EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE IMPLEMENTACIÓN Y LA SOSTENIBILIDAD DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTACIÓN DENTRO DEL SISTEMA SOCIOTÉCNICO DE UNA COMUNIDAD INDÍGENA RURAL EN KATANAMANA, LA GUAJIRA

ALEJANDRA MORANTE CAICEDO

TRABAJO DE GRADO

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera Sanitaria y Ambiental

Director

PhD. JOHNNY HAROLD ROJAS

Programa Académico de Ingeniería Sanitaria y Ambiental - 3754

Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y Medio Ambiente

Facultad De Ingeniería

Universidad Del Valle

Santiago de Cali - Colombia

Febrero de 2026

Resumen

El Nexo Agua – Energía – Alimentación (AEA) es un enfoque integrado que busca optimizar la gestión de los recursos naturales y orientar estrategias coherentes para enfrentar desafíos complejos como el cambio climático, el acceso a servicios básicos y la seguridad alimentaria. Esta investigación se centra en la comunidad rural de Katanamana, ubicada en La Guajira, Colombia, un territorio apartado caracterizado por limitaciones estructurales en el acceso a agua potable, energía y alimentación. En los últimos años, la comunidad ha experimentado transformaciones en su sistema sociotécnico a partir de la implementación de tecnologías descentralizadas, como sistemas de desalinización alimentados por energía fotovoltaica y sistemas piloto de cultivos verticales. Este estudio analiza el sistema sociotécnico de la comunidad de Katanamana desde el enfoque del Nexo AEA con el objetivo de identificar los factores que inciden en su implementación y sostenibilidad en un contexto comunitario y rural. Para esto, se realizó una revisión de literatura, trabajo de campo en la comunidad, se desarrolló una matriz de evaluación del Nexo y se evaluó la sostenibilidad desde el enfoque fuerte y débil.

Los resultados muestran que la limitada información disponible sobre los recursos naturales constituye una fuente significativa de incertidumbre que compromete la sostenibilidad del Nexo, incluso desde una enfoque débil. Aunque la dimensión de agua toma un rol predominante, todavía, el acceso al agua continúa siendo limitado, ya que, incluso con la implementación del proyecto, no se garantiza una dotación suficiente de agua segura. En conjunto, la comunidad presenta una alta vulnerabilidad frente a cambios ambientales, técnicos y sociales. Este estudio aporta evidencia empírica sobre la aplicación del enfoque del Nexo en contextos rurales y comunitarios.

Palabras clave: Nexo AEA, seguridad hídrica, comunidades rurales, pueblos indígenas, sostenibilidad, La Guajira.

Tabla de Contenido

1. Introducción 9

1.1 Planteamiento del problema 10

1.2 Justificación 13

2. Pregunta de Investigación 15

3. Objetivos 15

3.1 Objetivo General 15

3.2 Objetivos Específicos 15

4. Marco Conceptual 15

4.1 Nexo Agua-Energía-Alimentación 15

4.2 Sostenibilidad del Nexo AEA 18

5. Estado del Arte 19

6. Metodología 24

6.1 Tipo de investigación 24

6.2 Área de estudio 25

6.3 Flujograma metodológico 26

6.3.1 Revisión de literatura y análisis de documentos 26

6.3.2 Visita de campo 27

6.3.3 Entrevistas semiestructuradas 28

6.3.4 Identificación y selección de indicadores 29

6.3.5 Evaluación y sostenibilidad del Nexo AEA en la escala comunitaria 30

7. Resultados 31

7.1 Caracterización comunitaria 31

7.1.1 Aspectos socioeconómicos 31

7.1.2 Aspectos ambientales 39

7.1.3 Aspectos tecnológicos 45

7.2 Conceptualización del Nexo Agua-Energía-Alimentación 57

7.2.1 Modelo conceptual del Nexo AEA en la comunidad de Katanamana 57

7.2.2 Matriz de evaluación del Nexo Agua-Energía-Alimentación 58

7.3 Evaluación del Nexo Agua-Energía-Alimentación en Katanamana 61

7.3.1 Indicadores de presión 61

7.3.2 Indicadores de estado 66

7.3.3 Indicadores de impacto 76
7.3.4 Indicadores de respuesta 79
7.3.5 Análisis de resultados de indicadores particulares 82
7.3.6 Análisis de sostenibilidad del Nexo Agua-Energía-Alimentación 85
8. Conclusiones 87
9. Recomendaciones 89
10. Referencias 90
11. Anexos 95

Listado de Tablas

Tabla 1. Factores para la evaluación del Nexo AEA 17
Tabla 2. Mapeo de métodos analíticos para la evaluación del Nexo AEA 21
Tabla 3. Factores evaluados en la visita de campo 28
Tabla 4. Partes involucradas relevantes en la recopilación de información primaria 28
Tabla 5. Expertos consultados para análisis de indicadores de interés a evaluar..... 29
Tabla 6. Características del acuífero SAC 3.2 41
Tabla 7. Características hidrogeoquímicas del sistema de acuíferos SAC3.2 42
Tabla 8. Caracterización hidrogeológica del pozo salobre (P2)..... 43
Tabla 9. Calidad del agua para riego en puntos de monitoreo del SAC 3.2 y en Katanamana..... 44
Tabla 10. Características del sistema de tratamiento Katanamana 49
Tabla 11. Parámetros fisicoquímicos medidos del agua tratada de la planta 50
Tabla 12. Parámetros de operación de la planta de tratamiento de agua Katanamana 52
Tabla 13. Costos asociados al sistema de tratamiento de agua Katanamana 53
Tabla 14. Indicadores particulares de matriz de evaluación 60
Tabla 15. Formulación y cálculo de demanda hídrica 61
Tabla 16. Formulación y cálculo de generación y gestión de subproductos..... 62
Tabla 17. Formulación y cálculo de riesgo de calidad del agua para riego 63
Tabla 18. Formulación y cálculo de demanda hídrica por unidad agrícola productiva 63
Tabla 19. Formulación y cálculo de la presión territorial por el uso del suelo 64
Tabla 20. Formulación y cálculo de condiciones de producción de las unidades agrícolas 65
Tabla 21. Formulación y cálculo de cantidad de agua segura..... 66
Tabla 22. Formulación y cálculo de accesibilidad al suministro de agua segura..... 67
Tabla 23. Formulación y cálculo de cobertura de servicio de agua segura..... 67
Tabla 24. Formulación de índice de riesgo de calidad del agua para consumo humano 68
Tabla 25. Formulación y cálculo de nivel de conocimiento sobre la fuente de agua..... 69
Tabla 26. Formulación y cálculo de riesgo de calidad de la fuente de agua 70
Tabla 27. Formulación y cálculo de medición de contaminantes en fuente de abastecimiento..... 71
Tabla 28. Formulación y cálculo de producción alimenticia local 71
Tabla 29. Formulación y cálculo de pobreza energética..... 72
Tabla 30. Formulación y cálculo de nivel de conocimiento de la tecnología 72
Tabla 31. Formulación y cálculo de vulnerabilidad del sistema por reemplazo de componentes .. 73

Tabla 32. Formulación y cálculo de capacidad de respuesta a daños 74
Tabla 33. Formulación y cálculo de gestión comunitaria 75
Tabla 34. Formulación de equidad en acceso a agua segura..... 76
Tabla 35. Formulación y cálculo de percepción comunitaria de mejora en salud 77
Tabla 36. Formulación y cálculo de inseguridad alimentaria en hogares 78
Tabla 37. Formulación y cálculo de impacto de tarifas en ingreso familiar 79
Tabla 38. Formulación y cálculo gestión y disposición final de componentes..... 80
Tabla 39. Formulación y cálculo de cambio comunitario en el desarrollo productivo 80
Tabla 40. Formulación y cálculo de cambio en la organización comunitaria..... 81
Tabla 41. Formulación y cálculo de cambio comunitario en la articulación de alianzas..... 82
Tabla 42. Evaluación de indicadores particulares del Nexo AEA en la comunidad de Katanamana 83
Tabla 43. Resultados de índice agregado de sostenibilidad débil y fuerte del Nexo AEA. 86

Listado de Figuras

Figura 1. Marco conceptual del Nexo Agua-Energia-Alimentación 16
Figura 2. Aspectos de sostenibilidad del Nexo AEA 19
Figura 3. Interacciones teóricas comunes entre las dimensiones del Nexo AEA 20
Figura 4. Diagnóstico de condiciones WEF Nexus en Colombia 23
Figura 5. Ubicación comunidad de Katanamana 25
Figura 6. Flujograma metodológico de la investigación 26
Figura 7. Enfoque Presión-Estado-Impacto-Respuesta para el desarrollo de indicadores 30
Figura 8. Enfoque de sostenibilidad débil y fuerte 31
Figura 9. Distribución de lugares principales en la comunidad de Katanamana 33
Figura 10. Institución Etnoeducativa Integral Rural Katanamana 34
Figura 11. Recolección de agua en la comunidad de Katanamana 35
Figura 12. Usos del agua en la comunidad de Katanamana 36
Figura 13. Sistemas fotovoltaicos en la comunidad de Katanamana 39
Figura 14. Mapa del sistema de acuífero de la Alta Guajira SAC3.2 41
Figura 15. Monitoreo de parámetros fisicoquímicos en la zona de incidencia de Katanamana 43
Figura 16. Matriz de riesgo de agua para riego según niveles de sodicidad y salinidad 45
Figura 17. Sistema de desalinización solar de Katanamana 46
Figura 18. Esquema del sistema de desalinización solar de Katanamana 47
Figura 19. Sistema tratamiento de agua de la comunidad de Katanamana 48
Figura 20. Módulos de cultivos verticales instalados en la comunidad de Katanamana 54
Figura 21. Actividades desarrolladas por la comunidad de Katanamana 56
Figura 22. Modelo conceptual del Nexo AEA en la comunidad de Katanamana 58
Figura 23. Estructura de matriz de evaluación Nexo AEA 60

Listado de Anexos

Anexo 1. Cronograma de visita técnica a la comunidad de Katanamana, La Guajira 95
Anexo 2. Formato de entrevista con líder comunitario y habitantes de la comunidad 96
Anexo 3. Formato de visita técnica y entrevista con el operario 97
Anexo 4. Formato de medición de parámetros fisicoquímicos en campo 100
Anexo 5. Herramientas construidas y resultados del taller comunitario 100
Anexo 6. Formato de encuesta domiciliar 105

1. Introducción

Equilibrar la adecuada gestión de los recursos naturales con la demanda por servicios y bienes básicos como el agua, la energía y los alimentos es un desafío latente. Todavía, en el mundo, alrededor de una cuarta parte de la población no tiene acceso a agua potable (ONU, 2025), 760 millones de personas carecen de acceso a la electricidad (IEA, 2025), y alrededor de 9,8 % de la población se enfrentó al hambre en 2022 (FAO, 2023). El crecimiento poblacional y el cambio climático son dos factores de estrés adicionales que obligan a pensar como brindar acceso universal y suficiente a estos bienes y servicios demandando menos del planeta.

Es difícil pensar en los sistemas de agua, energía y alimentación como sistemas aislados. Por ejemplo, un sistema de producción de alimentos demanda altas cantidades de agua para el riego, energía en forma de electricidad para los sistemas de irrigación y como combustible para mantener las cadenas de distribución. Asimismo, una planta de tratamiento de agua requiere de electricidad para su operación, electricidad que es generada por una planta hidroeléctrica. Aunque se trata de ejemplos específicos, ilustran de manera clara la naturaleza tangible de la interdependencia entre los sistemas y la creciente tensión que emerge en un mundo globalizado.

Reconocer estas interrelaciones sectoriales ha llevado al desarrollo de enfoques sistémicos como el Nexo Agua–Energía–Alimentación, concebido para mejorar la gestión integrada de los recursos y fortalecer la toma de decisiones (Hoff, 2011). El Nexo es el estudio e identificación de sinergias y compensaciones complejas entre los sistemas naturales y humanos asociados a tres dimensiones principales: el agua, la energía y la alimentación desde una visión multisectorial y multiescalar (Hoff, 2011; Muthu, 2021). Aunque en la teoría el Nexo pretende guiar una transición hacia un acuerdo plausible entre la sostenibilidad y el bienestar humano, el diseño y operacionalización de un marco que refleje los sistemas en su complejidad ha sido desafiante (Muthu, 2021).

Diversas disciplinas han abordado el estudio del Nexo, proponiendo soluciones desde sus propios marcos conceptuales y metodológicos. Estas aproximaciones abarcan un amplio espectro, desde desarrollos teóricos hasta aplicaciones empíricas en uso de métodos cualitativos propios de las ciencias sociales o empleando complejos sistemas de modelación. Los estudios del Nexo se han realizado en múltiples escalas, desde el nivel de vivienda como unidad de análisis hasta la escala de cuenca regional o transfronteriza. Asimismo, el enfoque desde el Nexo ha sido usado para responder a diversos objetivos como el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), la gestión de recursos en zonas áridas, el uso de aguas subterráneas, análisis de gobernanza y evaluaciones de ciclo de vida (Srigiri & Dombrowsky, 2021). Esta diversidad también se refleja en su aplicación tanto en países desarrollados como en contextos en desarrollo donde el recurso hídrico juega un papel fundamental (Muthu, 2021; Simpson et al., 2023). Aun así, son escasos los estudios que analizan el Nexo Agua–Energía–Alimentación en su aplicación en contextos rurales y con alto nivel de marginalidad, donde las interdependencias entre recursos se expresan de manera más tangible y las brechas institucionales suelen ser más pronunciadas (Francois, 2022).

Con la intensión de informar el estudio del Nexo Agua–Energía–Alimentación al nivel comunitario y rural se seleccionó la comunidad de Katanamana, ubicada en el municipio de Uribia, La Guajira en Colombia. Históricamente, La Guajira ha sido un departamento con grandes dificultades en el acceso a servicios básicos como agua y energía, y tiene, todavía hoy en día, uno de los índices de vulnerabilidad alimenticia más altos del país (Alcaldía de Uribia, 2024). Katanamana es una comunidad que no escapa a la realidad del departamento. En febrero de 2024, se culminó la

implementación de un proyecto que trajo a la comunidad una planta de tratamiento de agua potable alimentada por un sistema fotovoltaico y un sistema piloto de cultivos verticales. Este proyecto representa una disrupción en el sistema sociotécnico comunitario y será analizado desde el enfoque del Nexo Agua–Energía–Alimentación en este trabajo de grado.

Para el desarrollo de esta tesis, en los capítulos 1 a 6 se presentan la introducción y el planteamiento del problema, la pregunta de investigación, los objetivos, el estado del arte, el marco conceptual y la metodología de investigación, respectivamente. La sección 7 presenta los resultados de investigación. Las conclusiones y recomendaciones se presentan en las secciones 8 y 9. Finalmente, se presentan las referencias y los anexos.

1.1 Planteamiento del problema

El agua, la energía y la alimentación (AEA), esenciales para el florecimiento humano, son cada vez más interdependientes en un mundo interconectado. Los desafíos asociados a la gestión de los recursos AEA no son meramente sectoriales sino sistémicos y requieren respuestas integradas que trasciendan los silos tradicionales. Sin embargo, las problemáticas asociadas a los recursos AEA se han tratado de resolver tradicionalmente acudiendo a enfoques de gestión que desaprovechan el potencial de integración entre las tres dimensiones. Justamente por ello, todavía el mundo se enfrenta al desafío de dar respuesta a una creciente cantidad de población que no cuenta con acceso a servicios básicos de agua y energía, ni a dietas de alimentación completas, a la vez que, dispone de una cantidad cada vez más restringida de recursos naturales.

Para 2024 se estimó que 2.200 millones de personas (27,5% de la población global) no tuvieron acceso al agua potable, 3.400 millones (43,7%) carecieron de un saneamiento adecuado y 1.700 millones (25%) no contaron con una higiene adecuada (ONU, 2025). En el sector de energía, para el año 2023, 666 millones de personas no contaron con acceso a electricidad, de los cuales, el 84% se encontraba en comunidades rurales (ONU, 2025). Además, 2.100 millones de personas no disponían con medios de cocina seguros, lo que se relaciona a riesgos para la salud, limita las oportunidades para mejorar la calidad de vida y fomentar el desarrollo económico (Francois, 2022; ONU, 2025). Asimismo, la inseguridad alimentaria moderada o severa afectó a casi el 2.300 millones de personas en 2024 (28%) y alrededor de 720 millones de personas (8,2%) se enfrentaron al hambre (ONU, 2025). Aunque las cifras de hambre y seguridad alimentaria han mejorado, todavía se mantienen superiores a los niveles prepandemia. Además, eventos de tipo climático y geopolítico como sequías, inundaciones o guerras, han generado efectos sobre la volatibilidad de los precios y la disponibilidad de alimentos impactando principalmente a los hogares más pobres que gastan la mayor parte de sus ingresos en suplir necesidades básicas (Banco Mundial, 2024). La agricultura, esencial para la seguridad alimentaria, es a su vez, el principal sector causante de estrés hídrico en el mundo al acaparar el 72% de la demanda de agua global (ONU, 2025).

Buscando un equilibrio entre la latente necesidad de seguir cerrando brechas en el acceso a los recursos AEA y las capacidades de los sistema naturales, existen tres factores principales que remarcan la relevancia de profundizar en el análisis del Nexo. Primero, la creciente demanda de recursos naturales exacerbada por un alza continua de la población global, un modelo económico basado en crecimiento ilimitado y el cambio climático. Bajo los dos primeros factores, los sistemas planetarios han sido sometidos a un alto estrés para responder a la demanda por recursos naturales (Rockström et al., 2009). Richardson et al. (2023), en su última evaluación de los límites

planetarios[1], donde se presenta un umbral bajo el cual la humanidad puede actuar sin comprometer el equilibrio ecológico del planeta, reportan que seis de los nueve limites han sido sobrepasados. Por su parte, el cambio climático ha tenido efectos en los sectores AEA con el 2024 marcado como el año más caliente en 175 años (ONU, 2025). Periodos de sequía y olas de calor, son precursores de bajos niveles de agua relevantes para el abastecimiento humano, el sector hidroeléctrico y el riego de cultivos. Los altos niveles de estrés hídrico son un realidad crítica en África y Asia, con entre 30% a 80% de niveles de estrés reportados. Asimismo, se registran impactos negativos en la productividad agrícola, ganadera y pesquera (FAO, 2023). Aunque los sectores AEA son vulnerables ante el cambio climático, se genera un bucle vicioso, dado que las emisiones de gases de efecto invernadero provienen principalmente de los sectores de energía (26 %), transporte (15 %), agricultura (11 %), y de los cambios en el uso del suelo (7 %), entre otros (ONU, 2025).

El segundo argumento se relaciona con las estrategias tradicionalmente sectoriales para la gestión de los recursos naturales que han fallado en considerar las interacciones, impactos e implicaciones en política pública entre el ambiente y las problemáticas asociadas a los recursos naturales. En vista de este desafío latente, desde los años cuarenta del siglo pasado se registra interés en el panorama internacional de desarrollar políticas públicas alineadas con la gestión integral de los recursos naturales. Diversos ejemplos se registran en declaraciones de las conferencias de Naciones Unidas[2]. La Gestión Integrada de los Recursos Naturales y la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos son dos enfoques institucionales, productos de este interés, desarrollados con el fin de direccionar la gestión integral de los recursos naturales. En el primer caso, se propone un enfoque sistémico para manejar los recursos agua, suelo, aire, flora y fauna, mientras el segundo busca coordinar el uso del agua como recurso finito, el manejo participatorio con enfoque de género y el agua como bien económico desde un nivel de cuenca hidrográfica. Ambos enfoques contaron con alto apoyo institucional y académico para inicios de siglo y fueron acogidos en el mundo por múltiples gabinetes ministeriales para desarrollar sus planes de gestión. Colombia es un claro ejemplo de la adopción de estos enfoques (MinAmbiente, 2010, 2012).

A pesar de contar con un alto apoyo internacional para el desarrollo de políticas públicas en la escala nacional, los resultados derivados de la adopción de ambos enfoques han sido cuestionados. Dentro de las deficiencias se reporta una escaza generación de diálogo entre las partes involucradas, limitada capacidad administrativa en territorios locales, efectos del poder político e incluso armado en la idiosincrasia del territorio local, necesaria priorización de recursos económicos especialmente en países con economías en desarrollo, desatención de las escalas productivas y aspectos socioeconómicos locales (González, 2017; Wichelns, 2017). Por ejemplo, se reporta que pequeños agricultores de subsistencia no pueden tomar el riesgo de invertir en las prácticas sugeridas por las políticas nacionales de gestión integral (Dar & Twomlow, 2007). Particularmente, en Colombia la gestión de las cuencas hidrográficas es sectorizada y no cuenta con un marco legal establecido (Rojas Padilla et al., 2013). Algunos académicos argumentan que el Nexo AEA aparece como una

[1] Los límites planetarios presentados por primera vez por (Rockström et al., 2009), establecen nueve fronteras dentro de las cuales la humanidad puede operar de manera segura sin desencadenar cambios irreversibles en los sistemas naturales del planeta Tierra. Los limites son interdependientes y sobrepasarlos puede desatar consecuencias no lineales e impredecibles a escala continental y planetaria. Los límites comprenden: cambio climático, integridad de la biosfera, cambios de uso del suelo, uso del agua dulce, flujos bioquímicos (P y N), acidificación del océano, reducción del océano estratosférico, carga de aerosoles atmosféricos y la incorporación de nuevas entidades.

