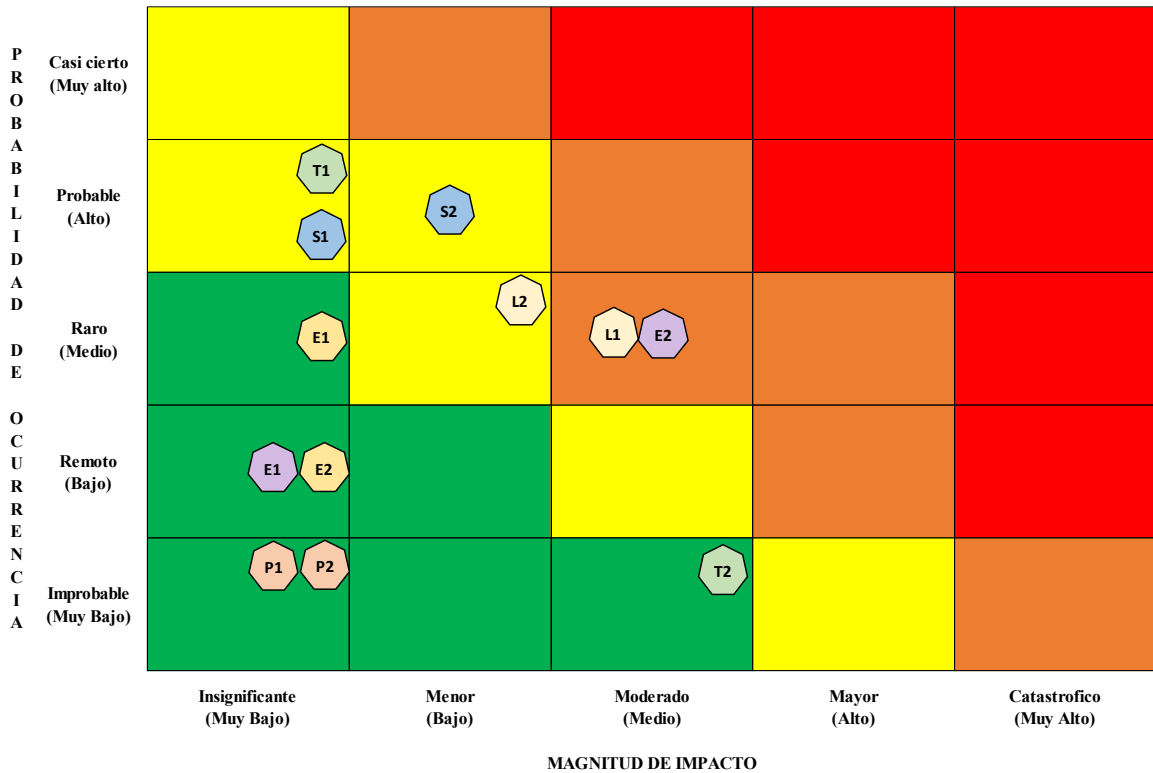


Ilustración 5. Mapa de riesgo proyecto granja APV

Fuente: elaboración propia.

16.4 ACCIONES DE MITIGACIÓN DE RIESGOS

16.4.1.1 Político

| Riesgo | Acción de mitigación |
|--|---|
| Cambios abruptos en la política pública | Establecer convenios institucionales con diferentes niveles de gobierno. Realizar seguimiento activo a la agenda legislativa y política. Mantener relaciones públicas con autoridades locales y nacionales. |
| Estatización de la infraestructura eléctrica | Estructurar el proyecto como alianza público-privada (APP) o con participación comunitaria. Asegurar contratos de largo plazo con cláusulas de compensación. Diversificar fuentes de ingreso. |