[2] Notablemente en las Conferencias sobre la utilización de los recursos en Nueva York (1949), el ambiente humano en Estocolmo (1972), el agua en Mar del Plata (1977) y sobre el ambiente y desarrollo en Rio de Janeiro (1992) (Wichelns, 2017).

respuesta a estas políticas de gestión de recursos naturales que no alcanzaron los resultados esperados y donde la integración sectorial favorecería la gestión óptima de los sistemas AEA (Muller, M., 2015; Pahl-Wostl et al., 2013).

El tercer factor se asocia a la necesidad de informar el nivel rural comunitario desde el enfoque del Nexo, donde persisten desafíos sociales, económicos y tecnológicos. Todavía hoy, existe una alta disparidad en el acceso a servicios públicos en zonas rurales y dispersas. En Colombia, solo el 57,8% de la población ubicada en estas zonas tienen acceso a agua potable, 76,0% cuentan con servicios de saneamiento y 73,62% con acceso a electricidad, en todos los casos porcentajes muy inferiores al acceso en zonas urbanas (MinVivienda, 2023; UPME, 2025). Además, esta situación se ve agravada en zonas de resguardos indígenas donde se sobreponen los mayores índices de pobreza multidimensional y de pobreza energética. Vichada, Vaupés y La Guajira son los departamentos con las niveles más altos tanto de pobreza (74,8%, 47,9% y 42,1%, respectivamente) como de pobreza energética (52,8%, 48,1% y 42,2%) (MinMinas, 2024). Asimismo, para 2022 en Colombia se reportó que más 14 millones de personas (el 28,1% de la población en ese año) no tuvieron acceso a suficientes alimentos inocuos y nutritivos para su crecimiento y desarrollo (DANE, 2024). La Guajira es el departamento más crítico, con un 52,4% de su población afectada por inseguridad alimentaria moderada o grave especialmente en hogares liderados por jefatura femenina o con identificación étnica (DANE, 2024).

Entendiendo las desafíos globales sobre los recursos naturales y a la vez la desatención de las regiones rurales dispersas, este estudio se centra en la comunidad indígena de Katanamana ubicada en el municipio de Uribia en el departamento de La Guajira. En este departamento ubicado al norte de Colombia el acceso a servicios sociales es limitado. La cobertura en salud (87,3%) es inferior al promedio nacional (95%), y la tasas de mortalidad materna (170 por 100.000 nacidos vivos) e infantil por desnutrición (35,9 por 100.000 niños menores de cinco años) están dentro de las más altas del país (Cámara de Comercio La Guajira, 2018). Además, los factores climáticos de alta escasez de agua delimitan en gran medida las actividades en el territorio que reporta un alto estrés hídrico bajo un rango de precipitaciones promedio[3] entre 0 a 500 m^3/Hab/año (Banco Mundial, 2020). Los suelos del territorio cuentan con una baja vocación agrícola y pecuario (5% y 2% respectivamente) lo que dificulta la seguridad alimentaria especialmente en los territorios de la Alta Guajira (Bonet Morón & Hahn de Castro, 2017). Asimismo, aunque la cobertura de acueducto en las cabeceras del departamento es aceptable (87,0%), en las zonas rurales, donde habita casi la mitad de la población del departamento (457.358 personas), la cobertura es muy baja (22,0%) (Cámara de Comercio La Guajira, 2018). En esta zona prevalece el uso de pozos de agua subterránea, aguas lluvias o jagüeyes sin tratamiento y se asocia a la alta incidencia de casos de diarrea aguda (Alcaldía de Uribia, 2024). Por otro lado, La Guajira cuenta con el más alto potencial para la generación de energía a partir de fuentes renovables en el país, sin embargo, el departamento registró una cobertura de energía eléctrica del 60,50% en 2022 lo que es considerablemente inferior al promedio nacional país (92,71%) (Cámara de Comercio La Guajira, 2018; UPME, 2025). Aunque este departamento es catalogado como el epicentro de la transición energética en Colombia, todavía hay desafíos estructurales que deben ser atendidos y una gran necesidad de trabajar de la mano de las comunidades indígenas de la región.

[3] Según el Indicador de Estrés Hídrico de Falkenmark, cuando la disponibilidad de agua por habitante cae por debajo de los 1.700 m^3 por habitante por año una región experimenta "estrés hídrico".

En la comunidad de Katanamana habitan alrededor de 842 personas identificadas bajo la etnia Wayuu. Katanamana se encuentra a 4 horas vía terrestre desde Uribia, la cabecera más cercana. De manera similar a los desafíos identificados para el departamento, la comunidad enfrenta importantes dificultades para acceder a servicios básicos. El acceso al agua es uno de los factores principales que demarca el desarrollo comunitario. El abastecimiento de agua se realiza principalmente a través de pozos subterráneos salobres y jagüeyes con agua dulce superficial. Desde inicios de 2024, la comunidad cuenta con una planta desalinizadora para el tratamiento del agua salobre alimentada por energía solar. La planta es la principal fuente de agua segura y suministra agua aproximadamente a 71 hogares en la comunidad (alrededor de 480 personas) y 362 estudiantes de la escuela local que realizan recolección por acarreo desde el punto de hidratación comunitario. Junto con la planta, se realizó la instalación de sistemas de agricultura vertical propuestas con el propósito de fortalecer las prácticas agrícolas comunitarias y la seguridad alimentaria, no obstante, el uso de este sistema agrícola ha sido poco acogido por la comunidad. Si bien este proyecto involucra la gestión de los recursos AEA, genera preguntas críticas para el Nexo desde la escala rural asociadas al funcionamiento, sostenibilidad y apropiación comunitaria de los sistemas implementados, especialmente en contextos rurales de alta vulnerabilidad. Es decir, comprender si finalmente se genera una real mejora de las condiciones de vida locales.

Este estudio tiene como objetivo comprender y analizar el Nexo entre las dimensiones AEA dentro del sistema sociotécnico de la comunidad de Katanamana. La investigación proporciona información sobre cada una de las dimensiones AEA, las interacciones entre estas, mientras se consideran factores como la pertinencia de las soluciones técnicas desarrolladas, los procesos de implementación de proyectos y la integración efectiva de las necesidades de la comunidad. Es decir, informar el enfoque desde el Nexo AEA de una manera que sea específica del contexto, participativa y en lo posible adaptable, asegurando que las soluciones no solo sean técnicamente viables, sino también socialmente inclusivas y sostenibles para comunidades rurales y étnicas que enfrentan desigualdades sistémicas.

1.2 Justificación

La visión moderna del mundo ha colocado un dualismo entre la sociedad y la naturaleza, que restringe la percepción humana ante la interpenetración de los fenómenos sociales y técnicos con los fenómenos físicos naturales. La alienación humana y la consecuente reorganización de la naturaleza ha sido un medio para el establecimiento y aumento de las desigualdades en el mundo (Hornborg, 2019). Así, en su búsqueda de desarrollo y crecimiento económico, los seres humanos han agotado gradualmente los recursos de la tierra.

Los procesos para satisfacer las necesidades humanas operan a menudo bajo enfoques lineales que priorizan los objetivos sectoriales de forma aislada y han conducido a un agotamiento progresivo de los recursos naturales. Aunque la interconexión entre los sistemas es clara, los procesos para hacer uso de los recursos rara vez ha considerado estas interrelaciones y los bucles de retroalimentación entre los sistemas de agua, energía y alimentación. Esto ha conducido a prácticas insostenibles y consecuencias no deseadas para los ecosistemas y los medios de vida.

El agua es indispensable para la generación de energía, la productividad agrícola y la salud de los ecosistemas, mientras que la energía es fundamental para los procesos de extracción, tratamiento y producción de alimentos. Del mismo modo, los sistemas alimentarios dependen en gran medida tanto del agua como de la energía. Estas relaciones subrayan la naturaleza interconectada de las

dimensiones del AEA, fundamentales para alcanzar los ODS 2, 6 y 7: hambre cero, agua limpia y saneamiento, y energía asequible y no contaminante. El estudio de estas dimensiones desde el enfoque Nexo puede construir un camino entre las formas en las que los sistemas AEA usualmente han estado conectados para generar un estado de bienestar que considere a los seres humanos y a la naturaleza (Ojeda-Matos & Jones-Crank, 2025).

Por otro lado, bajo la bandera del desarrollo la tecnología ha tomado un rol fundamental. La tecnología como construcción social y natural ha moldeado el desarrollo de comunidades y territorios y ha encarnado dinámicas de flujos de poder que han perpetuado la distribución desigual de los recursos y conflictos de organización social a escala global (Hornborg, 2019). Cederlöf (2021), sostiene que el actual sistema mundial moderno funciona como una estructura disipativa que transfiere el desorden, la entropía y el desecho desde centro, los países industrializados, hasta la periferia. En ese sentido, Bringel y Varella (2016) argumentan para el caso Latinoamericano, que sumergido bajo esta configuración, se ha perpetuado una estructura de orden desigual en la producción de conocimiento que no representa las particularidades del territorio ni habla por el entendimiento colectivo. Bajo esta escala global capitalista se ha reducido la comprensión de la realidad, la percepción de la vida y la generación de conocimiento, reforzando la hegemonía de la cultura occidental y categorizando otras formas de comprensión como premodernas o subdesarrolladas. Un gran potencial del Nexo AEA apunta a recoger esta diversidad en conocimiento y entendimiento del mundo en la concepción de su marco analítico y bajo una comprensión integradora de la naturaleza, la comunidad y la tecnología.

La implementación real del pensamiento Nexo ha ido aumentando gradualmente, pero todavía es relativamente lenta. En el contexto de Latinoamérica, el Nexo cobra relevancia debido a los pocos casos empíricos que lo han estudiado (Bellfield H., 2015; Embid A. & Martín L, 2017; Li et al., 2025; Mahlknecht et al., 2020). Esto pone el foco sobre la necesidad de abordar las problemáticas globales con estrategias de desarrollo e implementación que se generen y adapten desde las condiciones locales. Esta investigación contribuye a explorar desde la práctica el enfoque de Nexo a través del estudio de caso seleccionado, aumentando la información basada en evidencia y contribuyendo a encontrar un camino para la incorporación de las problemáticas locales en los escenarios multiescalares de gestión de los recursos naturales.

Este estudio tiene como objetivo identificar factores relevantes asociados a las dimensiones del AEA a nivel comunitario para desarrollar un marco de análisis que explore el potencial del Nexo y la sostenibilidad del mismo. Resignificar el desarrollo comunitario, donde la comunidad y las necesidades identificadas por ella misma sean la unidad base en torno a la cual se establezcan y evalúen metas que favorezcan el florecimiento humano y las condiciones de vida.

Los resultados generan información accesible y útil sobre el estado del sistema sociotécnico de la comunidad. Esto es de gran utilidad tanto para la propia comunidad como para informar la formulación de políticas públicas alineadas a las condiciones locales. De igual forma, proporcionan insumos para la evaluación de proyectos de similares características implementados en comunidades rurales dispersas.

El presente estudio es pionero dentro del programa de Ingeniería Sanitaria y Ambiental al abordar de manera integral tres dimensiones fundamentales como lo son el agua, la energía y los alimentos desde la enfoque del Nexo. Además, pretende contextualizar el Nexo bajo un entorno local específico, y explorar tanto posibles vacíos teóricos del enfoque como limitaciones prácticas de su

aplicación. Finalmente, esta investigación quiere abrir un camino para reflexionar sobre la aplicabilidad del Nexo en escenarios rurales dispersos y marginados, contribuyendo tanto al enriquecimiento teórico como a la evaluación práctica de la gestión integral de recursos naturales.

2. Pregunta de Investigación

¿Cuáles son los factores que inciden en la implementación y la sostenibilidad del Nexo Agua-Energía-Alimentación en el contexto de una comunidad indígena rural en La Guajira, Colombia?

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar el potencial de implementación y la sostenibilidad del Nexo agua, energía y alimentación dentro del sistema sociotécnico desarrollado en la comunidad indígena rural en Katanamana, La Guajira.

3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las condiciones socioeconómicas, ambientales y tecnológicas asociadas a la provisión del agua, la energía y la alimentación en la comunidad indígena rural en Katanamana y su territorio consuetudinario.
- Proponer un marco de análisis y evaluación del potencial de implementación y la sostenibilidad del Nexo Agua-Energía-Alimentación para la comunidad indígena rural en Katanamana, La Guajira.
- Evaluar el potencial de la implementación y la sostenibilidad del Nexo Agua-Energía-Alimentación desarrollado en la comunidad indígena rural en Katanamana, La Guajira.

4. Marco Conceptual

Esta sección presenta el marco conceptual que establece las bases teóricas y las categorías analíticas para orientar este estudio. En primer lugar, se estructuró una revisión general del enfoque del Nexo, así como una descripción de los aspectos relevantes asociados al marco del Nexo donde se establece una diferenciación entre factores *intraespecíficos* y los *interespecíficos*. Por último, dado que se expone una recopilación de métodos asociados al uso del "pensamiento Nexo" como herramienta analítica.

4.1 Nexo Agua-Energía-Alimentación

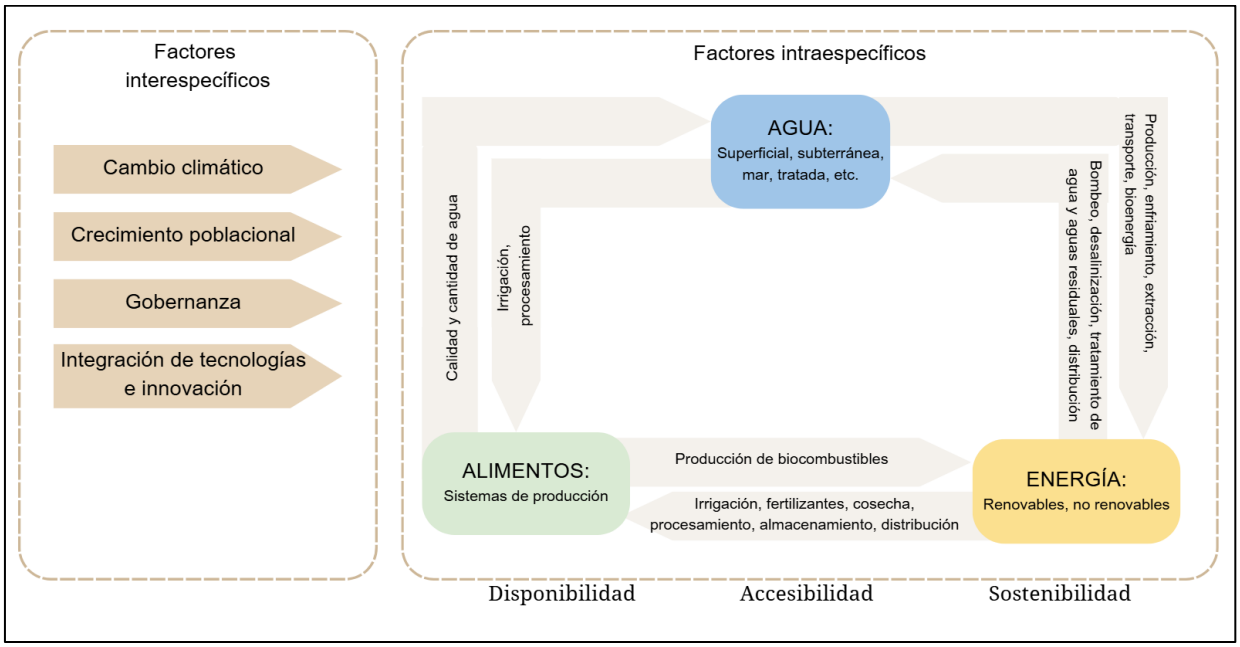
Los antecedentes del Nexo se remontan a los marcos de sostenibilidad que comenzaron a florecer en la segunda mitad del siglo XX. La alta demanda de recursos naturales y la latente degradación ambiental del planeta comenzaban a levantar inquietudes sobre la relación humano-naturaleza, la finitud de los recursos naturales de la tierra y la incompatibilidad planetaria para sustentar el modelo de desarrollo extractivista del momento (Muthu, 2021). Tradicionalmente la gestión de recursos naturales se ha realizado a partir de enfoques lineales orientados a maximizar la eficiencia sin considerar otros sectores igualmente relevantes (Cederlöf, 2021). En otras palabras, se trataba de formas de gestión que ignoraban las interrelaciones entre las dimensiones ambiental, social y económica, así como sus efectos para las generaciones futuras. Bajo esta necesidad, emerge el

enfoque del Nexo como una propuesta para comprender y gestionar de manera integrada las interdependencias entre recursos naturales esenciales. Es a partir del 2011, cuando el concepto del Nexo se introdujo institucionalmente en la Conferencia de Bonn, que el número de estudios asociados al tema comienzan a aumentar considerablemente (Hoff, 2011)

La palabra Nexo, *nexus* en inglés, significa "conectar". Por lo tanto, el Nexo estudia las conexiones entre las tres dimensiones AEA, así como las sinergias, tensiones, conflictos y posibles compensaciones asociadas a su gestión (Simpson y Jewitt, 2019). Bajo este enfoque, aquellos sistemas de recursos usualmente analizados desde una perspectiva unilateral se abordan bajo una lente mucho más amplia que reconoce las complejas conexiones entre los recursos y sus dimensiones socioeconómicas (Hejnowicz et al., 2022). Para propósitos de esta investigación, se entiende el Nexo AEA como el estudio de las dimensiones agua, energía y alimentación, y de las interacciones de dependencia o interdependencia entre estas dimensiones.

El marco conceptual del Nexo AEA ilustrado en la Figura 1 distingue entre dos tipos de factores: los *intraespecíficos* y los *interespecíficos*. Los aspectos intraespecíficos corresponden a variables dentro del mismo Nexo, es decir, factores físicos y medibles que determinan la dinámica y funcionamiento de los sistemas de agua, de la energía y de la alimentación. A su vez, estos factores intraespecíficos pueden ser indirectos o directos. Los factores intraespecíficos indirectos brindan información sobre una de las dimensiones del Nexo en particular (ej.: kg de alimentos producidos), mientras, los directos ofrecen información sobre las interacciones entre las dimensiones AEA. Se les llama directos pues tratándose del Nexo, este tipo de factores ilustran directamente una interacción entre dos dimensiones como el uso de energía para bombeo de agua o los efectos de la producción de alimentos en la cantidad de agua (ej.: m^3 de agua en uso por hectáreas de tierra cultivada).

Figura 1. *Marco conceptual del Nexo Agua-Energia-Alimentación*



Fuente: Adaptado de Al-Saidi & Elagib, 2017; Bazilian et al., 2011; Cansino-Loeza et al., 2020; Leck et al., 2015; Yuan & Lo, 2022.

Por otro lado, los factores interespecíficos están asociados a elementos que, aunque influyen en el Nexo, operan como condiciones habilitantes o restrictivas y, por tanto, se consideran externos a las interacciones propias entra las dimensiones del mismo Nexo. Tal es el caso del cambio climático, que altera la disponibilidad hídrica, modifica la productividad agrícola y afecta la demanda y estabilidad del suministro energético. De igual modo, el crecimiento poblacional incrementa simultáneamente la presión sobre el agua, la energía y los alimentos, exacerbando las competencias entre sectores. La integración de nuevas tecnologías habilita soluciones más eficientes para el uso de recursos naturales y ayudar a cerrar "la brecha de sostenibilidad" de la tierra. Otros factores incluyen, las capacidades locales, la participación comunitaria y la apropiación social del conocimiento que condicionan la implementación de políticas y prácticas integradas del Nexo, influyendo en la adopción de soluciones y tienen efectos sobre la viabilidad y sostenibilidad de cualquier intervención en el Nexo.

En la Tabla 1 se recopilan algunos de los factores encontrados en la literatura académica para la evaluación del Nexo considerando aspectos tanto intraespecíficos como interespecíficos. Esta recopilación incluye tanto aspectos tradicionalmente asociados al estudio del Nexo como factores relevantes para informar la escala comunitaria.

Tabla 1. *Factores para la evaluación del Nexo AEA*

Indicadores	**Factores asociados**		
	Agua	**Energía**	**Alimentación**
Uso	-Cantidad de agua en uso por sector (m^3) -Agua consumida en la vivienda (m^3) -Saneamiento e higiene	-Consumo de energía por sector	-Tipo de unidades productivas -Área de unidad productiva (m^2)
Demanda	-Demanda total (m^3) -Eficiencia (%)	-Demanda total -Eficiencia de distribución	-Requerimiento diario calórico promedio
Generación	-Cantidad de agua producida (m^3)	-Capacidad instalada (MW) -Generación efectiva (MWh)	-Producción (kg/ha) -Tipos de productos producidos
Emisiones y contaminantes	-Emisiones de GEI (kg)	-Emisiones de GEI (kg)	-Emisiones de GEI (kg) -Uso de pesticidas o fertilizantes químicos
Disponibilidad	-Reservas (m^3) -Tasa de recarga (m^3 $año^{-1}$) -Precipitación anual (mm) -Extracción anual total (%) -Demanda energética del sistema	-Capacidad de generación energía en la zona	-Consumo diario calórico promedio
Calidad	-Demanda bioquímica de oxígeno -Demanda química de oxígeno -Coliformes	-Fiabilidad	-Calidad del suelo -Cobertura vegetal
Efectos	-Número de personas afectadas por enfermedades diarreicas -Huella hídrica del agua producida	-Huella ecológica de energía -Energía proveniente de fuentes no renovables	-Cantidad total de alimentos importados -Número de personas en condición de desnutrición (#)

	-Cantidad de agua importada		
Protección	-Uso de la tierra en la cuenca geográfica -Protección de la cuenca geográfica	-Plan de disposición final	-Uso de técnicas agrícolas sostenibles
Satisfacción	-Población con acceso a agua potable (%) -Precio del servicio ($/m3)	-Población sin acceso a energía -Precio del servicio ($/m3)	-Percepción de la calidad de alimentos consumidos -Formas de intercambio
Apropiación social del conocimiento	-Número de personas con acceso a la información -Niveles de participación comunitaria en el proceso -Desarrollo de nuevos mercados locales -Asociaciones y redes de conocimiento -Involucramiento intergeneracional		
Operación y mantenimiento	-Número de personas entrenadas para operación y mantenimiento -Tasa de fallo del sistema -Costos de mantenimiento y capacidad de la comunidad para gestionarlo -Frecuencia en el mantenimiento		

Fuente: Adaptado de Bazilian et al., 2011; Cansino-Loeza et al., 2020; CINARA, 2014; Leck et al., 2015; Moreira et al., 2022; Velázquez et al., 2011.

4.2 Sostenibilidad del Nexo AEA

La sostenibilidad hace referencia al equilibrio entre los sistemas ambiental, económico y social sin comprometer la viabilidad en el largo plazo (Goodland, 1995). Este concepto ha sido bastante debatido y ha dado paso a diferentes enfoques desde el cual se aborda el desarrollo sostenible: la sostenibilidad débil y la sostenibilidad fuerte.

El enfoque de sostenibilidad débil se sustenta en la corriente neoclásica donde los recursos naturales no representan un límite para el desarrollo económico, los humanos son usuarios de estos recursos como insumos y es a partir del avance tecnológico desde el cual el capital natural puede ser remplazado por capital manufacturado (Pérez y Rojas Padilla, 2008). Este enfoque entiende los sistemas social, ambiental y económico como autónomos e independientes. No reconoce las capacidades limitadas del sistema ambiental ni atiende las problemáticas ya existentes asociadas al agotamiento de los recursos, pretendiendo mantener el *statu quo* de consumo y bienestar.

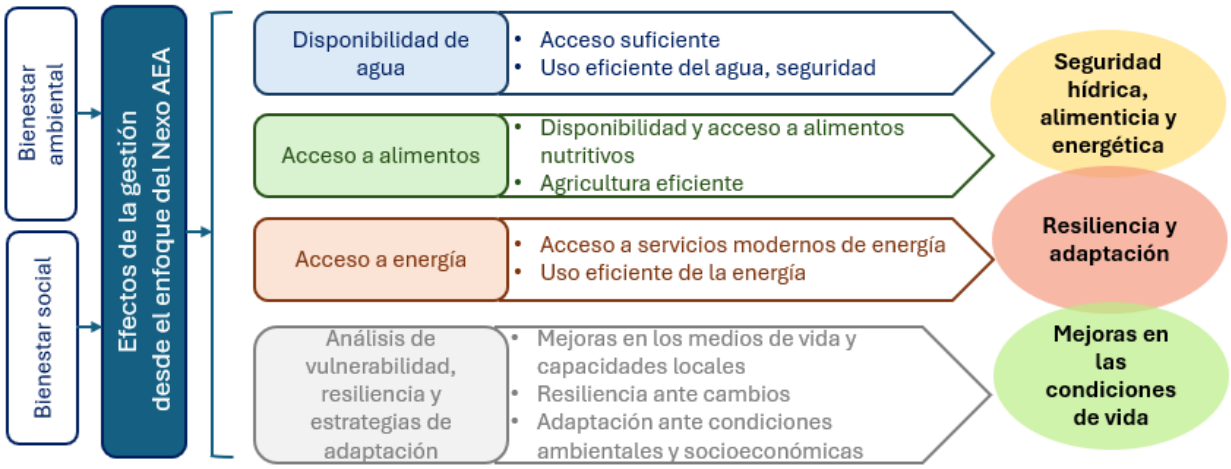
Por otro lado, la sostenibilidad fuerte establece límites al crecimiento económico y a los sistemas sociales al priorizar la preservación del sistema ambiental como la fuente de vida y de todo lo que existe, además de ser el medio de sustento para soportar el desarrollo de actividades antrópicas (Pérez y Rojas Padilla, 2008). Es decir, la base ambiental debe ser mantenida si se quiere posibilitar el desarrollo socioeconómico en el tiempo. Soportado desde la economía ecológica, este enfoque precondiciona la compatibilidad del crecimiento económico con los ciclos naturales de regeneración de los sistemas ambientales y hace un llamado a la búsqueda de fuentes alternativas que permitan la sostenibilidad de aquellos recursos naturales no renovables. La sostenibilidad fuerte desconfía de la capacidad del avance tecnológico para remplazar y atender futuras necesidades derivadas del detrimento de los sistemas naturales, por el contrario, prevé el cese del crecimiento económico.

El enfoque del Nexo reconoce que no es posible alcanzar desarrollo social sin considerar aspectos limitantes de los sistemas naturales y humanos (Nhamo et al., 2020). Más aún, desde el enfoque local la sostenibilidad viene a estar medida por si las actividades humanas mantienen y mejoran o agotan y degradan los sistemas naturales (Biggs et al., 2015). Por ejemplo, desarrollando actividades

de conservación o contrariamente, generando agotamiento de las reservas de agua, erosión de suelos o aportando a procesos de deforestación.

Partiendo del bienestar ambiental la sostenibilidad del Nexo se enmarca en aspectos propuestos desde las dimensiones del agua, la energía, los alimentos y así como la dimensión social (Figura 2). Estos factores de sostenibilidad se asocian a la disponibilidad, accesibilidad, autosuficiencia, productividad, entre otros aspectos delineados para cada dimensión y buscan asegurar la seguridad hídrica, alimenticia y energética. Además, más allá de los factores de sostenibilidad propios de las dimensiones AEA, la sostenibilidad de los efectos derivados de la gestión integral de recursos depende de que dichas intervenciones generen mejoras reales en la calidad de vida de las personas y de que estas cuenten con la capacidad de adaptarse a cambios tanto ambientales como sociales.

Figura 2. *Aspectos de sostenibilidad del Nexo AEA*



Fuente: Adaptado de FAO, 2014; Nhamo et al., 2020.

5. Estado del Arte

Históricamente, los grupos humanos se han organizado para desarrollar sistemas de abastecimiento de agua para consumir y cultivar, han buscado fuentes de energía para cocinar e iluminar sus viviendas, y desarrollado sistemas agrícolas que aseguren el acceso a alimentos. Con el paso del tiempo, cada una de estas dimensiones ha encontrado un nicho de desarrollo cada vez más especializado para atender necesidades bajo diversos tipos de contextos sociales y ambientales. Para el abastecimiento de agua, sistemas y técnicas se han desarrollado para la captación y tratamiento de diferentes fuentes de agua, nuevas formas de aprovechamiento de la energía se han introducido a las matrices energéticas nacionales y locales, y sistemas agrícolas cada vez más robustos y tecnificados producen sustento para una población global creciente.

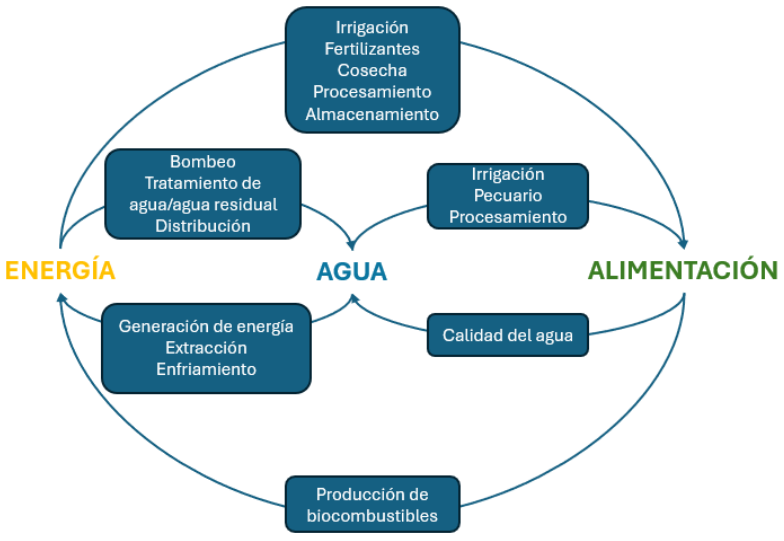
Inicialmente, la investigación sobre el Nexo se enfocó en conceptualizaciones teóricas que abordaban desafíos clave incluyendo determinar las interacciones a evaluar entre sectores, las etapas del proceso de gestión por incluir (ej.: desarrollo, implementación y monitoreo de un proyecto), los actores a considerar y el nivel de rigor y disponibilidad de datos para el análisis (Al-Saidi & Elagib, 2017). Aunque la propuesta del Nexo en teoría es clara, no existe un consenso general sobre la puesta en práctica ni una metodología concreta. La mayor virtud del Nexo, identificar

interrelaciones entre sectores, representa también la mayor dificultad práctica en la medida en que cada estudio refleja las condiciones únicas del contexto (Dargin et al., 2019; Foran, 2015).

El enfoque del Nexo ha sido desplegado para analizar sistemas tanto a nivel macro incluyendo las escalas global y transnacional hasta la escala meso que considera áreas más extensas como ciudades, distritos regiones o provincias. Según Li et al. (2025), las zonas más estudiadas se concentran en China tanto a nivel nacional como a escalas subnacionales. Además del gigante asiático, destacan a nivel de país, Qatar, Brasil, Estados Unidos, Reino Unido, Arabia Saudita, Sudáfrica e India, lo que refleja interés en contextos tanto industrializados como en desarrollo. En cuanto a cuencas hidrográficas, dentro de las más estudiadas sobresalen el Mekong, Nilo, Indo, Amarillo y Yangtsé, evidenciando interés en el análisis de sistemas fluviales globalmente críticos. En los estudios que abarcan varios países sobresalen el Mediterráneo y Medio Oriente cubriendo problemáticas transfronterizas como la escasez de agua y la elevada dependencia de importaciones alimentarias.

Li et al., (2025) y Ojeda-Matos & Jones-Crank, (2025) desarrollaron análisis bibliométricos recientes que muestran como el estudio del Nexo ha adquirido un marcado enfoque analítico y técnico. Es decir, que se presenta un avance desde el nivel conceptual inicial (*nexus thinking)* hacia el nivel operativo (*nexus doing*). En mayor medida, los estudios teóricos y prácticos han logrado delinear las seis posibles interacciones del Nexo entre los tres sectores (Figura 3). La línea de investigación empírica se ha centrado principalmente en el análisis de tres o, en algunos casos, cuatro de las seis interacciones posibles del Nexo. Esto se debe a que el estudio simultáneo de todas las interrelaciones resulta metodológicamente complejo, tanto por la disponibilidad limitada de datos integrados como por la dificultad de capturar dinámicas multisectoriales en contextos reales. Por ejemplo, se analiza con frecuencia la interacción entre agua *para* alimentos en la eficiencia de riego para la producción de alimentos y agua *para* energía en la generación de energía en hidroeléctricas. La energía *para* alimentos es otra interacción comúnmente analizada que considera la eficiencia energética de la operación de sistemas de irrigación. Por el contrario, con los estudio empíricos tienden a omitir interacciones entre las dimensiones alimentos *para* agua y *para* energía, pues resultan menos intuitivas y disponen de una base de información más limitada para su análisis. Esta limitación evidencia restricciones en el análisis en doble vía entre las interacciones.

Figura 3. *Interacciones teóricas comunes entre las dimensiones del Nexo AEA*



Fuente: Adaptado de Embid A. & Martín L, (2017).

Asimismo, algunos autores cuestionan el carácter cerrado del enfoque centrado en las tres dimensiones AEA y proponen incorporar otras dimensiones relevantes, como el suelo o los ecosistemas (Avellán et al., 2017; Hurtado et al., 2024; Silva-Afonso & Pimentel-Rodrigues, 2024; Wichelns, 2017). Esta crítica se basa en que procesos esenciales para la sostenibilidad, como la fertilidad y degradación del suelo, los servicios ecosistémicos, la biodiversidad o la regulación hidrológica, influyen directamente en la disponibilidad y calidad del agua, la productividad agrícola y la generación de energía. Integrar estas dimensiones permitiría capturar dinámicas biogeofísicas y socioambientales que no se reflejan plenamente en el marco AEA tradicional.

Diversos autores han intentado mapear diferentes métodos implementados para evaluar el Nexo (Tabla 2). Aunque concuerdan en que métodos de las ciencias naturales, la gestión ambiental y economía son los más usadas, destacan la relevancia de incluir metodologías mixtas y equipos interdisciplinarios para generar propuestas de investigación holísticas que comprendan aspectos sociales y aspectos políticos frecuentemente ignorados (Albrecht et al., 2018; Hejnowicz et al., 2022). Sušnik y Staddon (2022), destacan la integracion de métodos cualitativos con modelación cuantitativa, además, concluyen que la ausencia de *ecuaciones fundamentales* para la descripción de interrelaciones entre las dimensiones AEA limitan su cuantificación.

El estudio del Nexo a través de un compendio de metodologías provenientes de otras disciplinas representa un desafío. Por ejemplo, es común que los análisis entre las dimensiones del Nexo sean indirectos, es decir, que no se evalúa directamente las interrelaciones entre las dimensiones sino que se obtiene un análisis desde el panorama de cada una (Li et al., 2025).

Tabla 2. *Mapeo de métodos analíticos para la evaluación del Nexo AEA*

Área o disciplina	**Métodos o herramientas**	**Ejemplos**
Gestión ambiental	-Análisis por escenario -Huella ecológica -Análisis de ciclo de vida -Participación de las partes interesadas -Sistemas de soporte a decisiones -Análisis de beneficio	Análisis del Nexo en la urbanización de cuencas (Villarroel Walker et al., 2012) Desafíos de las soluciones bajo el enfoque Nexo. Integración de disciplinas, desarrollo de métodos y herramientas, colaboración entre partes involucradas, disponibilidad de datos. (Wolfe et al., 2016)
Economía	-Modelos Input-Output -Análisis de costo-beneficio -Análisis de compensaciones -Matrices de contabilidad social -Modelos empíricos (econometría y encuestas) -Análisis de la cadena de valor -Análisis de la cadena de suministro -Economía cuantitativa y análisis regional	Interacción regional de AEA – China. Vías de desarrollo para el Nexo en China bajo energía nuclear o gas natural (Liu et al., 2018) Evaluación integral del Nexo con diferentes métodos analíticos (Endo et al., 2015) Auto regresión vectorial para análisis del Nexo AEA (Yan et al., 2020) Análisis del Nexo a través de la evaluación de la cadena de valor (Villamayor-Tomas et al., 2015)
Indicadores	-Indicadores, métricas o índices	Indicadores de sostenibilidad con enfoque participativo (Moreira et al., 2022) Enfoque sistemático para el análisis del Nexo en situaciones de escasos recursos (Cansino-Loeza et al., 2020)

Estadística	-Análisis de componentes principales -Estadística de regresiones -Análisis de tendencia	(Albrecht et al., 2018)
Ciencias sociales	-Análisis institucional -Cuestionarios, encuestas o entrevistas -Análisis históricos -Modelación basada en el agente -Técnica Delphi -Análisis crítico del discurso -Ingeniería ontológica -Análisis de las partes interesadas -Talleres participativos y grupos focales -Análisis de políticas	Identificación de sinergias y compensaciones. Mejorar la efectividad de la toma de decisiones. Legitimidad política (Kurian et al., 2019)
Modelación integrada	-Modelos de evaluación integrada y CLEWS -Modelación hidro-económica	Revisión de literatura de modelación integrada bajo el Nexo (Kling et al., 2017) Modelo IAM para Nexo AEA – Alemania (Schlör et al., 2018) Caso de estudio – Sudáfrica (Nhamo et al., 2020)
Análisis de sistemas	-Análisis multisectorial de sistemas -Análisis de flujo de materiales -Diagrama causal y retroalimentación del sistema	(Albrecht et al., 2018)
Análisis geoespaciales	-Análisis espaciales -Teledetección (remote sensing)	(Albrecht et al., 2018)
Modelos físicos	-Modelos hidrológicos -Modelos de energía -Modelos de cultivos Modelo de sistemas de alimentación: -Análisis de demanda calórica -Modelación de recursos fuente-servicio	Cultivos e irrigación de precisión con gasto de energía. Efectos positivos de los sistemas de irrigación (Shrestha et al., 2015)

Fuente: Según indicado en cada caso.

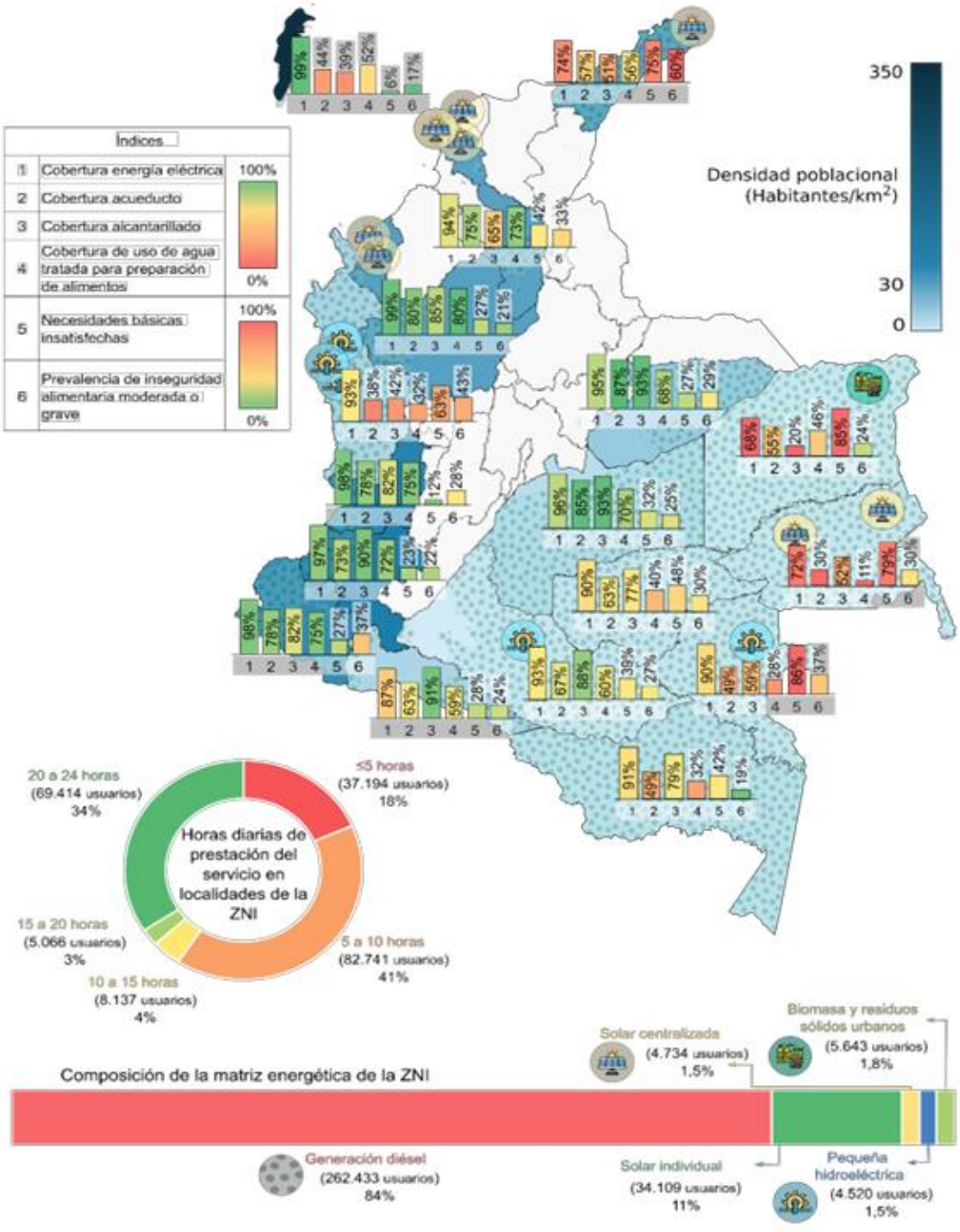
En Latinoamérica, la dimensión de agua ocupa un rol central por su relevancia en la producción de alimentos y la generación de energía (Embid A. & Martín L, 2017). Brasil es reconocido como uno de los principales referente de la región con un enfoque hacia la exploración teórica del Nexo aunque los análisis empíricos todavía son limitados (Caiado Couto et al., 2021; Moreira et al., 2022).

En Colombia, desde el 2022 se han identificado solo cuatro estudios que evalúan el Nexo AEA. Se ha considerado el mapeo del desarrollo rural, la implementación de soluciones basadas en la naturaleza, el diseño de herramientas para el Nexo y los impactos de proyectos de energías renovables.