16.4.1.2 Económico

| Riesgo | Acción de mitigación |
|--|--|
| Variación de la tasa de cambio | Negociar compras en pesos colombianos o usar coberturas cambiarias. Planificar reservas para cubrir sobrecostos. Comprar anticipadamente equipos críticos. |
| Retrasos en el pago de la energía por parte del operador | Establecer garantías contractuales (fianzas, pólizas). Seleccionar compradores con alta calificación crediticia. Mantener un fondo de contingencia para flujo de caja. |

16.4.1.3 Social

| Riesgo | Acción de mitigación |
|--|---|
| Bloqueos de vías por conflictos sociales | Desarrollar un plan de relacionamiento comunitario. Incluir mano de obra local en el proyecto. Implementar mecanismos de diálogo y participación. |
| Robo o vandalismo | Instalar sistemas de seguridad (cámaras, cercas, vigilancia). Establecer alianzas con la comunidad para vigilancia participativa. Contratar seguros contra daños. |

16.4.1.4 Técnico

| Riesgo | Acción de mitigación |
|---------------------------------|--|
| Fallas técnicas en equipos | Adquirir equipos de proveedores reconocidos. Establecer contratos de mantenimiento preventivo. Realizar pruebas de calidad y auditorías técnicas periódicas. |
| Subdimensionamiento del sistema | Realizar estudios de ingeniería de detalle con validación de expertos. Simular distintos escenarios de demanda y producción. |

16.4.1.5 Ecológico/Ambiental

| Riesgo | Acción de mitigación |
|--------------------------|--|
| Inundaciones prolongadas | Diseñar drenajes adecuados en el terreno. Escoger sitios elevados o con bajo riesgo de inundación. Ajustar el cronograma de obras en época seca. |

| Riesgo | Acción de mitigación |
|--|---|
| Niveles de irradiación menores al esperado | Usar datos históricos satelitales y locales para proyecciones. Incluir márgenes de seguridad en el modelo financiero. Diseñar un sistema con capacidad adaptable. |

16.4.1.6 Legal

| Riesgo | Acción de mitigación |
|--|--|
| Demoras en permisos ambientales o de conexión | Iniciar trámites anticipadamente. Asesorarse con expertos legales y ambientales. Hacer seguimiento constante a los procesos con las entidades competentes. |
| Pérdida de alivios fiscales o cambios normativos | Estructurar el proyecto para calificar bajo diferentes regímenes. Incorporar cláusulas contractuales de estabilidad jurídica si aplica. Evaluar el impacto tributario en distintos escenarios. |

17. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

17.1. CONCLUSIONES

- Viabilidad técnica comprobada: el análisis de radiación solar en Paz de Ariporo muestra niveles óptimos para el aprovechamiento fotovoltaico. La coexistencia con actividades ganaderas es factible mediante la implementación de estructuras elevadas.
- Potencial de generación energética: el sistema fotovoltaico propuesto tendría una capacidad de generación anual aproximada de 1.515.000 kWh, contribuyendo significativamente al suministro de energía en el mercado no regulado.
- Rentabilidad económica favorable: el análisis financiero muestra un VPN de COP 586.656.431, lo cual indica que el proyecto genera valor por encima de la tasa de oportunidad.
- La TIR del 35 % es muy superior a la Tasa de Oportunidad (TIO), lo cual respalda la viabilidad económica del proyecto y aumenta la confianza para inversionistas y financiadores.
- El BAUE es de COP 109.599.143, reflejando una rentabilidad promedio constante durante la vida útil del proyecto.
- La RBC es de 1,08 (> 1), lo cual confirma que el proyecto es económicamente viable.
- El período de recuperación de la inversión es de 6,34 años, lo cual implica una rápida recuperación del capital invertido.
- El horizonte del proyecto es de 20 años. Se considera una reinversión estimada de COP 200.000.000 en el año 11 para el reemplazo de inversores.
- Beneficios ambientales y sociales: el proyecto reduce la huella de carbono, mejora el bienestar animal y genera empleo en la comunidad local.
- Riesgos identificados y mitigables: los riesgos técnicos, financieros y ambientales están debidamente identificados y se han propuesto estrategias de mitigación adecuadas.