Márquez-Bedoya et al. (2025) mapearon la integración del Nexo con el desarrollo rural potenciado por la electrificación sostenible en zonas remotas no interconectadas a la red nacional. Presentaron un diagnóstico inicial para el país desde el enfoque Nexo y en base a la composición de la matriz

energética en Zonas No Interconectadas (Figura 4). El diagnóstico se basó en 6 índices: cobertura de energía eléctrica, acueducto, alcantarillado, uso de agua para preparación de alimentos, necesidades básicas insatisfechas y prevalencia de inseguridad alimentaria. Además, destacaron una creciente tendencia de informar el contexto de zonas apartadas desde la investigación en campo.

Figura 4. *Diagnóstico de condiciones WEF Nexus en Colombia*



Fuente: Tomado de Márquez-Bedoya et al., (2025).

Desde la economía política, Restrepo et al. (2024) evaluaron el Nexo a la escala de subcuenca. El estudio integró la dimensión *ecosistema* al análisis del Nexo AEA y encontró que la restauración natural además de mejorar la regulación y retención hídrica generó beneficios económicos significativos para el componente hídrico del Nexo. No obstante, también encontraron compensaciones en la provisión de alimentos.

Fleischmann et al. (2024) presentaron el diseñado de una herramienta de software para la planeación integral de los sistemas AEA – ambiente en regiones remotas. Esta herramienta fue probada en dos comunidades remotas en Arusí, Chocó y en Maiapo, La Guajira con el objetivo de informar desde un enfoque del Nexo la selección tecnológica, así como, la minimización de costos y efectos ambientales no deseados. Aunque se encuentra en etapas tempranas, presenta una herramienta innovadora y práctica para informar la toma de decisiones desde el enfoque del Nexo. También en la región de La Guajira, Granit (2022) indagó por posibles impactos de pequeños sistemas de energía renovables en comunidades indígenas rurales. Dadas las condiciones de escasez hídrica de la región, desde métodos participativos identificó potenciales compensaciones asociadas al agotamiento de las aguas subterráneas por uso continuo durante décadas de un mismo sistema de acuífero.

En los artículos encontrados, destaca el estudio de la escala local y la región de La Guajira, considerada en dos de los estudios, como zona de especial interés al reflejar de manera clara los profundos desafíos existentes en la cobertura y gestión integrada de las necesidades asociadas al Nexo AEA. En conjunto, el reducido número de trabajos académicos evidencia que la aplicación empírica del enfoque de Nexo en el país sigue siendo muy limitada.

6. Metodología

Este investigación transdisciplinaria contó con la colaboración del grupo de investigación *Socio-Technical Energy Futures*, asociado al Instituto de Evaluación Tecnológica y Análisis de Sistemas (ITAS) del Instituto de Tecnológico de Karlsruhe. Así como de la Universidad del Valle y ZOA Colombia, ONG que ha apoyado la implementación de los proyectos desarrollados en la comunidad indígena rural seleccionada para el caso de estudio en Katanamana, La Guajira. A continuación, la presente sección describe la metodología utilizada para el desarrollo de este estudio.

6.1 Tipo de investigación

Esta investigación adopta un paradigma interpretativo, que enfatiza la comprensión de las complejas realidades de las experiencias humanas y los contextos sociales. De acuerdo con este paradigma, se emplea una metodología mixta. El enfoque de investigación combina la recopilación de datos secundarios y primarios. Los datos secundarios, se recopilan de la literatura existente, informes técnicos y otros documentos relevantes. Esto ayuda a establecer una comprensión fundamental de las comunidades, los proyectos, así como de las tecnologías implementadas dentro de las dimensiones AEA. Los datos primarios se recopilan directamente desde el campo, proporcionando una visión del funcionamiento del proyecto, las perspectivas de los miembros de la comunidad y las partes interesadas involucradas en el proyecto.

Esta investigación adopta una escala de tiempo transversal, recopilando datos en un solo punto en el tiempo. Este enfoque es adecuado para captar el estado actual del sistema sociotécnico y las interrelaciones dentro del Nexo AEA tras la implementación de los proyectos desarrollados. Aunque proporciona una lectura instantánea en el tiempo, el enfoque transversal puede proporcionar

información valiosa sobre los impactos inmediatos, futuros y las lecciones aprendidas de los proyectos. Adicionalmente, la unidad de estudio seleccionada es el caso de estudio que permite construir desde las características únicas de las comunidades y apoyar la identificación lecciones aprendidas que informan la formulación de políticas y prácticas en contextos similares.

6.2 Área de estudio

Esta investigación se realizó en la región semi árida de la media Guajira, específicamente en la zona de incidencia de la comunidad de Katanamana (Figura 5. *Ubicación comunidad de Katanamana*. Desde finales de febrero de 2024, la comunidad cuenta con una planta de agua de osmosis inversa potenciada por energía solar. El agua producida por la planta se distribuye desde un punto de hidratación comunitario ubicado contiguo al centro educativo local. Previo a la instalación de la planta, la comunidad contaba con acceso limitado a agua segura. El abastecimiento de otras fuentes como jagüey, aljibe de agua salobre, carrotanque o compra de agua embotellada se encuentran dentro de las otras posibles fuentes de acceso de agua. Tanto para la compra de agua como de alimentos, los habitantes de la comunidad se dirigen al centro urbano más cercano en Uribia, alrededor de 3 horas atravesando el desierto. Además del proyecto de abastecimiento de agua, la comunidad cuenta con un sistema piloto de cultivos verticales orientado a la producción de alimentos a partir del reaprovechamiento del agua de rechazo de la planta, Este sistema fue concebido como una estrategia complementaria para mejorar la seguridad alimentaria local. En cuanto al componente energético, la comunidad presenta un acceso muy restringido a la electricidad, basada principalmente en sistemas fotovoltaicos destinados al funcionamiento del sistema de agua y a la iluminación básica de algunos espacios comunitarios, como la enramada o a la sala de cómputo escolar. El acceso a energía para usos productivos, domésticos y de refrigeración es prácticamente inexistente.

Figura 5. *Ubicación comunidad de Katanamana*



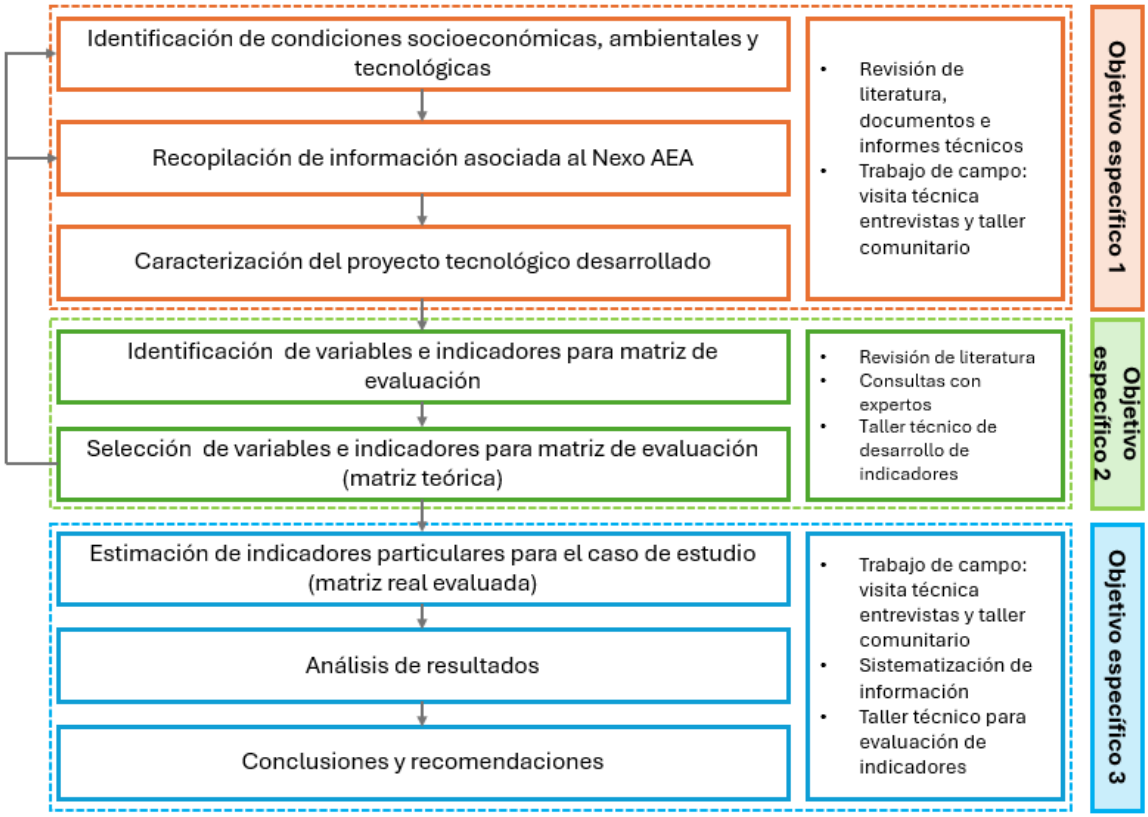
Fuente: Adaptado de DANE, 2025.

Dado que el acceso a información sobre la comunidad y los impactos del sistema de agua son limitados, el primer objetivo de esta investigación se enfoca en realizar una caracterización de la comunidad. Esto con el objetivo de contextualizar e informar la línea base del Nexo y para evaluar los efectos que ha tenido la implementación del sistema. En ese sentido, la sección de resultados amplia sustancialmente esta información.

6.3 Flujograma metodológico

El flujograma metodológico presentado sintetiza las etapas desarrolladas para cumplir los objetivos del estudio, articulando la revisión documental, el trabajo de campo y el análisis técnico dentro del enfoque del Nexo AEA (Figura 6). El proceso inicia con la caracterización socioambiental y tecnológica del contexto comunitario, continúa con la identificación y selección de variables e indicadores para la matriz de evaluación, y culmina con la estimación de los indicadores particulares, el análisis de resultados y la formulación de conclusiones y recomendaciones. Cada fase se encuentra asociada a un objetivo específico, lo que permite visualizar de manera ordenada y coherente la secuencia de actividades y decisiones metodológicas adoptadas.

Figura 6. *Flujograma metodológico de la investigación*



Fuente: Elaboración propia.

6.3.1 Revisión de literatura y análisis de documentos

La revisión de literatura se desarrolló con el objetivo de informar y complementar varios de los objetivos específicos del estudio, particularmente la contextualización del caso de estudio y la

caracterización del proyecto implementado, así como, el diseño y evaluación de indicadores del Nexo AEA en la comunidad de Katanamana.

En una primera etapa, se realizó una revisión de documentos oficiales de escala municipal y nacional para construir la línea base socioeconómica, ambiental y tecnológica del territorio. Se consultaron Planes de Ordenamiento Territorial y Planes de Desarrollo Municipal, así como información estadística del DANE. Para el componente ambiental, se recopiló información del Servicio Geológico Colombiano y del IDEAM, y se obtuvo información adicional mediante un derecho de petición a Corpoguajira sobre el sistema de acuíferos y el estado del monitoreo ambiental en la zona de estudio. Adicionalmente, con el fin de caracterizar los sistemas tecnológicos, entendidos como el sistema de abastecimiento de agua y los pilotos de cultivos verticales, se revisaron documentos técnicos y reportes oficiales de la implementación del proyecto, incluyendo informes y encuestas aplicadas por la ONG implementadora del proyecto de desalinización solar, así como, material de talleres comunitarios previos e informes técnicos del proveedor de los sistemas.

En una segunda etapa, se llevó a cabo una revisión de literatura académica en bases de datos como Scopus, Google Scholar y repositorios institucionales, en español e inglés, enfocada en estudios a escala local y comunitaria. Esta revisión se orientó a nutrir la matriz de evaluación con indicadores utilizados para la evaluación del Nexo AEA. Finalmente, la literatura académica revisada se utilizó para complementar y sustentar los criterios de calificación de los indicadores propuestos en el marco metodológico del presente estudio.

6.3.2 Visita de campo

Aunque los principales marcos del Nexo Agua Energía Alimentos parten de la necesidad de garantizar el acceso a servicios básicos en contextos de alta pobreza (FAO, 2014; Hoff, 2011), la complejidad de los sistemas locales y las dinámicas comunitarias no suele ocupar un lugar central en estos enfoques, y con frecuencia existe una limitada interacción con los actores más pobres y vulnerables (Biggs et al., 2015). En ese sentido, es necesario de analizar las iniciativas del Nexo más allá de los actores tradicionales, como académicos y tomadores de decisión, con el fin de fortalecer la credibilidad y legitimidad de la información generada y asegurar que los análisis de sostenibilidad incorporen las particularidades de cada caso de estudio.

La inmersión del investigador en el territorio permite una comprensión más profunda de las dinámicas sociotécnicas y de las implicaciones prácticas del Nexo AEA a escala local. Con base en este enfoque, el estudio llevó a cabo una visita de campo entre el 13 y el 14 de septiembre de 2025. Durante la visita se recopiló información de primera mano asociada a las dimensiones de agua, energía y alimentación, así como datos socioeconómicos de la comunidad analizada (Tabla 3). Las actividades incluyeron un recorrido participativo por la comunidad, visita técnica al sistema de cultivos verticales y abastecimiento de agua guiada por el operario de la planta e incluyendo el muestreo de parámetros básicos, y un taller comunitario.

El taller comunitario contó con la participación de diez miembros de la comunidad y del comité de agua. El grupo de participantes fue variado y contó con jóvenes, adultos, mujeres y hombres. Los participantes fueron informados del propósito de la actividad y se solicitó su consentimiento de participación anónima. El taller fue conducido en español por un facilitador (autor). Se abordaron cuatro actividades en el taller comunitario: i) mapa participativo, ii) uso y disponibilidad del agua, iii) tipo y acceso a alimentos y, iv) desafíos y sinergias asociadas a las dimensiones AEA. En la

sección de anexos se puede encontrar los formatos de planeación de actividades y fotos de la herramientas construidas por la comunidad en el taller comunitario (Anexo 1 a 6)

Tabla 3. *Factores evaluados en la visita de campo*

Método	Categoría	Factores
Visita técnica	Tecnológico	- Identificación de componentes del sistema - Funcionamiento de los sistemas implementados - Medición de parámetros fisicoquímicos básicos
Taller comunitario	Socioeconómico y ambiental	- Mapeo participativo: reconocimiento participativa del territorio, sistema ecológico - Línea base en agua, energía y alimentación
	Sistema de tecnológico instalado	- Procesos de implementación e impactos comunitarios tras el proyecto - Identificación de interrelaciones, oportunidades y desafíos, asociados al agua, la energía y la alimentación

Fuente: Elaboración propia.

6.3.3 Entrevistas semiestructuradas

El estudio empleó técnicas de muestreo no probabilístico, específicamente el muestreo intencional y de bola de nieve, para recopilar diversas perspectivas sobre las dimensiones AEA y la implementación de proyectos desde diferentes partes interesadas. El muestreo intencional permite la selección intencional de los participantes que son más relevantes para los objetivos de la investigación. El muestreo de bola de nieve ayuda a identificar participantes adicionales a través de referencias de contactos iniciales. Para complementar la información recopilada en la literatura, se realizaron entrevistas con diferentes partes interesadas asociadas al proyecto. Se llevaron a cabo entrevistas con las partes interesadas clave incluidos: los desarrolladores de la tecnología enfocado a entender mejor el funcionamiento y la adaptabilidad del equipo; implementadores del proyecto para conocer del proceso de implementación del proyecto; miembros de la comunidad para entender cómo se dieron procesos de apropiación de la tecnología, operación y mantenimiento e impactos del proyecto (Tabla 4).

Las entrevistas siguieron una formato entre la indagación estructurada y las respuestas abiertas facilitando la recopilación de datos cualitativos guiados por las observaciones más relevantes para el entrevistado. Las entrevistas con miembros de la comunidad se realizaron de manera presencial entre el 13 al 14 de septiembre de 2025.

Tabla 4. *Partes involucradas relevantes en la recopilación de información primaria*

ID	Método	Género	Grupo	Rol social
E001	Entrevista	Masculino	Boreal Light GmbH	Desarrollador de tecnología
E002	Entrevista	Masculino	ZOA Colombia	Implementadores: Director de proyecto
E003	Entrevista	Masculino	ZOA Colombia	Implementadores: Técnico ZOA
E004	Entrevista	Femenino	Comunidad	Lideresa comunitaria
E005	Entrevista	Femenino	Comunidad	Habitante
E006	Entrevista	Masculino	Comunidad	Operario
E007	Entrevista	Femenino	Comunidad	Estudiante

E008	Entrevista	Masculino	Comunidad	Estudiante
E009	Entrevista	Femenino	Docentes	Profesor/a
E010	Entrevista	Femenino	Docentes	Profesor/a
E011	Entrevista	Masculino	Docentes	Profesor/a
E012	Entrevista	Masculino	Comunidad	Líder comunitario

Fuente: Elaboración propia.

6.3.4 Identificación y selección de indicadores

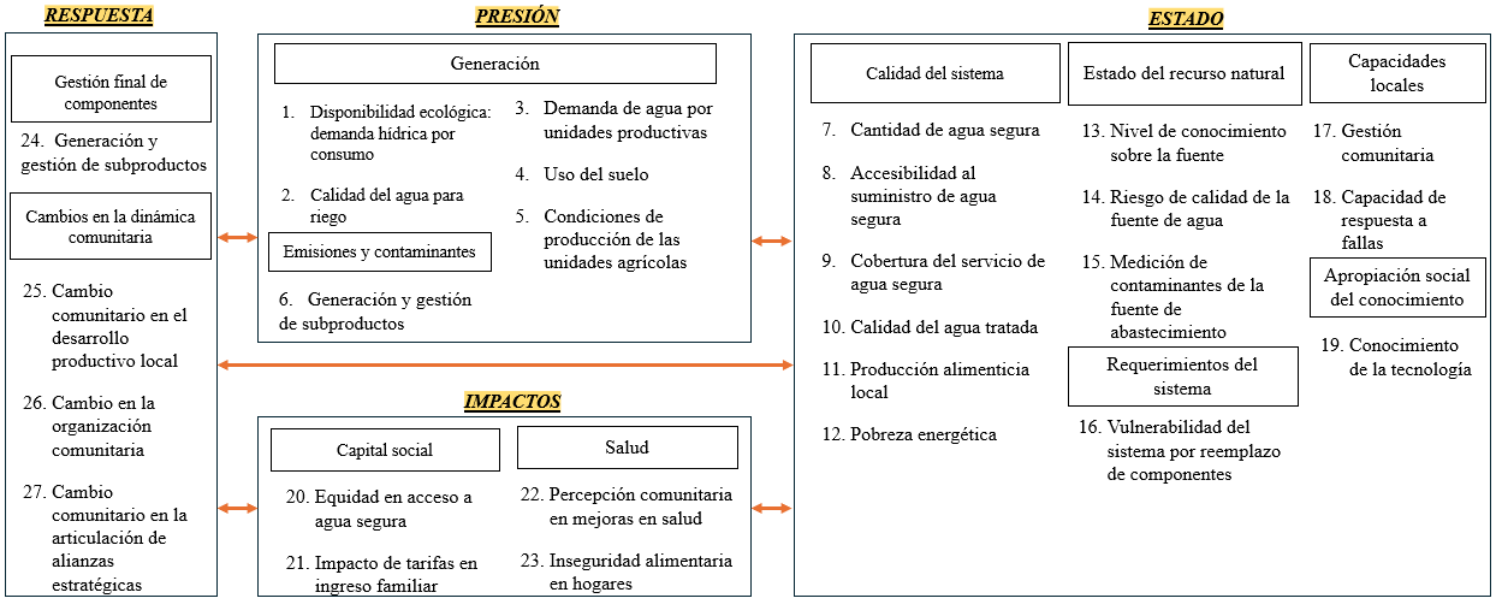
A partir de la revisión de literatura, guías institucionales y documentos académicos se identificaron documentos clave para la nutrir la evaluación con indicadores del Nexo (CINARA, 2014; MinAmbiente, 2007; Moreira et al., 2022; OMS, 2024). Se consideraron diferentes criterios de selección para los indicadores revisados: i) relevancia para la evaluación en la escala comunitaria, ii) respuesta a variables consideradas en el marco teórico del Nexo, así como, iii) parámetros de sostenibilidad del Nexo. Además de la literatura revisada, también se consultó con cinco académicos expertos en distintas áreas del conocimiento y asociados a la Universidad del Valle para verificar la relevancia de los indicadores propuestos y evaluar la viabilidad de su evaluación desde la escala comunitaria (Tabla 5).

Tabla 5. *Expertos consultados para análisis de indicadores de interés a evaluar*

ID	Género	Grupo	Área de experticia
E013	Femenino	Académico	Aguas subterráneas
E014	Masculino	Académico	Suelos
E015	Masculino	Académico	Sistemas energéticos
E016	Masculino	Académico	Sistemas de tratamiento de agua
E017	Masculino	Académico	Monitoreo de calidad del agua y análisis de laboratorio

La estructura de los indicadores seleccionados se organizó considerando un modelo Presión-Estado-Impacto-Respuesta que aporta una visión causal de los acontecimientos y se compone de cuatro componentes (Figura 7). El componente "Presión" desarrolla indicadores asociados a la descripción de la problemática o los resultados tras un nuevo proyecto; "Estado" se asocia a factores físicos con características medibles resultantes de las presiones en el sistema; la variable "Impacto" monitorea los efectos en el corto y largo plazo en el capital social, ambiental y tecnológico-económico; finalmente, "Respuesta" corresponde a la evaluación de acciones o dinámicas comunitarias derivadas antes un cambio (CIAT & Banco Mundial, 1999). Tras la primera revisión se obtuvo una lista de 43 indicadores. Esta matriz inicial fue discutida ampliamente en sesión de trabajo y fue refinada para evitar duplicación de información evaluada. Tras múltiples revisiones se obtuvo una lista final de 27 indicadores.

Figura 7. *Enfoque Presión-Estado-Impacto-Respuesta para el desarrollo de indicadores*



Fuente: Elaboración propia.

Los indicadores finales seleccionados representan una matriz teórica de evaluación. Se clasificaron según si evalúan la dimensión de agua, energía, alimentos o son transversales, es decir, en el caso de evaluar dos o más dimensiones del Nexo AEA y, si corresponden a variables de tipo ecológico, social o técnico-económico. En cada caso, los indicadores fueron normalizados entre 0 y 1 con el propósito de facilitar la comparabilidad entre los resultados obtenidos. La formulación de cada indicador se nutrió de un taller realizado por el equipo investigadores y se incluye como parte de los resultados ya que hace parte de los objetivos planteados para esta investigación.

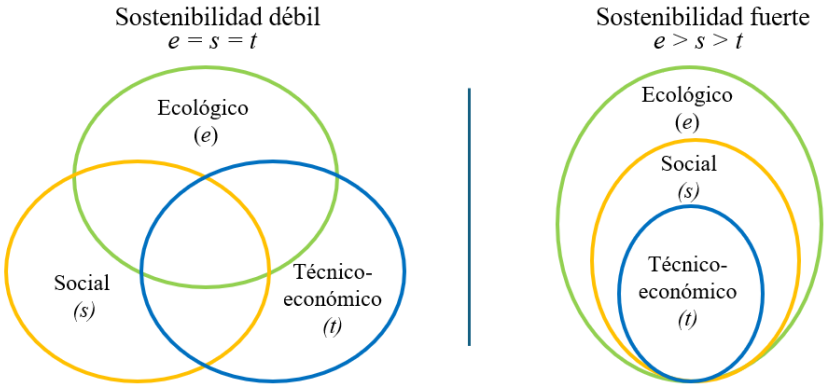
6.3.5 Evaluación y sostenibilidad del Nexo AEA en la escala comunitaria

La matriz de evaluación teórica fue aplicada a la evaluación del Nexo AEA en la comunidad de Katanamana. Los criterios de calificación para la escala comunitaria fueron desarrollados y validados en un taller de trabajo con un equipo de tres investigadores vinculados al proyecto y asociados a la escuela EIDENAR de la Universidad del Valle. El taller se realizó de manera presencial y permitió una revisión más detallada de los criterios de calificación propuestos y la lógica general de la matriz. La información de fuentes institucionales, informes del técnicos, literatura e información obtenida a través del trabajo de campo fue recopilada y sistematizada para sustentar la calificación de los parámetros de evaluación en cada indicador.

La sostenibilidad del Nexo fue evaluada desde el enfoque de sostenibilidad débil y fuerte (Figura 8). Son tres los componentes de sostenibilidad considerados, el ecológico, social y técnico-económico. Desde el enfoque de sostenibilidad débil los tres componentes son ponderados con igual magnitud. Por otro lado, desde el enfoque de sostenibilidad fuerte se prioriza la sustitución del capital natural por capital económico o social. En ese sentido, desde este enfoque se realiza la ponderación con el objetivo de priorizar el componente ambiental en la medida en que los

componentes social y técnico-económico son considerados subsistemas del sistema natural. La estimación de los ponderados fue establecida en base a revisión de literatura.

Figura 8. *Enfoque de sostenibilidad débil y fuerte*



Fuente: Elaboración propia.

7. Resultados

Esta sección presenta los resultados de esta investigación. Primero, se realiza una caracterización comunitaria que engloba el contexto local del territorio con el propio de la comunidad de Katanamana, fundamental para establecer una línea base de información referente a la comunidad estudiada. La caracterización comunitaria se presentara en base a los aspectos socioeconómicos, ambientales y tecnológicos. Segundo, se presenta la matriz de evaluación y la formulación de los indicadores particulares. Finalmente, se presentan los resultados de la evaluación obtenidos para el caso de estudio.

7.1 Caracterización comunitaria

7.1.1 Aspectos socioeconómicos

La Guajira es el departamento más septentrional de Colombia, cuenta con una extensión de 20.848 km^2 y una de las densidades poblaciones más bajas del país con 50,7 hab/km^2. Es un territorio semi-árido, comúnmente dividido en las subregiones de la Baja, Media y Alta Guajira. Uribia es el municipio más extenso del departamento con 8200 km^2, ubicado entre la zona de la Media y Alta Guajira (Alcaldía de Uribia, 2020). Con excepción de la ciudad de Uribia, todo el municipio hace parte del Resguardo Indígena de la Alta y Media Guajira de la comunidad Wayuu. De sus 195.532 habitantes se estima que el 96,18% de la población pertenece a la etnia Wayuu (DANE, 2018). En el municipio se identifican más de 22.037 puntos poblados dispersos y una tasa de densidad poblacional (22,82 hab/ km^2) muy inferior en relación a la tasa departamental (Alcaldía de Uribia, 2020).

Uribia enfrenta múltiples desafíos sociales y económicos. Presenta la tasa de pobreza multidimensional más alta del país, con un valor de 92,20% en 2022 (Alcaldía de Uribia, 2024). En términos prácticos, esto quiero decir que en Uribia el 92,20% de los hogares presenta carencias en al menos el 33,33% de los indicadores definidos por el DANE como lo son, el acceso limitado a fuentes de agua mejorada, rezago escolar, materiales inadecuados en las viviendas, inasistencia

escolar, deficiencias en saneamiento básico, alta dependencia económica, hacinamiento, dificultades para acceder a servicios de salud, barreras en los servicios de atención a la primera infancia, bajo logro educativo y analfabetismo.

La crítica situación en el territorio fue constatada con la Sentencia T-302 de 2017 emitida por la Corte Constitucional Colombiana donde se constató que los derechos fundamentales al agua, la salud y la alimentación de la niñez se encontraban vulnerados de manera persistente, generalizada y desproporcionada (Corte Constitucional de Colombia, 2017). A partir de esta situación, se ordenó al Estado Colombiano adoptar acciones urgentes y coordinadas para garantizar el acceso efectivo a estos derechos en los municipios de Uribia, Manaure, Maicao y Riohacha. A continuación se describen aspectos contextuales relevantes en términos de educación, salud y actividades económicas tanto del municipio de Uribia, como de la comunidad de Katanamana.

En términos de educación, el municipio reporta una baja cobertura a nivel secundario y medio (60,98% y 29,96% respectivamente) y una de las mayores tasas de deserción escolar (4,57%) en la educación media (DNP, 2018). Para 2018, solo el 23,04% de los jóvenes entre 15 y 17 años que deberían estar cursando décimo u once efectivamente lo estaban haciendo, y únicamente el 5,44% tenía la edad correspondiente al grado. Por otro lado, según los resultados de las pruebas de estado ICFES, los planteles del municipio se ubican en categoría D, la clasificación más baja al contar con resultados inferiores o muy inferiores en las pruebas. Este rezago se relaciona con la infraestructura deficiente, los recursos económicos limitados, la planta de personal incompleta, la marcada dispersión territorial y el mal estado de las vías terciarias.

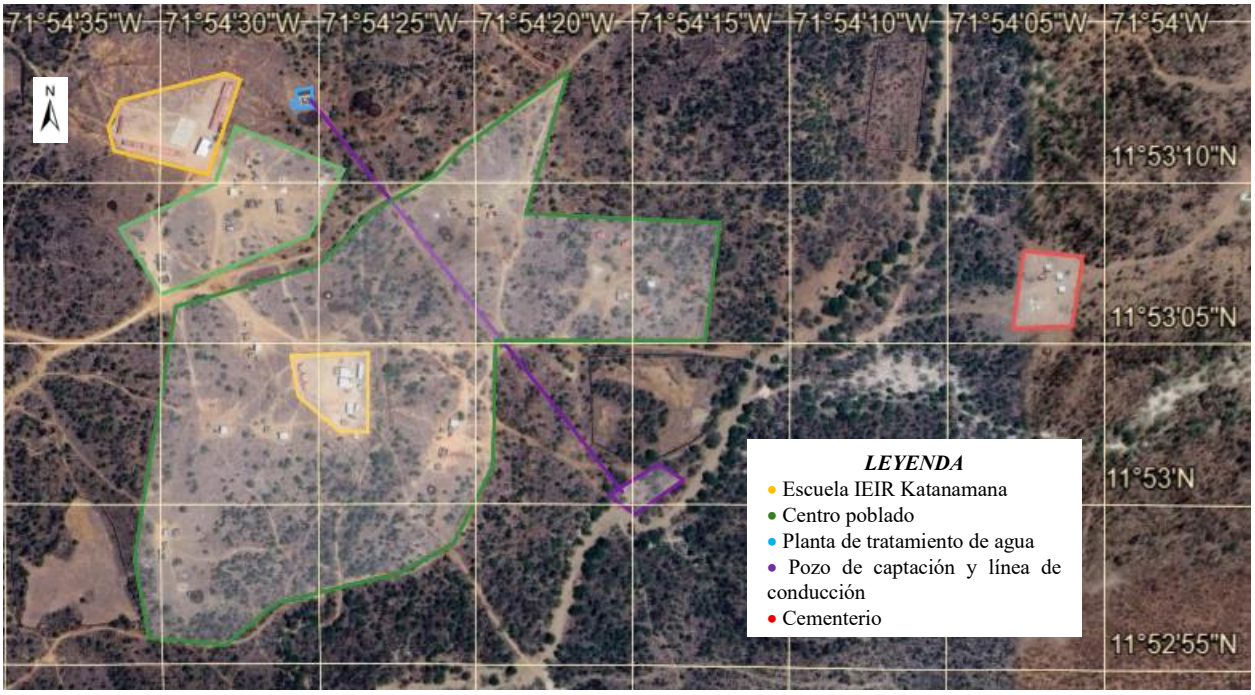
Asimismo, el panorama sanitario refleja condiciones estructurales de alta vulnerabilidad. La mayoría de la población está afiliada al régimen subsidiado (95,32%) (Alcaldía de Uribia, 2020). Aun así, persisten eventos de morbilidad y mortalidad asociados a factores socioeconómicos y ambientales, así como a enfermedades prevenibles. Entre los principales eventos de salud se registran desnutrición aguda en menores de cinco años, bajo peso al nacer, dengue, tuberculosis pulmonar y varicela (Alcaldía de Uribia, 2020). Enfermedades como la diarrea aguda y la infección respiratoria aguda también reportan una alta incidencia. La primera se relaciona con el consumo de agua no tratada, alimentos contaminados, deficientes prácticas de higiene y mala disposición de residuos sólidos. La segunda se asocia a condiciones ambientales adversas y prácticas domésticas que dificultan la prevención. Aunque la mortalidad en menores de un año ha disminuido con el tiempo (53,85% en 2006 a 14,68% en 2018), continúa en niveles superiores a la media nacional y departamental. Lo mismo ocurre con la mortalidad en menores de cinco años, que presenta fluctuaciones pero permanece elevada. Estos eventos de salud responden a un origen multicausal en el que convergen la limitada atención en salud, el restringido acceso a agua segura y la ingesta insuficiente de alimentos en calidad y cantidad.

Por otro lado, dentro de las actividades económicas destacan la ganadería ovino-caprina. Esta actividad cumple un papel social fundamental para la población rural y para las comunidades indígenas, ya que aporta carne y leche y, al mismo tiempo, sostiene prácticas culturales y actividades económicas tradicionales. En la actualidad, ovejas, cabras y chivos son especialmente valorados en países en desarrollo por su capacidad para aprovechar pasturas escasas, soportar condiciones climáticas adversas y reproducirse con ciclos de gestación cortos (Cámara de Comercio La Guajira, 2024). Según el Informe Socioeconómico de La Guajira de 2024, en Colombia, la población ovina ascendía a 1.792.245 animales, de los cuales cerca del 45,49% se encontraban en La Guajira. La población caprina alcanzaba 1.148.239 animales y aproximadamente el 79,1% se localiza en este mismo departamento. Estas características otorgan a La Guajira una ventaja notable, al liderar el

inventario nacional de ambas especies, aunque la actividad continúa con bajos niveles de tecnificación y formalización. Por otro lado, existe un interés desde la administración municipal de fortalecer los procesos agrícolas locales como sustento económico de las zonas rurales (Alcaldía de Uribia, 2024). Para 2023 se registró un aumento del 208,15% en hectáreas sembradas con cultivos transitorios (31.422 ha) y del 134,76% en cultivos permanentes (13.884 ha). Aun así, el enfoque esta dado como agricultura de subsistencia para fortalecer la seguridad alimentaria dentro del territorio y no representa una fuente de ingreso para las comunidades de la Alta y Media Guajira.

Katanamana es una comunidad indígena ubicada en el corregimiento de Jojoncito, Uribia con una población aproximada de 842 habitantes. En el centro poblado se encuentra la sede principal de la Institución Etnoeducativa Integral Rural (IEIR) Katanamana, la planta de tratamiento de agua, el punto de captación de agua desde el pozo y la zona del cementerio (Figura 9). El resto de la comunidad se encuentra dispersa hasta trece kilómetros a la redonda del centro poblado.

Figura 9. *Distribución de lugares principales en la comunidad de Katanamana*



Fuente: Elaboración propia.

La IEIR Katanamana es una institución pública como 99,8% de las sedes educativas del municipio de Uribia (DNP, 2018). La institución ofrece cobertura desde Preescolar hasta Educación Media a 362 estudiantes y funciona como seminternado, una modalidad frecuente en el territorio que permite a estudiantes que cuenta con un lugar de residencia lejano, la permanencia en el centro educativo y la asistencia regular a sus clases (Figura 10). A la fecha del trabajo de campo, se reportaron setenta estudiantes viviendo internos en la institución. Además de la sede principal, la IEIR Katanamana se despliega en otras 32 sedes satélites en distintas comunidades rurales que cubren los cursos de Básica Primaria. El cuerpo docente está conformado por veinte profesores que residen de manera permanente en la institución. La mayoría proviene de otras regiones del país y no pertenece a la comunidad local

La tendencia municipal respecto al nivel educativo coincide con lo observado en Katanamana, donde, según una fuente entrevistada, algunos niños deben caminar cerca de dos horas para llegar a la escuela y salen de sus casas desde las tres de la mañana para evitar el sol (comentado por E009). La misma fuente reportó que muchos padres necesitan ayuda con las tareas del hogar diarias, por lo que, se percibe una alta deserción en los cursos de educación media. Para diciembre de 2025, se reportó la primera generación de graduandos de la institución que finalizó sus estudios de educación media.

El centro educativo recibe apoyo del Programa de Alimentación Escolar (PAE), mediante el cual cada semana llegan productos frescos para la preparación de los alimentos de los estudiantes. Según el rector y líder comunitario, aunque el programa suministra los insumos, las raciones no son suficientes para cubrir a todos los niños y a menudo es necesario "*hacer rendir la comida*". Esta situación coincide con brechas reportadas por el DNP en 2018, que señala que cerca del 5,49% de los estudiantes matriculados queda por fuera del programa.

Figura 10. *Institución Etnoeducativa Integral Rural Katanamana*



Nota. A la izquierda: Visión panorámica de IEIR Katanamana, enramada para hospedaje de estudiantes y salón comunitario. A la derecha: Salones de clase de Primaria. Fuente: Autor, 2025.

Por otro lado, la atención en salud en la comunidad de Katanamana se basa principalmente en prácticas tradicionales. La comunidad cuenta con un *Piachi*, quien brinda cuidados propios de la medicina ancestral y acompaña los procesos de sanación cotidianos. Ante enfermedades graves, los habitantes deben desplazarse hasta Uribia o incluso hasta Riohacha, ya que la comunidad no dispone de un centro de salud. De manera esporádica llegan brigadas que realizan jornadas de vacunación y actividades preventivas en coordinación con la Secretaría de Salud, aunque su frecuencia y cobertura no están claramente documentadas.

En Katanamana las principales fuentes de ingreso se concentran en el pastoreo y la elaboración y venta de artesanías, actividades que mantienen una estrecha relación con las prácticas tradicionales de la comunidad. También es frecuente el trueque de productos como parte de la dinámica económica cotidiana. Para realizar estas actividades comerciales, los habitantes de la comunidad se desplazan hasta el centro urbano de Uribia, a tres horas de distancia desde el centro poblado de Katanamana. Dado que la actividad económica de la comunidad es limitada, han encontrado otras vías para traer proyecto de *desarrollo* al territorio. Por ejemplo, a través del trabajo en cooperación con entidades no gubernamentales como ZOA y con el sector público con la Alcaldía de Uribia y la Gobernación de La Guajira. De esta forma se han gestado proyectos como el sistema de desalinización solar, el encerramiento de las fuentes de agua salobre, la sala de cómputo para la escuela y algunas unidades de paneles solares para la iluminación de zonas comunes.

7.1.1.1 Acceso y disponibilidad de agua segura

Según el DANE, la cobertura de acceso a agua potable en la zona rural de Uribia para 2018 fue de 13,20% considerando soluciones alternativas para la zona rural como el acceso a fuentes mejoradas en pilas públicas, molinos, micro acueductos, etcétera (Alcaldía de Uribia, 2024; DANE, 2018).

La comunidad de Katanamana accede a diversas fuentes de agua tanto salobre como dulce. Entre las fuentes de agua salobre se encuentran dos pozos artesanales de agua ubicados a 800 metros de la escuela. Asimismo, las fuentes de agua dulce incluyen jagüeyes, aguas lluvia recolectadas en hogares, agua tratada del Sistema de Desalinización Solar (SDS), la recepción de carrotanques o la compra directa de agua embotellada. La recolección de agua de fuentes como el jagüey, el SDS, la distribución del carrotanque y los pozos salobres se realiza por acarreo de pimpinas en burro o en moto (Figura 11).

Figura 11. *Recolección de agua en la comunidad de Katanamana*



Nota. De izquierda a derecha: recolección de agua en punto de hidratación del sistema de desalinización solar; acarreo en burro; acarreo en moto en pozo salobre; punto de abastecimiento en pozo salobre. Fuente: Autor, 2025.

En el taller comunitario, se pudieron establecer las diferentes fuentes mencionadas, así como los diversos usos dados y los grupos poblacionales en uso de cada fuente (Figura 12). Se pudo establecer que la principal fuente de agua dulce es el agua tratada con osmosis inversa por el SDS al no tener ningún costo para el usuario y representar una fuente segura. Cabe destacar que la cantidad disponible está limitada a una dotación por familia de 100 litros por semana, que puede ser recolectada según el horario establecido por la misma comunidad en el punto de hidratación ubicado contiguo a la escuela. Sobre el SDS se darán mayores detalles tanto técnicos, como de costos asociados y mecanismos de financiación en la sección 7.1.3.

La comunidad manifiesta que contar con un punto de hidratación de agua dulce en el centro poblado ha tenido efectos en las tareas de la vida diaria:

> "*Antes cuando no estaba la planta aquí, por aquí pasaban varias personas en burrito. Se iban a buscar un jagüey, que es como una laguna de lluvia que eso pues… no es tan limpio, de ahí toman los animales. Iban hasta allá donde está la antena (al cerro). Salían en la mañana y regresaban hasta las cuatro de la tarde…*" – comentado por E004

En menor medida, la comunidad accede a agua dulce a través de compra de agua en carrotanque o agua embotellada, aunque implica costos elevados y dificultades de transporte desde Uribia. Por un lado, la comunidad dispone de un carrotanque con capacidad de 10.000 litros. Aunque la operación del vehículo no es continua destacan tres situaciones donde es comúnmente usado. Primero, antes del SDS se utilizaba para transportar agua desde Uribia hasta la comunidad. Segundo, como mecanismo de contingencia ante fallas del sistema de tratamiento. En ambos casos, la compra semanal de agua subsidiada por la escuela y los profesores era destinada principalmente al abastecimiento de la comunidad educativa. Finalmente, tras la implementación del SDS se ha empleado ocasionalmente para distribuir agua desde Katanamana hacia otras comunidades rurales más apartadas.

Por otro lado, la compra de agua embotellada es más frecuente entre los profesores de la escuela, quienes en su mayoría provienen de otras regiones y no están habituados al agua salobre. Uno de ellos manifestó que "*el agua de la planta me cae pesado… genera como gases*" y por eso prefiere comprar embotellada para beber (comentado por E008).