17.2 RECOMENDACIONES

- Avanzar a la fase de factibilidad con estudios más detallados de ingeniería, ambientales y financieros.
- Fortalecer alianzas locales con asociaciones ganaderas y comunidades rurales para garantizar la sostenibilidad y aceptación del proyecto.
- Implementar mecanismos de financiación verde o esquemas de asociación público-privada que faciliten el acceso a recursos económicos.
- Optimizar el diseño técnico con tecnologías como sistemas de seguimiento solar, sin comprometer la viabilidad económica.
- Monitorear indicadores clave de rendimiento (KPI) ambientales, técnicos y económicos durante la operación del sistema.
- Promover certificaciones verdes que respalden el compromiso ambiental del proyecto y mejoren su posicionamiento ante potenciales clientes y financiadores.

18. REFERENCIAS

- Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). (2022). *Expert insight: Europe must simultaneously replace Russia's fossil exports and accelerate its clean energy deployment*. IRENA.
https://www.irena.org/News/expertinsights/2022/May/Europe-must-simultaneously-replace-Russias-fossil-exports-and-accelerate-its-clean-energy-deployment?utm_source=chatgpt.com
- Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). (2024). *Renewable capacity statistics 2024*. IRENA.
- Amaducci, S., Yin, X., & Colauzzi, M. (2018). Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy*, 220, 545-561.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081>
- Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI). (2017). *Atlas de radiación solar de Colombia*. ANDI.
<https://www.andi.com.co/Uploads/AtlasRadiacionSolarColombia2017.pdf>
- Banco de la República. (2025). *Informe de inflación - diciembre de 2024*. Banco de la República. <https://www.banrep.gov.co/es/informe-inflacion>.
- Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D. T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A. K., Nabhan, G. P., & Macknick, J. E. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2(9), 848-855.
<https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>
- Conway, G. R., & Barbier, E. B. (1990). *After the green revolution: Sustainable agriculture for development*. Earthscan Publications.
- Cusva García, A. C. (2022). *Análisis para determinar la viabilidad y potencialidad de sistemas agrofotovoltaicos en zonas agricultoras de Colombia* (Trabajo de maestría). Universidad de los Andes, Colombia.

- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2025). *Proyecciones macroeconómicas y perspectivas de crecimiento 2025*. DNP. <https://www.dnp.gov.co/boletines-economicos>
- Dinesh, H., & Pearce, J. M. (2016). The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 299-308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Féraud, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36(10), 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
- Enkhardt, S. (2020). *Agrivoltaic project with vertically mounted bifacial panels goes online in Germany*. PV Magazine. <https://www.pv-magazine.com/2020/10/08/agrivoltaic-project-with-vertically-mounted-bifacial-panels-goes-online-in-germany/>
- Federación Colombiana de Ganaderos (Fedegán). (2024). Informe de precios del ganado en pie 2024. Bogotá, Colombia. Fedegán. https://storage.googleapis.com/static-fedegan/Coyuntura-Ganadera-2023/Balance_Perspectivas_ganaderia_colombiana_2023_2024_.pdf
- González, L., & Calderón, M. (2022). *Energías renovables y desarrollo sostenible en Colombia: Avances y desafíos frente al Acuerdo de París*. Universidad Nacional de Colombia.
- Hassanpour, A., Ghahramani, A., & Kalantar, B. (2020). Application of Internet of Things (IoT) and data-driven approaches in precision agriculture: A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(7), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08394-1>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). *Metodología de la investigación* (4.ª ed.). McGraw-Hill. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2024.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Human Rights Watch. (2025). *Informe mundial 2025: Eventos y derechos humanos en perspectiva global*. Human Rights Watch. <https://www.hrw.org/world-report/2025>.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) & Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2017). *Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Instituto Fraunhofer de Sistemas de Energía Solar (Fraunhofer ISE). (2023). *Prof. Dr. Adolf Goetzberger, founder of Fraunhofer ISE has died*. Fraunhofer ISE. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2023/prof-dr-adolf-goetzberger-founder-of-fraunhofer-ise-has-died.html>.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) & International Labour Organization (ILO). (2023). *Renewable energy and jobs – Annual review 2023*. IRENA & ILO.
- Kalogirou, S. (2014). *Solar energy engineering: Processes and systems* (2.^a ed.). Academic Press
- Kim, Y., Evans, R. G., & Iversen, W. M. (2022). Remote sensing and artificial intelligence-based irrigation scheduling for smart agriculture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 196, 106894. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106894>
- Kotler, P., & Keller, K. L. (2021). *Marketing management* (16.^a ed.). Pearson.
- Liu, W., Xu, Z., Wang, Y., & Yan, X. (2021). Recent advances in semitransparent organic and perovskite solar cells for building-integrated photovoltaics and agrivoltaics. *Advanced Energy Materials*. <https://doi.org/10.1002/aenm.202000774>
- Luque, A., & Hegedus, S. (Eds.). (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering* (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470974704>.
- Marrou, H., Dufour, L., & Wery, J. (2013). How does agrivoltaic management affect crop yield? *Agricultural and Forest Meteorology*, 177, 117-132. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.012>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). *Colombia reducirá en un 51 % sus emisiones de gases efecto invernadero para el año 2030*. Ministerio de Ambiente. <https://www.minambiente.gov.co/colombia-reducira-en-un-51-sus-emisiones-de-gases-efecto-invernadero-para-el-ano-2030/>
- Municipio de Aguazul. (2024). Licitación pública: *Estudios de prefactibilidad para sistemas agrovoltaicos en la región*. SECOP II. Municipio de Aguazul.

- O'Energy. (2023). *Ayla Solar: Primer parque agrovoltaico PMGD en Chile*. Press Latam. <https://presslatam.cl/2024/11/serc-chile-proyecto-energia-agrovoltaica>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). Acuerdo de París. ONU. https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI). (2010). *Manual de formulación y evaluación de proyectos de inversión*. ONUDI. https://www.unido.org/sites/default/files/files/2010-06/manual_formulacion_evaluacion_proyectos.pdf
- PV Magazine. (2024). *Colombia impulsa proyectos agrovoltaicos con cultivos de melón y sistemas fotovoltaicos de casi 1 MW*. PV Magazine. <https://www.pv-magazine-latam.com/2024/04/16/colombia-impulsa-proyectos-agrovoltaicos/>
- Rahman, M. M., Ishikawa, H., Yamauchi, M., Takashima, S., Kamatari, Y. O., Shimizu, K., Okada, A., & Inoshima, Y. (2023). Characterization of mRNA signature in milk small extracellular vesicles from cattle infected with Bovine Leukemia Virus. *Pathogens*, 12, 1239.
- Sapag Chain, N., & Sapag, R. (2014). *Preparación y evaluación de proyectos* (7.^a ed.). McGraw-Hill.
- Sun'Agri. (2024). *Sun'Agri agrivoltaic systems for vineyards and orchards (dynamic solar shutters): benefits on yield and resilience*. Sun'Agri. <https://sunagri.fr/en/5310/>
- Thomas, B., Sharma, A., & Mehta, R. (2023). Land leasing preferences among farmers for solar park development in India: A socio-economic assessment. *Renewable Energy Journal*, 205, 1125-1137. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.045>
- Trommsdorff, M., Weselek, A., Schindele, S., Ehmann, A., & Högy, P. (2022). *Agrivoltaics: Solar power generation and food production*. En A. S. Reddy & S. Kumar (Eds.), *Solar energy advancements in agriculture and food production systems* (pp. 163–183). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7652-5_8
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: Applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>

SOLARGIS. (s.f.). PV performance assessment. SOLARGIS.
<https://solargis.com/es/services/pv-performance-assessment>