Figura 12. *Usos del agua en la comunidad de Katanamana*

Parámetro		**Fuente de abastecimiento**						
		Jagüey	**Planta de agua**	**Pozo P1**	**Pozo P2**	**Carrotanque**	**Embotellada**	**Aguas lluvia**
Precio 20 lts (COP)		$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 800	$ 4200	$ 0
Usos	Beber	👥 🎓	👥 🎓 🧑‍🏫	Uso exclusivo para abastecer el sistema de desalinización solar		👥 🧑‍🏫	🧑‍🏫	
	Cocinar	👥 🎓	👥 🎓 🧑‍🏫			👥 🧑‍🏫		👥 🎓
	Aseo personal				👥 🎓 🧑‍🏫			👥 🎓 🧑‍🏫
	Aseo doméstico				👥 🎓 🧑‍🏫			👥 🎓 🧑‍🏫
	Agricultura							👥 🎓
	Animales	👥			👥			

Nota. Se distinguen tres grupos poblaciones relevantes: comunidad general (👥), estudiantes del IEIR Katanamana (🎓) y cuerpo profesoral (🧑‍🏫). El costo presentado corresponde al valor pagado por los habitantes. El valor para la planta es subsidiado, como parte de la evaluación se presenta un análisis de costos sin subsidio. Esta información fue recopilada en base a la actividad 2 realizada en el taller comunitario (véase Anexo 5) y complementada con entrevistas realizadas. Fuente: Elaboración propia.

El jagüey, un reservorio natural que almacena agua dulce de la temporada de lluvias, es otra de la fuentes fundamentales para las comunidades Wayuu. Su funcionamiento está limitado a periodos de seis meses en el año asociado a los ciclos de precipitación entre abril y mayo, y entre octubre y diciembre. En Katanamana existen dos jagüeyes ubicados a 10 kilómetros desde la escuela. La comunidad manifiesta que en los periodos prolongados de sequía los jagüeyes llegan a secarse por completo, lo que reduce considerablemente la disponibilidad de agua dulce, este fue el caso durante la visita de campo. Al ser agua dulce, el uso es priorizado para beber y cocinar alimentos. Sin embargo, el jagüey no representa una fuente de agua segura para el consumo humano, al ser un espacio abierto también es usado por ovinos y caprinos que pastorean libres por la zona. Los

profesores, provenientes de regiones urbanas, no son usuarios de esta fuente que fue descrita como "*un agua café"* (comentado por E011).

Además de acumularse en los jagüeyes, el agua de lluvia es recolectada en hogares y utilizada principalmente para labores de aseo. Los participantes del taller comentaron que durante la temporadas de lluvias el agua recolectada también es utilizada para el riego de cultivos y manifestaron que el agua salobre no es usada para estos fines "*pues quema las plantas"* (comentado por E005).

Todos los participantes coincidieron en que las fuentes salobres son usadas principalmente para el aseo personal y doméstico, así como para el consumo de animales. La comunidad cuenta con dos pozos artesanales de agua salobre de entre 10 a 12 metros de profundidad. El Pozo 1 (P1) abastece la planta de tratamiento y presenta una concentración de sales moderada (SDT: 2.221ppm), mientras que el Pozo 2 (P2) se destina al consumo directo de agua salobre y registra concentraciones de sales más altas (SDT: 3.460ppm). Ambos disponen de sistemas de bombeo sumergibles operados diariamente por un encargado.

Una situación destacada por la comunidad ocurrió durante el mes de junio de 2025. Durante tres semanas el acceso a agua dulce se vio limitado pues el SDS estuvo fuera de operación y se encontraban, además, en sequía los jagüeyes. La comunidad comentó que tuvieron que regresar a consumir agua salobre para beber y preparar alimentos durante este periodo. Manifiestan que el cambio generó molestias estomacales y diferencias notables en el sabor de los alimentos (comentado por E008). Comentaron además, que fue muy difícil no contar con el agua producida por la planta y tener que regresar al agua salobre, de la cual ya se habían desacostumbrado.

7.1.1.2 Seguridad alimentaria

La inseguridad alimentaria moderada o grave en La Guajira fue del 52,4% en el 2024, en base a encuestas realizadas en hogares rurales (DANE, 2024). La situación es más crítica en hogares con autorreconocimiento étnico-racial de los jefes o jefas del hogar, el 46,2% de los hogares cuyos jefes/as se reconocen como indígenas reportan los niveles más altos de prevalencia. Asimismo, el Índice de Priorización en Seguridad Alimentaria reportado por el DNP, se reporta como alto para el municipio (Alcaldía de Uribia, 2024). Este índice es estimado en base a 4 componentes de seguridad alimentaria. Los componentes incluyen: a) la disponibilidad de alimentos, entendida como la presencia suficiente y constante de productos alimenticios, ya sea por producción local o por abastecimiento externo; b) el acceso económico a alimentos, factor que evalúa la capacidad de los hogares para adquirir alimentos a partir de sus ingresos; c) el acceso físico a alimentos, que considera las condiciones que permiten llegar efectivamente a los alimentos, como la distancia a los puntos de venta, la infraestructura de transporte o las características del territorio; y, d) la adecuación de los alimentos, que examina si la dieta disponible es nutritiva, segura y culturalmente pertinente para la población. Los dos primeros componentes, reportados en el cuartil inferior de la escala establecida por el DANE, corresponden a los más críticos reportados para el municipio de Uribia. Este panorama conecta con el encontrado en Katanamana donde los hogares tienen tanto limitaciones económicas para adquirir alimentos de manera regular como dificultades territoriales para asegurar una oferta suficiente, permanente y estable.

En coherencia con la marcada vocación pastoril de la comunidad, animales como el chivo, la oveja y el conejo constituyen una base central de la dieta. Para complementar su alimentación, los habitantes se desplazan semanalmente hasta Uribia, donde adquieren frutas, verduras, carnes y otros

productos, ya sea mediante compra directa o a través de prácticas de trueque. En palabras de la comunidad, "*se come de la artesanía y el pastoreo, el que no tiene aguanta*" (comentado por E005). Reflejando una estrecha dependencia entre las actividades económicas locales y la seguridad alimentaria.

En particular, la institución educativa IEIR Katanamana adscrita al PAE, recibe semanalmente alimentos frescos por parte de la operadora de alimentos encargada. Los insumos incluyen frutas, pollo, carne, salpicón, frijol, verduras y batidos. El servicio de alimentación es operado por seis manipuladoras de alimentos, tres destinadas a los estudiantes internos, y tres para los estudiantes externos. La provisión de alimentos es un factor indispensable para garantizar las necesidades nutricionales de los estudiantes, especialmente, en un contexto donde los indicadores de desnutrición siguen siendo críticos.

Complementario al abastecimiento de alimentos de fuentes externas y el trueque, la comunidad manifiesta que los hogares realizan agricultura para auto abastecerse. La agricultura en la comunidad está estrechamente ligada a la temporada de lluvia, donde se aprovecha el agua dulce para el riego de cultivos. Dentro de los productos cultivados están el maíz de clima cálido, frijol guajiro, plátano, banano, algunos árboles frutales y la patilla, esta última destaca por tener una alta resistencia a la salinidad y bajos requerimientos de riego. Tradicionalmente, la agricultura se realiza sin uso de fertilizantes, permitiendo descansar el suelo durante la temporada seca y haciendo uso de labranza manual. Además, aunque desde la escuela se desarrollan iniciativas para pequeños proyectos agrícolas, reconocen que no hay tanto interés de los jóvenes en estas labores:

> *"Ahora las nuevas generaciones buscan otras maneras de conseguir sustento. Se emplea mucho tiempo, se emplea mucho esfuerzo y a veces el cultivo no da. A veces se obtiene es pérdida y no ganancia.*" – comentado por E004.

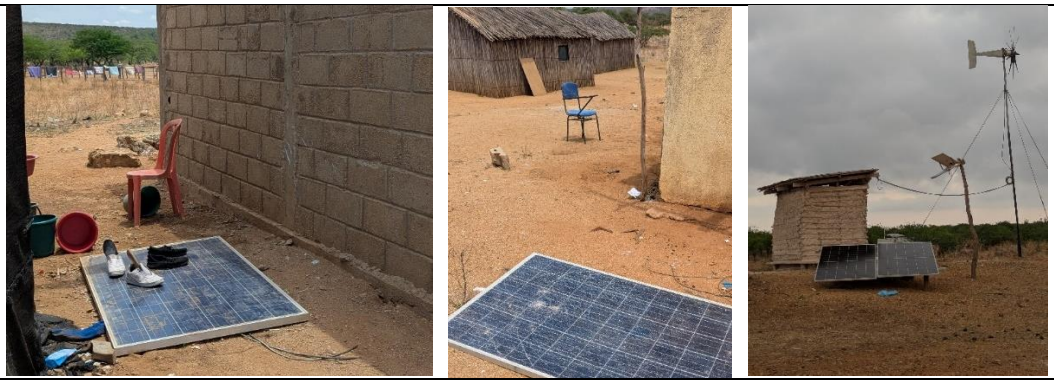
Al indagar por la variabilidad en la productividad de los cultivos, señalaron que los patrones de precipitación son mucho más variables ahora. Por ejemplo, con periodos de lluvias cortos e intensos y lapsos de tiempo de sequía prolongada, lo que genera incertidumbre sobre la viabilidad y éxito del cultivo.

7.1.1.3 Acceso a electricidad

En Colombia, los resguardos indígenas han enfrentado privaciones históricas a servicios básicos. Según el informe de Pobreza Energética Multidimensional del 2024, 77% de los resguardos indígenas de Colombia enfrentan condiciones graves de pobreza energética (MinMinas, 2024). El mismo informe reportó que Uribia es el municipio con mayor índice de Pobreza Energética Multidimensional de toda la región Caribe con 34.486 hogares en esta condición.

La comunidad de Katanamana no cuenta con conexión a la red eléctrica. La energía disponible proviene de sistemas fotovoltaicos de pequeña escala que cubren únicamente necesidades básicas (Figura 13). La institución IEIR Katanamana dispone de algunos paneles solares que alimentan las salas de cómputo, brindan iluminación a la enramada comunitaria y permiten la carga ocasional de teléfonos celulares. En la zona donde residen los estudiantes existe un pequeño panel destinado exclusivamente a la carga de dispositivos, mientras que los docentes cuentan con paneles en sus viviendas, aunque varios de ellos se encuentran en mal estado.

Figura 13. *Sistemas fotovoltaicos en la comunidad de Katanamana*



Nota. Se puede observar algunos de los sistemas fotovoltaicos usados por los estudiantes (izquierda), los profesores (centro) y para las zonas comunitarias (derecha). Fuente: Autor, 2025.

La comunidad también opera sistemas fotovoltaicos que permiten el funcionamiento de las bombas sumergibles y del sistema de desalinización solar. Al hacer parte de las soluciones tecnológicas de interés de esta investigación, la sección 7.1.3.1 presentará todos los detalles asociados. Estas soluciones energéticas, aunque limitadas, resultan esenciales para garantizar el suministro de agua y el funcionamiento mínimo de la infraestructura comunitaria.

7.1.2 Aspectos ambientales

Uribia combina una oferta hídrica limitada, una marcada estacionalidad en las lluvias y la influencia constante de vientos intensos, factores que modelan tanto el paisaje como las actividades cotidianas de la comunidad. A continuación se describen algunos aspectos relevantes que caracterizan las condiciones ambientales de la zona.

7.1.2.1 Condiciones climáticas y edáficas

El municipio se ubica en el piso térmico cálido, correspondiente a altitudes entre los 0 y 1000 metros sobre el nivel del. El clima se mantiene opresivo y ventoso durante todo el año, con temperaturas que generalmente oscilan entre 24 °C y 31 °C. La temporada más cálida se extiende desde agosto a noviembre, y septiembre es el mes más caluroso, con máximas promedio de 31 °C y mínimas de 26 °C. La temporada más fresca es desde diciembre hasta marzo, con temperaturas máximas diarias por debajo de 29 °C. Febrero es el mes más frío, con mínimas promedio de 24 °C y máximas de 29 °C (Alcaldía de Uribia, 2024).

En Uribia la ausencia de sistemas montañosos amplios impide que los vientos descarguen completamente su humedad. Únicamente en la zona de las elevaciones de la Serranía de La Macuira, la Serranía de Jarara, la Serranía de Cosinas y la Serranía de Cojoro se interceptan masas de aire húmedo. Las masas de aire retenidas generan mayores precipitaciones en las zonas de barlovento, lo que permite el desarrollo de bosques de pequeño porte en los microvalles y cañadas asociados (Alcaldía de Uribia, 2020). En el resto del territorio el paisaje esta mediado por condiciones climáticas semi áridas y caracterizadas por contar con bajas precipitaciones, alta evapotranspiración potencial y una vegetación dominada por matorrales y pastizales.

Aunque incrementan la evapotranspiración potencial y dificultan el desarrollo de la vegetación, las fuertes corrientes de vientos son relevantes pues contribuyen a mitigar las temperaturas extremas. A principios de año los vientos alisios del noreste son particularmente intensos, mientras la Zona de Convergencia Intertropical permanece en latitudes cercanas a los cero a cinco grados generando la época seca en toda la región. La fase más ventosa del año se extiende por cerca de 8 meses, entre diciembre y agosto, con velocidades promedio de 20,4 km/h. Julio es el mes más ventoso (24,6 km/h) y octubre, el mes que reporta las menores velocidades (15,7 km/h) kilómetros por hora. Estas condiciones también sustentan un notable potencial para el desarrollo de la energía eólica, pues solo en La Guajira se estima una capacidad instalada aproximada de veintiún mil megavatios, suficiente para cubrir dos veces la demanda eléctrica actual del país.

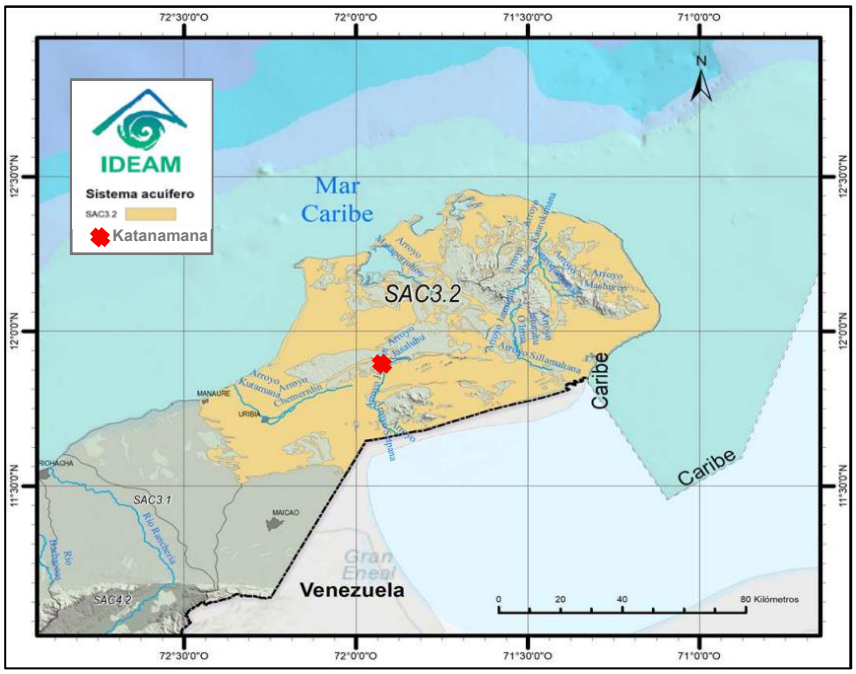
La oferta pluviométrica anual en La Guajira es altamente irregular (Alcaldía de Uribia, 2020). Más del 70% de las precipitaciones se concentra en los meses de septiembre, octubre y noviembre. Esta periodo es el principal y en ocasiones el único lluvioso del año. Un segundo periodo de lluvias ocurre alrededor de abril o mayo, aunque su magnitud es considerablemente menor. Las precipitaciones invernales suelen presentarse en pocos eventos de gran intensidad, con registros entre 80 y 181 milímetros en veinticuatro horas. Estos eventos contrastan con prolongados periodos de sequía que pueden superar los seis meses e incluso extenderse por más de tres años, como ha ocurrido recientemente en la península. Según registros del IDEAM, las mayores precipitaciones multianuales se observan en zonas como Orozco, Ahuyama, Cabo de la Vela, Jonjoncito, el arroyo Uresh en Perpaná, Errumajana en Buenos Aires, Siapana, Rancho Grande y Jasay, con valores que oscilan entre 260 y 459 milímetros anuales (Alcaldía de Uribia, 2020). Las lluvias, aunque escasas y concentradas en breves episodios, son fundamentales para las comunidades de la Alta y Media Guajira.

En relación al suelo, según la clasificación de capacidad de uso de las tierras del IGAC de 2024, el territorio se encuentra identificado dentro de la unidad de suelo 7c-10 (IGAC, 2024). Esta unidad se extiende en un 36,6% del territorio departamental (290.309 ha). Los suelos pueden ser profundos o muy superficiales, limitados en algunos casos por fragmentos de roca. Presentan buen drenaje, texturas entre moderadamente gruesas y moderadamente finas, reacción ligeramente alcalina y niveles de fertilidad de moderados a bajos (IGAC, 2024). De igual forma, el desarrollo del suelo se ve limitado por los factores climáticos presentados anteriormente. Se evidencian procesos de erosión moderada y severa, abundante pedregosidad superficial, drenaje natural excesivo, salinidad moderada y alta evapotranspiración. Por estas razones, los usos recomendados se orientan a la conservación de los ecosistemas y de la vida silvestre, así como, a actividades recreativas de bajo impacto o sistemas silvopastoriles.

7.1.2.1 Sistema acuífero en la Alta Guajira

En el municipio de Uribia no existe ninguna arteria fluvial permanente que pueda clasificarse como río. En el territorio, únicamente se presentan cauces naturales o zanjas de erosión conocidos como arroyos, por los cuales escurren de manera torrencial las aguas de lluvia durante los periodos invernales. Debido a la ausencia de corrientes superficiales estables, las principales fuentes de agua provienen del sistema acuífero de la Alta Guajira, identificado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y caracterizado en 2018 en el Estudio Nacional del Agua (ENA) como el sistema acuífero de la Alta Guajira SAC3.2 como se observa en la Figura 14 (IDEAM, 2022; SGC, 2014).

Figura 14. *Mapa del sistema de acuífero de la Alta Guajira SAC3.2*



Fuente: Adaptado de IDEAM, 2022.

Las zonas de recarga del SAC 3.2 se dan en tres puntos. Primero, en la Formación Castilletes a lo largo de la falla de Oca y en el límite entre la Media y Alta Guajira. Aquí los depósitos sedimentarios recientes y terciarios contactan con rocas cretácicas, el flujo subterráneo transita bajo los depósitos cuaternarios asociados al río Ranchería y descarga hacia la parte central de la Media Guajira, con aportes locales hacia Venezuela. Predominan dos direcciones de flujo: sureste a noroeste, con trayectorias locales hacia el noreste, y un flujo norte a sur con descarga hacia el suroeste. Segundo, en los Depósitos del Cauce Aluvial con un movimiento preferencial del agua subterránea de sur a noroeste y con flujos locales hacia el noreste. La recarga ocurre principalmente a lo largo de la falla de Oca, el tránsito se desarrolla sobre la sabana de la Media Guajira y la descarga final se dirige hacia la costa Caribe en el noroeste del departamento. Finalmente, en la zona del sistema de fallas Oca, Cuiza y Macuira, donde se presenta un intenso fracturamiento que facilita la infiltración de aguas lluvias. El ENA reportó las recargas estimadas para las zonas Castilletes y de Cauce Aluvial, así como información sobre la hidrogeoquímica regional. No obstante, no se registra información sobre reservas ni demanda calculada del sistema acuífero (Tabla 6).

Tabla 6. *Características del acuífero SAC 3.2*

Parámetro	Valor
Recarga estimada:	
Formación Castilletes	3,6 x 10^6 m^3/año
Dep. de Cauce Aluvial	40 x 10^6 m^3/año
Reservas calculadas	No registra información
Reservas explotable	No registra información
Demanda calculada	No registra información

Hidrogeoquímica regional:	
Conductividad eléctrica	415 – 59830 µS/cm
Salinidad	0,248 – 40,36 psu
pH	4,19 - 9,47
Temperatura	28,7 – 31,3 °C
Usos del agua	No registra información

Fuente: IDEAM, 2022.

La clasificación hidrogeoquímica e isotopía se estableció a partir del análisis de pozos de monitoreo distribuidos a lo largo del sistema acuífero. El análisis fisicoquímico completo reporta la naturaleza del agua subterránea en todas las unidades geológicas como clorurada sódica, es decir, que los principales iones presentes en el agua son cloruros o sodio (Tabla 7). La elevada mineralización sugiere una prolongada interacción agua-roca y una posible influencia costera, además de limitar el uso para el consumo humano y el riego sin tratamiento previo.

Tabla 7. *Características hidrogeoquímicas del sistema de acuíferos SAC3.2*

No.	Sistema	Características
1	Depósito de Llanura Aluvial	Clorurada sódica con un contenido de cloruros entre 450 y 700 mg/l.
2	Formación Castilletes	Clorurada sódica con un contenido de cloruros de 450 mg/l.
3	Formación La Luna	Clorurada sódica con alta concentración de sulfatos.
4	Acuífero de Cauce Aluvial	Clorurada sódica con una concentración moderada de magnesio.

Fuente: SGC, 2014.

7.1.2.2 Configuración hidrogeológica en Katanamana

En el 2014, se realizó un monitoreo de 1811 puntos de agua entre captaciones de tipo pozo, aljibe, jagüey y manantial. Entre los puntos muestreados se encuentra la captación tipo aljibe en Katanamana en la vereda Jonjoncito. El aljibe muestreado corresponde con el pozo P2, como es denominado en este documento, que sigue siendo una de la fuentes de abastecimiento de agua salobre estando en uso por la comunidad (véase sección 7.1.1.1).

El pozo artesanal P2 se localiza en una unidad geomorfológica de planicie aluvial, típicamente asociada a antiguos cauces fluviales con depósitos de grano medio a grueso (arenas y gravas (SGC, 2014). Geológicamente corresponde a la Formación Palanz, que de acuerdo al modelo geológico hace parte de los sistemas acuíferos discontinuos de extensión regional a local, con baja productividad y carácter generalmente confinado, desarrollados en rocas sedimentarias consolidadas de origen marino y continental. La localización de P2 en el cauce aluvial y el material poroso confiere una alta conectividad hidráulica al sistema. Esto favorece la circulación y mezcla de aguas, pero a su vez, incrementa la vulnerabilidad del acuífero ante procesos de salinización.

Los parámetros fisicoquímicos registrados corresponden a un agua de tipo salobre, con moderada a alta mineralización, coherente con la composición clorurada–sódica reportada para la zona. La composición salobre del agua se evidencia en los valores elevados de alta conductividad eléctrica, sólidos disueltos y salinidad, así como baja resistividad (Tabla 8). Los resultados de la

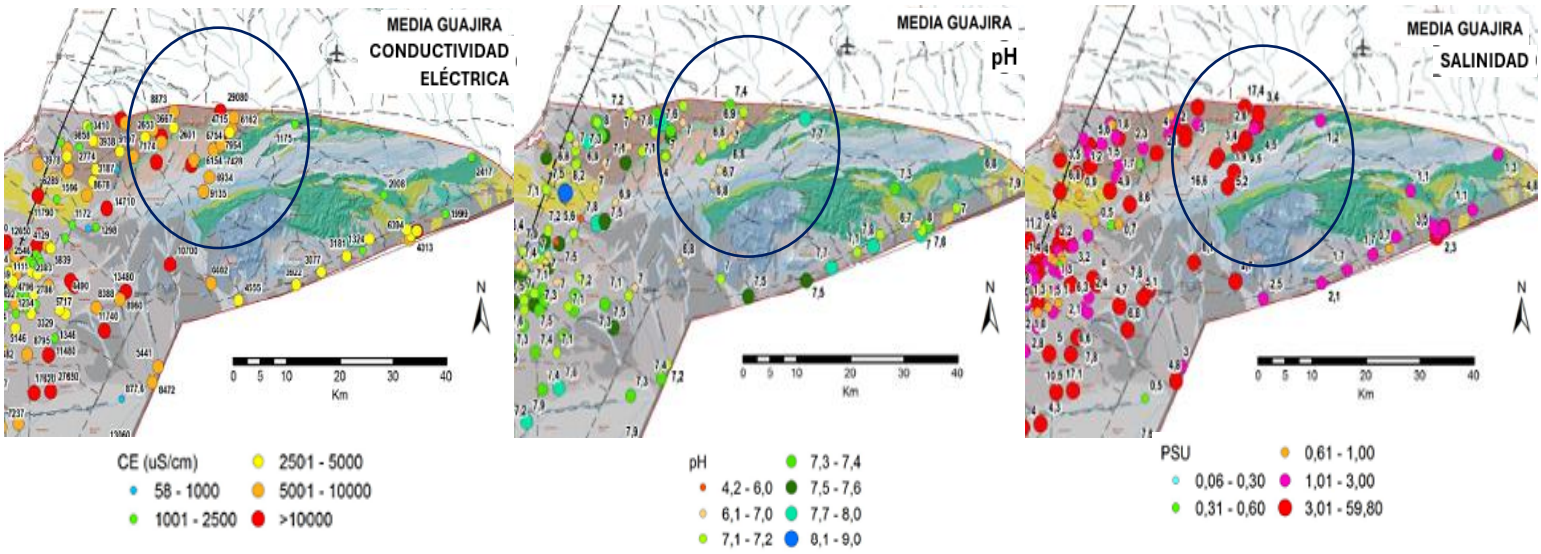
caracterización de P2 sugieren altos tiempo de residencia del agua subterránea y recargas limitadas del acuífero, evidenciado con la acumulación de iones disueltos de la interacción prolongada agua-roca y favorecido por las bajas precipitaciones de la zona. Además, se monitorearon los parámetros fisicoquímicos de otros puntos cercanos (Figura 15). En este caso, se pudo corroborar la tendencia de altos valores de conductividad eléctrica (>2501 µS/cm) y salinidad (>1,01 psu), consistentes con aguas de características salobres y saladas. Aunque estos reportes permiten tener una idea sobre las características del sistema, la última actualización fue en el año 2014 y es posible que existan cambios relevantes en los parámetros de los puntos muestreados.

Tabla 8. *Caracterización hidrogeológica del pozo salobre (P2)*

Ubicación	La: 11°53'00,333372"N Lo: 71°54'15,289443"W		Este: 909907 Norte: 1806093		
Tipo de uso	Forestal				
Topografía	Planicie/Cause Aluvial				
Geología	K1p - Formación Palanz				
Litología	Areniscas, conglomerados y calizas, abundante fauna en las calizas del Berriasianotálanginian				
Parámetros	**pH**	**CE (µS/cm)**	**SDT (mg/L)**	**SAL (psu)**	**RES (Ω·m)**
Valor	6,83	7428	3460	4,15	1,35

Nota. En el punto de análisis de Katanamana únicamente se realizó un monitoreo básico, sin análisis fisicoquímico completo. Fuente: SGC, 2014

Figura 15. *Monitoreo de parámetros fisicoquímicos en la zona de incidencia de Katanamana*



Fuente: Adaptado de SGC, 2014.

7.1.2.3 Calidad del agua para riego

El SGC clasificó los puntos de monitoreo según su viabilidad para ser usados con fines de riego según los niveles de sodicidad y salinidad. La sodicidad se estimó a partir de la Relación de

Absorción de Sodio (RAS) definida como la concentración relativa de sodio respecto al calcio y magnesio (Ecuación 1). Por otro lado, el riesgo por salinidad evalúa la posibilidad de que el agua de riego eleve las concentraciones de sales en el suelo y con esto reduzca su potencial osmótico. Este parámetro se relaciona la conductividad eléctrica del agua (Ecuación 2).

Ecuación 1. *Relación de Absorción de Sodio*

$$|RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca^0+Mg}{2}}}$$

Donde,
Na: Contenido de sodio en agua de riego (meq/l)
Mg: Contenido de magnesio en agua de riego (meq/l)
Ca^0: Contenido de corregida de calcio en agua de riego (meq/l)

Ecuación 2. *Salinidad de muestra de agua*

$$[SAL]\sim 0{,}64 * CE$$

Donde,
SAL: Salinidad muestra de agua
CE: Conductividad eléctrica

En base a los resultados de RAS y salinidad de las muestras de agua en el territorio, el SGC estableció rangos aceptables para aguas de riego y aguas para uso con precauciones. No obstante, los pozos artesanales de la comunidad de Katanamana no cuentan con estudios fisicoquímicos completos por lo que no es posible establecer el RAS para la clasificación. Aunque no es posible establecer el par ordenado para al punto de Katanamana (RAS , CE) la matriz desarrollada por el SGC permite establecer que, para el contenido de salinidad del pozo P2, el agua solo sería apta para riego bajo condiciones controladas si el RAS fuese menor a 18. Como referencia adicional se brinda información de cuatro puntos de monitoreo geográficamente relevantes que si cuentan con caracterización hidrogeoquímica (Tabla 9).

Tabla 9. *Calidad del agua para riego en puntos de monitoreo del SAC 3.2 y en Katanamana*

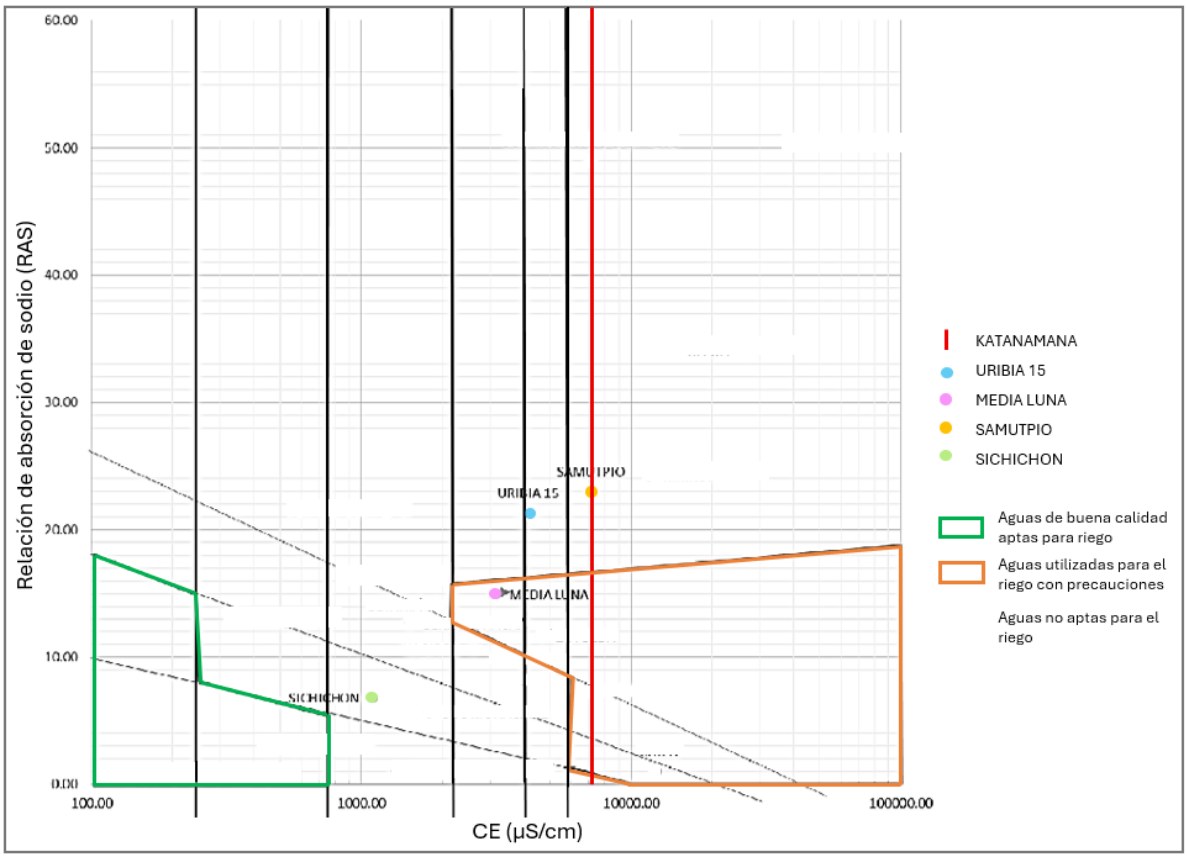
No.	Pozo	RAS (-)	Contenido de sodio	CE a 25°C (µS/cm)	Contenido de salinidad	Clasificación
1	Uribia 15	21,29	Muy alto	4157,35	Muy alto	No apta para riego
2	Media Luna	14,93	Muy alto	3142,31	Muy alto	Uso para riego con precauciones
3	Sichichon	6,78	Medio	1101,51	Alta	No apta para riego
4	Samutpio	22,97	Muy alto	7085,64	Muy alto	No apta para riego
5	Katanamana	No reporta	-	7428	Muy alto	No apta para riego excepto si RAS ≤ 18 → Apta con precauciones

Fuente: SGC, 2014.

La Figura 16 presentan la matriz de clasificación de riesgo para riego según los niveles de sodicidad y salinidad reportados en los puntos de muestreo de interés geográfica para la zona de Katanamana (Uribia 15, Media Luna, Sichichon, Samutpio). En la zonas delimitadas por el polígono verde se identifican las aguas de buena calidad para el riego, dentro del polígono naranja se incluyen aquellas aguas aptas con precauciones y fuera de estos polígonos se encuentran aguas con características no aptas para el riego. La línea roja se asocia a las condiciones reportadas para el punto de muestreo de

la comunidad de Katanamana, donde se observa un rango donde el agua podría ser usada para riego con precauciones. Es decir, para uso en cultivos tolerantes a la salinidad y con disponibilidad de agua suficiente para lavado. Sin embargo, dadas las condiciones áridas y la escasez de agua que caracterizan la zona de estudio, las posibilidades reales de implementar un manejo de este tipo son limitadas, por lo que el riesgo de afectación del suelo por salinización y sodificación se considera alto.

Figura 16. *Matriz de riesgo de agua para riego según niveles de sodicidad y salinidad*



Fuente: Adaptado de SGC, 2014.

7.1.3 Aspectos tecnológicos

Desde febrero de 2024, la comunidad de Katanamana cuenta con una planta de tratamiento de agua modular y compacta. La planta opera por desalinización por osmosis inversa y se alimenta de un sistema de paneles fotovoltaicos. Como parte del mismo proyecto, se instalaron unidades piloto para realizar cultivos verticales. A continuación, se describen aspectos relevantes asociados a los sistemas, su funcionamiento y operación.

7.1.3.1 Sistema de desalinización solar en Katanamana

El sistema de desalinización solar (SDS) en Katanamana se encuentra ubicado continuo al centro educativo IEIR Katanamana, ocupando un área de 282 m^2 (Figura 17). El sistema fue diseñado para

abastecer con agua tratada a la totalidad de la comunidad, alrededor de 71 familias (480 individuos) y a 342 los estudiantes de la escuela. La dotación de diseño se estableció en 15 L/hab-día.

Para lograr la desalinización del agua salobre, el SDS hace uso de membranas de osmosis inversa. En principio, en la osmosis inversa, se aplica una presión externa al flujo de agua para igualar o superar la presión osmótica del agua de alimentación, en este caso agua salobre. En el paso del flujo presurizado por las membranas, se logra la separación de moléculas disueltas en el agua y se obtienen dos fracciones conocidas como permeado correspondiente al flujo tratado y concentrado correspondiente a la fracción de rechazo con altos niveles de sólidos disueltos.

Figura 17. *Sistema de desalinización solar de Katanamana*

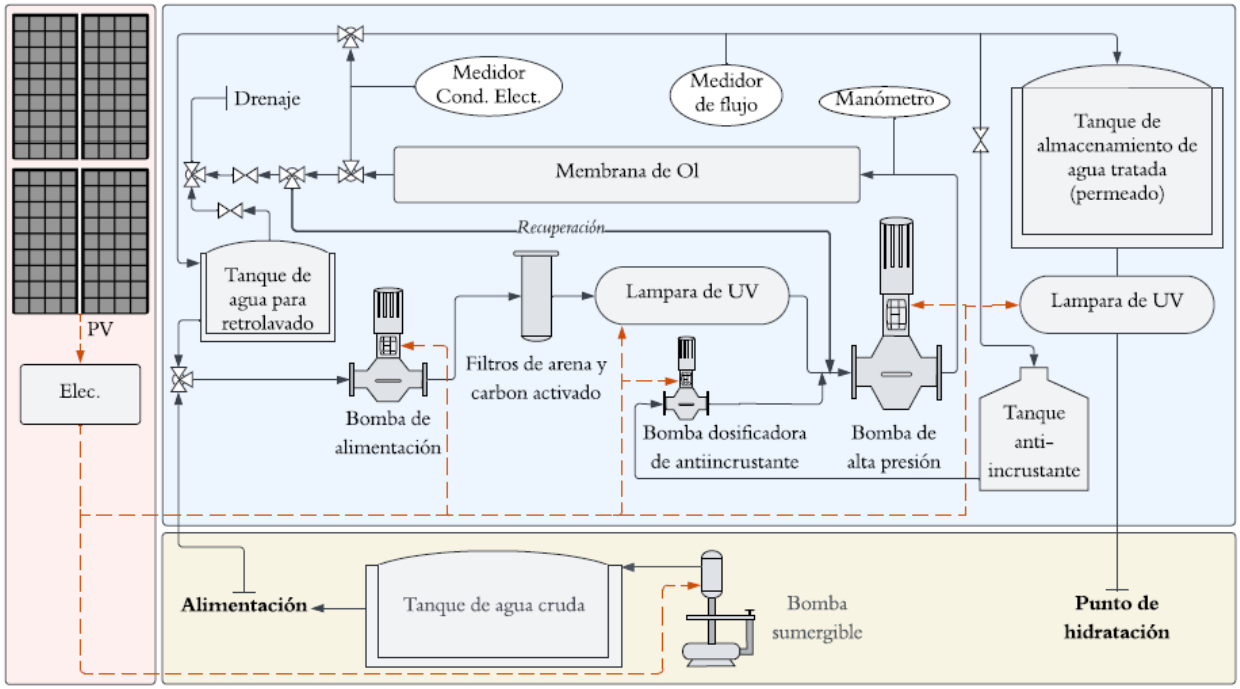


Nota. Ubicación de la planta (superior). Vista área de la planta de tratamiento (Inferior izquierda). Punto de hidratación y planta en el fondo (Inferior derecha) Fuente: Boreal Light GmbH, 2024; Google Earth, 2025; Autor, 2025.

El SDS de la comunidad de Katanamana comprende las siguientes unidades: bomba sumergible; planta de tratamiento de agua con osmosis inversa; dos tanques de almacenamiento de agua con 10.000 litros de capacidad, uno para almacenar agua captada desde el pozo y otro para almacenar el agua tratada de la planta; un tanque de almacenamiento de concentrado con capacidad de 1.000 litros; un arreglo de paneles solares fotovoltaicos y una zona destinada como punto de hidratación

para la recolección de agua. A continuación se describe el funcionamiento del sistema de desalinización (Figura 18).

Figura 18. *Esquema del sistema de desalinización solar de Katanamana*



Fuente: Elaboración propia.

Inicialmente, el agua es captada desde el pozo artesanal (P1) ubicado a 800 m de distancia de la planta (Figura 19). El pozo cuenta con características de agua salobre y concentraciones de salinidad de 2.221 ppm (medida como TDS). El pozo tiene un profundidad aproximada de 12 metros y fue construido por la comunidad en el 2018. Previo a la instalación de la planta, el pozo artesanal era la principal fuente de abastecimiento de agua para consumo. La bomba sumergible envía agua desde el pozo hasta el tanque de almacenamiento de agua cruda contiguo a la planta. La activación de la bomba sumergible se realiza de manera manual durante 3 a 4 horas al día o según la necesidad de llenado del tanque de almacenamiento de agua cruda. Se conoce que, como parte del proceso de selección de la comunidad, ZOA realizó chequeos de la capacidad de producción del pozo y de la calidad de agua del mismo. Sin embargo, no se tuvo acceso a estos estudios. Al consultar a la comunidad respecto al pozo manifestaron que el pozo puede producir entre 4.000 a 5.000 L/h.

La bomba de alimentación succiona desde el tanque de almacenamiento de agua cruda el caudal requerido hacia la planta de tratamiento. El agua ingresa primero a los filtros de arena y de carbón activado mediante un flujo ascendente. El medio filtrante de arena permite remover sólidos suspendidos y partículas sedimentables, mientras que el carbón activado favorece la eliminación de compuestos orgánicos, así como de sustancias responsables de sabor y color. Posteriormente, el agua pasa por un sistema de desinfección con luz ultravioleta. Antes de entrar a la membranas, se realiza la dosificación del antiincrustante (RPI 4000A) para inhibir la precipitación de sales poco solubles y metales como el hierro, cobre o el aluminio.

A partir de este punto, el flujo de alimentación es bombeado a alta presión a las membranas, en las que se realiza el proceso de separación por osmosis inversa, dando lugar a las fracciones de permeado y concentrado. El permeado es conducido al tanque de almacenamiento para su posterior distribución. Por su parte, el caudal de concentrado se divide a su vez en dos fracciones: una se conduce a un tanque de almacenamiento para su disposición final, y la otra fracción es recirculada para favorecer la tasa de recuperación del sistema y asegurar una operación más estable frente a fluctuaciones del caudal de alimentación asociadas a la intermitencia solar. La presión de entrada y salida de las membranas se monitorea verificando que se mantengan dentro de los rangos de operación, ya que un cambio significativo en este parámetro indicaría obstrucciones en las membranas. Asimismo, se monitorea la conductividad eléctrica del permeado.

Figura 19. *Sistema tratamiento de agua de la comunidad de Katanamana*



Nota. Pozo artesanal para captación de agua salobre (arriba izquierda y centro): como parte de un proyecto desarrollado por el DNP para la construcción de pozos en comunidades indígenas, se realizó el encerramiento y delimitación de la zona de captación en 2024. Punto de hidratación (arriba derecha). Planta modular de tratamiento de agua (abajo). Fuente: Autor, 2025.

Tras cada uso del sistema de osmosis inversa se realiza retrolavado de las membranas. Para este propósito, la planta cuenta con un pequeño tanque de almacenamiento de agua tratada desde el cual

se capta agua para el proceso de retrolavado. Tras cinco minutos de retrolavado, se revierte la dirección del flujo, y por quince minutos se deja correr agua tratada en recirculación a través de la membrana. Las membrana debe permanecer con agua tratada y húmeda.

Para su funcionamiento, la planta está equipada con un sistema fotovoltaico de aproximadamente 65 m², conformado por 24 módulos de 400 W y con una capacidad instalada de 13,40 kWp. Este sistema suministra energía directa para la operación de la unidad de tratamiento y determina de manera directa la continuidad del servicio, ya que no cuenta con un sistema de almacenamiento de energía. Por ello, el funcionamiento de la planta depende estrictamente de las horas de radiación solar disponibles. El sistema abastece por un lado la iluminación dentro del contenedor que alberga la planta y el punto de hidratación y por otro, el funcionamiento de la unidad de osmosis inversa. La Tabla 10 presenta un resumen de las características del sistema de tratamiento descrito.

Tabla 10. *Características del sistema de tratamiento Katanamana*

Variable	Valor
Q pozo	1.000 L/h
Conductividad eléctrica del pozo	3470µS/cm
Salinidad del pozo	~ 2.221 ppm
Tecnología de desalinización	Osmosis inversa
Dotación de diseño	15 L/hab-día
Q teórico	Hasta 2.000 L/h
Q alimentación real	1,8 m^3/h
Q permeado	1,0 m^3/h
Q rechazo (Q_r)	Total Q_r: 0,8 m^3/h. Fracción recirculada (75% Q_r): 0,6 m^3/h. Fracción dispuesta (25% Q_r): 0,2 m^3/h
Tiempo de operación	Entre 3 a 4 horas/día
Producción diaria	~ 3.000 a 4.000 L/día
SDT máximo de tratamiento	4.000 ppm
Calidad de agua tratada (SDT)	120 – 300 ppm
Bomba de alimentación	AISI 316L. 1,1
Bomba de alta presión	EBARA ETM 3 112-5.5-2 400. 23,5 bar - 5,5 kW – Solar. Vida media: 5 años
Bomba de pozo	Bomba sumergible de acero inoxidable (AISI 304), 1,1m^3/h, 20mca, 1,5 kW, Solar.
Membranas	Modelo 450E de 8 pulgadas, presión máxima de funcionamiento 450 PSI, 1 unidad en operación. Vida media: 5 años. Dotación: 3 membranas en reserva para reemplazo
Tubo de alta presión	Modelo 45E-8. Max 31,8 bar, -7 a 49°C.
Tasa de recuperación	55% (Q permeado/alimentación)
Desinfección	2 x UV 254 nm, 90w

Prefiltros	2 x 21" x 62" Arena – Carbón activado(25kg), Arena granulado grueso (11kg), arena granulado fino (20kg). Máx 10 bar. 1-49 °C, 2,5 m^3/h. Válvula de cabeza GL20T.
Antiincrustante	1 x Depósito antiincrustante RPI 4000A (25L). Dosis: 2 mg/L 1 x Bomba automática (KOMPAKT AML 200)
Unidad CIP	1 x Depósito de 200 litros Agentes de limpieza: Osmoclean 8 (ácido), Osmoclean 9 (alcalino).
Material de tuberías	Acero inoxidable, latón niquelado, PP, PE
Material de chasís	Aluminio
Material de bridas	ANSI – Acero inoxidable
Paneles solares	26 módulos, 400W. Capacidad instalada: 13,4 kWp
Consumo de energía	10,4 kW
Instrumentos de medida	Contadores de agua, sensores de TDS, sensores de pH, manómetros, termómetros
Baterías panel de control	2 x 50 Ah 24 V Li-Batería

Fuente: Boreal Light GmbH, 2022; Autor, 2025.

Durante el trabajo de campo se recopilaron datos fisicoquímicos básicos, incluyendo el oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, pH y temperatura (Tabla 11). Tanto la conductividad eléctrica como los sólidos disueltos se encuentran muy por debajo de los valores de referencia establecidos, indicando una correcta remoción de sales disueltas. Asimismo, el oxígeno disuelto se encuentra dentro del rango de referencia. El pH se reporta ligeramente ácido, comúnmente asociado a la reducción de la alcalinidad del agua en tratamientos de osmosis inversa y la temperatura medida es ligeramente superior al rango de referencia y se asocia al almacenamiento del agua en tanques expuestos al sol.

Como parte del proyecto, se planeó un monitoreo de la calidad del agua tratada en alianza con la Universidad de La Guajira. Sin embargo, con la salida de ZOA del territorio este monitoreo no fue llevado a cabo. Hasta el momento no se cuenta con un análisis fisicoquímico y microbiológico completo del agua tratada. Algunos de los parámetros más relevantes a medir por sus posibles efectos en la salud son: fluoruros, nitratos, nitritos, presencia de metales pesados (As, Pb, Cd, Cr, Se), coliformes total y E. coli.

Tabla 11. *Parámetros fisicoquímicos medidos del agua tratada de la planta*

Parámetro	**Oxígeno disuelto (mg/L)**	**Conductividad eléctrica (µS/cm)**	**SDT (ppm)**	**pH**	**Temperatura (°C)**
Valor de referencia	6 - 9	5-500	<500mg/l	6,5-8,5	20-30°C
Valor medido	6,83	325	162	6,26	32,2

Fuente: Autor, 2025.

7.1.3.2 Operación y mantenimiento del sistema de desalinización solar

El sistema de desalinización solar cuenta con un operador de cabecera encargado de la puesta en marcha y monitoreo del mismo. Sus actividades diarias consisten en verificar el nivel de agua cruda en el tanque de almacenamiento, verificar el nivel de antiincrustante, poner en marcha la unidad, ajustar las caudales de operación, monitorear las presiones de operación, detener el proceso de tratamiento tras tres o cuatro horas de actividad y activar el sistema de retrolavado para la buena conservación de las membranas. En caso de que los niveles del tanque de alimentación de agua cruda o de antiincrustante sean muy bajos la planta cuenta con un sistema de alarmas que impide la puesta en marcha. El llenado del tanque de agua cruda se coordina con un encargado ubicado en la zona de captación de agua, quien activa el sistema de bombeo para enviar agua hasta el tanque de almacenamiento a lo largo de un sistema de conducción de 800 metros.

Uno de los parámetro de monitoreo más relevantes en la operación es la presión de entrada y salida de la planta. Aumentos en la presión indican posibles obstrucciones de la membrana, en estos casos, se realiza un retrolavado intensivo de 30 minutos. El operario manifiesta que hasta el momento no ha sido necesario realizar este procedimiento. Además, anualmente se debe realizar un lavado más exhaustivo con ácidos, y de igual forma, verificar el funcionamiento de las membranas. Aunque las presiones de operación se han mantenido en los valores normales, el lavado con ácidos está pendiente a ser programado como parte labores de mantenimiento preventivo. La Tabla 12 presenta un resumen de los parámetros de operación más relevantes.

Al tratarse de un sistema compacto, la mayor parte del proceso se controla y verifica desde el panel de control integrado a la unidad. Según el Boreal Light, proveedor de la tecnología, sus sistemas son diseñados para ser manejados por la comunidad y su operación no requiere conocimientos técnicos avanzados, incluso en casos en los que el operador no sepa leer. Cerca del 98% de las tareas de mantenimiento pueden realizarse únicamente con un destornillador y una llave inglesa.

Aunque el proveedor menciona que la operación y el mantenimiento del sistema cuenta con un esquema de acompañamiento continuo desde la oficina regional de México, se identificaron algunas dificultades para establecer dicho acompañamiento. Desde el inicio del proyecto la comunicación fue mediada por el equipo implementador del proyecto, es decir, ZOA, al tener mayores facilidades en el acceso a telecomunicaciones y al enfrentar menores barreras técnicas y lingüísticas. Sin embargo, con la abrupta salida de ZOA en junio 2025 al quedar desfinanciados por USAID, el apoyo técnico de la comunidad ha sido brindado por un ex-técnico de ZOA de manera voluntaria que mantiene, tanto el contacto con el proveedor, como con la comunidad.

En relación con los riesgos operativos, el operario identificó como principal vulnerabilidad la disponibilidad de repuestos críticos y señaló que:

> "*Lo que yo veo crítico que falle es un componente eléctrico que no se pueda conseguir. Que se dañe un controlador de carga (de las baterías)… fácilmente puede demorar semanas sin procesar agua hasta que se consiga una que funcione*" - comentado por el operador.

En junio de 2025, una falla de tipo eléctrico dejó la planta por fuera de operación durante tres semanas. El operario manifestó que desde el momento en que se reportó la falla hasta que se estableció contacto con un técnico electricista que les brindó asistencia pasaron valiosas semanas en las que la comunidad no contó con agua segura. La falla estuvo asociada a la unidad del inversor que presentaba sobrecalentamiento y quema de fusibles que impedían la recarga de la baterías que alimentaban el panel de control y ocasionando paradas no programadas. Aunque se realizó el

remplazo de los fusibles quemados, durante la visita el operador reportó que todavía se presentaba unidades quemadas y que constantemente debía monitorear que el sistema no se sobrecalentara. Ante esta situación, se encontraba en evaluación la adquisición de un nuevo inversor; sin embargo, la selección de un equipo adecuado resultaba compleja debido a las restricciones de diseño del panel de control, el cual está configurado para un inversor de estándar europeo a 220 V y cuenta con un espacio físico limitado.

Tabla 12. *Parámetros de operación de la planta de tratamiento de agua Katanamana*

Parámetro	Descripción
Nivel de agua cruda	Monitoreado con flotador
Nivel de antiincrustante	Monitoreado con flotador
Presión de entrada a las membranas	Rango óptimo entre 10,1 - 9 ,0bar. No debe sobrepasar los 15 bar.
Presión de salida	Rango óptimo entre 8,0 a 9,0 bar. Brinda información sobre los requerimientos de limpieza de las membranas u obstrucciones
Conductividad eléctrica	Parámetros principal para monitoreo permanente de la calidad del agua tratada
Retrolavado	Todos los días tras uso
Lavado con ácidos	Member clean de frecuencia anual. Dosificar ácido hasta alcanzar pH de 3 und. Encargado: La comunidad recibe apoyo técnico para minimizar riesgo de intoxicación o quemaduras.

Fuente: Autor, 2025.

La planta modular del sistema se encuentra dentro de un contenedor que, además de alojar los equipos de tratamiento, estaba pensando para ofrecer un espacio para actividades operativas y para el almacenamiento seguro de insumos. No obstante, debido a las condiciones climáticas de altas temperaturas en la zona, realizar actividades operativas prolongadas dentro del contenedor de almacenamiento es una tarea ardua. Por otro lado, el arreglo de paneles fotovoltaicos ubicado contiguo al contenedor y no se realizan tareas

Por otro lado, el proceso de recolección de agua fue organizado por la misma comunidad. Las familias tienen asignado un día a la semana en el cual pueden acercarse el punto de hidratación para la recolección de agua. El punto cuenta con cuatro llaves de agua y esta en una zona de encerramiento para evitar el ingreso de animales silvestres. Las familias suelen acercarse para recolectar entre 80 a 100 litros que son transportados en pimpinas o jerrycans hasta el hogar.

7.1.3.3 Costos de operación y esquema de recuperación

Los costos del sistema de desalinización solar se relacionan a la operación, el mantenimiento y la remuneración del operario. Los costos de operación incluyen ítems básicos de consumo recurrente para la operación de la planta y los de mantenimiento consideran gastos necesarios en el mediano y largo plazo para mantener la unidad en buenas condiciones. La Tabla 13 presenta una descripción detallada de los ítems desagregados por costo.

Tabla 13. *Costos asociados al sistema de tratamiento de agua Katanamana*

Costos	Items incluidos	Valor (mes)	Valor (anual)
Costo de operación	Químicos antiincrustantes, CIP ácido y alcalino, repuestos para pretratamiento (arena, carbón activado), repuestos electrónicos (ej.: fusibles), mangueras, sellos.	$261.117 COP (€60)	$3.133.414 COP (€720)
Costo mantenimiento	Revisión de bombas (lubricación, revisión de sellos), lavado químico o reemplazo de membranas, revisión del sistema fotovoltaico (limpieza, control de conexión, revisión de equipo eléctrico), reparaciones menores (reemplazo de tuberías o válvulas dañadas), asistencia técnica externa.	$145.065 COP (€33)	$1.740.785 COP (€400)
Operario	Media jornada laboral	$711.500 COP	$8.538.000 COP
	TOTAL	**$1.117.682 COP**	**$13.412.199 COP**

Nota. Valores originales dados en euros, se dejan como cifra de referencia para el cambio de moneda. Fuente: ZOA, 2025; Autor, 2025.

Respecto al esquema de recuperación de costos, inicialmente se había planteado un esquema de recuperación mediante el cobro de tarifario ($366.00 COP o $0,10USD por cada 20L de agua). Sin embargo, durante el proceso de construcción participativa del proyecto se acordó una alternativa distinta. La escuela recibe del PAE el recurso destinado al abastecimiento de agua y, en lugar de recibir agua embotellada como ocurría anteriormente, ahora recibe el equivalente en recursos económicos. Estos fondos se destinan al sostenimiento de la planta, de modo que los pagos que antes realizaba la institución para adquirir agua se canalizan hoy hacia las actividades de operación y mantenimiento del sistema.

Además, la comunidad está gestionando fuentes de financiamiento alternativas para fortalecer la sostenibilidad del sistema. Dado que la comunidad cuenta con la forma de producir agua tratada y un carrotanque para su distribución, la comunidad ha iniciado gestiones con el municipio para obtener los permisos oficiales que le permitan distribuir agua a otras comunidades y, con ello, negociar algún tipo de compensación por parte de la administración municipal.

7.1.3.4 Cultivos verticales y reaprovechamiento del agua de rechazo

Con el fin de aprovechar el agua de rechazo de la planta (~ 600 L/día), se diseñó un sistema piloto de cultivos verticales pensado para zonas con escasez hídrica y suelos de baja calidad (Figura 20). La comunidad recibió 50 módulos de cultivo vertical destinados a utilizar exclusivamente el agua de rechazo de la planta. La operación fue planificada para que dos personas seleccionadas por ZOA y el comité de agua gestionaran el sistema como una pequeña unidad productiva

El agua de rechazo cubriría la totalidad de las necesidades hídricas de estos cultivos y los beneficiarios podrían decidir entre usar la producción para autoconsumo o venderla en el mercado local. Además, se habilitó un punto de suministro para aprovechar esta agua en la hidratación de animales, especialmente chivos. También se contemplaba evaluar, en cooperación con la firma especializada *Saltdoctors*, la viabilidad de implementar sistemas de piscicultura que emplearan agua de rechazo. Sin embargo, esta fase no tuvo continuidad.

Figura 20. *Módulos de cultivos verticales instalados en la comunidad de Katanamana*



Fuente: Autor, 2025.

Durante el trabajo de campo se constató que los módulos de cultivo vertical no estaban en uso. En la Figura 20 se pueden observar los módulos de cultivos verticales y en la parte derecha el tanque de almacenamiento del agua de rechazo. En la figura también es posible apreciar el sistema de irrigación, que toma el agua del tanque y la distribuye por cada uno de los módulos. Los habitantes señalaron que el agua resultaba demasiado salada para el desarrollo adecuado de especies que comúnmente son cultivadas en la región. Destacaron, la adaptabilidad de la patilla a condiciones de alto estrés hídrico y salinidad. No obstante, persiste el interés en identificar especies tolerantes a la salinidad que permitan aprovechar de manera más efectiva el agua de rechazo en futuras iniciativas productivas. Además, un entrevistado manifestó que el diseño de los módulos permite el cultivo de plantas livianas como lechuga o fresas. Sin embargo, estos no hacen parte de la dieta local y en ese sentido no se presentó un interés por cultivar este tipo de productos. En contraste, cultivos como el del frijol guajiro, muy consumido en la región, son de tipo arbusto, muy pesados y grandes para los módulos instalados.

Por el momento, los participantes del taller comunitario manifestaron que el agua de rechazo usualmente es usada por estudiantes internos o profesores de la escuela para realizar labores de aseo domésticas.

7.1.3.5 Participación comunitaria y sostenibilidad

El proyecto del sistema de desalinización solar y cultivos verticales desarrollado por ZOA, una ONG de ayuda humanitaria originaria de los Países Bajos, forma parte una iniciativa para fortalecer el acceso a agua segura y la seguridad alimentaria en zonas remotas de La Guajira. La planta en Katanamana es la tercera planta bajo esta iniciativa que fue instalada en comunidades de la Media y Alta Guajira.

Respecto a la tecnología de desalinización solar, miembros del equipo técnico de ZOA, expresaron que reconocían en este sistemas grandes ventajas al ser de tipo compacto y modular lo que facilita el transporte hasta regiones apartadas, y sobre todo, al poder operar por completo con energía solar. La desalinización ha sido una solución tecnológica con gran acogida en la región (ZOA, 2023). Sin embargo, estos sistemas han sido diseñados tradicionalmente para la operación con diésel que tiene altos costos asociados a la adquisición del combustible. Los altos costos de sostenimiento fueron

identificados como uno de los factores que aportaban al abandono de las unidades instaladas, pues no era viable para las comunidades seguir destinando recursos para estos fines (comentado por E003).

Otro factor relevante identificado se relaciona la necesidad de seleccionar una comunidad con cierto nivel de organización interna, un interés manifiesto en el proyecto y sin disputas o conflictos que pudieran comprometer su implementación. Durante el proceso de selección de una comunidad para el proyecto, el equipo de ZOA realizó salidas de campo para visitar diversas comunidades y contó con un equipo de técnicos locales y trabajadores sociales Wayuu que pudieran establecer un contacto estrecho y cercano con las comunidades visitadas. Estas visita tenían como propósito entender las necesidades y las dinámicas de las comunidades, así como evaluar criterio técnicos que aseguraran la viabilidad del proyecto. Entre ellos se consideró la disponibilidad de un pozo perforado en buenas condiciones, una población entre 550 y 1.000 habitantes que permitiera maximizar el alcance del proyecto, y el interés explícito de la comunidad en participar. También se verificó que el pozo tuviera una producción mínima de 1.000 litros por hora y que la calidad del agua fuera adecuada, sin presencia de metales pesados u otros contaminantes que no puedan ser removidos por ósmosis inversa. Finalmente, se valoró la accesibilidad para la instalación y el monitoreo del sistema, así como la vinculación con la escuela local, un elemento que aporta estabilidad institucional y mayor seguridad para la operación del proyecto.

La comunidad de Katanamana contaba con una fuente de agua que cumplía con los requisitos técnicos establecidos por ZOA. Sin embargo, el pozo artesanal se encontraba en una zona un poco aislada, a 800 metros desde el centro poblado. Para el equipo implementador era fundamental que la planta se instalara en un punto visible, seguro y de fácil acceso para todos. Un integrante del equipo de ZOA señaló sobre la capacidad de gestión colectiva de la comunidad:

> "*Yo les dije (a la comunidad): si nos traen el agua hasta aquí (a la escuela) podemos ponerles la planta. Cuando volvimos a las semanas, ellos solitos habían excavado la línea para traer el agua hasta la acá* […]" – comentado por E002

La decisión de instalar el sistema cerca de la escuela es estratégica, ya que garantiza el abastecimiento de uno de los grupos más vulnerables y facilita la promoción de prácticas de cuidado del agua e higiene desde el entorno educativo. Katanamana fue finalmente seleccionada como la población beneficiaria del proyecto. Además, del trazado de la línea de conducción, la comunidad se encargó de la adecuación del terreno para la instalación de la planta y construyó un encerramiento para la delimitación del área.

A lo largo del proceso, se conformó el primer comité de agua de Katanamana, integrado por 17 personas: un líder comunitario, cuatro docentes y trece miembros de la comunidad, entre ellos seis hombres, cuatro mujeres y siete estudiantes (Figura 21). La inclusión de jóvenes se consideró fundamental para fomentar cambios de comportamiento entre sus pares y la sostenibilidad en el largo plazo. De los integrantes del comité, en total 5 personas fueron capacitados en operación y mantenimiento de la planta.

Las sesiones del comité abordaron diversos temas mediante actividades basadas en la metodología SAHTOSA de UNICEF, orientada a la higiene, el saneamiento y la prevención de la desnutrición crónica. Entre los contenidos trabajados se incluyeron higiene y saneamiento, tratamiento seguro del agua, barreras para acceder a agua potable, higiene menstrual y desarrollo de iniciativas productivas. Inicialmente se propuso programar reuniones del comité una vez a la semana,

buscando no interferir con las actividades cotidianas y a la vez asegurar continuidad. Sin embargo, al momento de la visita los miembros señalaron que no se reunían desde hacía mes y medio.

Además, se desarrollaron talleres participativos y actividades comunitarias. Los dos talleres realizados previo a la instalación de la planta, se centraron en fortalecer el sentido de apropiación comunitaria, explicar el rol y las responsabilidades del comité de agua y promover una gestión participativa. Además, se incluyeron talleres de finanzas y contabilidad básica, comprensión de gastos, ingresos y utilidades, relaciones comunitarias y atención al usuario, mantenimiento de la infraestructura y principios para establecer un modelo de gestión sostenible

Finalmente, la planta fue inaugurada en febrero de 2024. Tras la inauguración, desde el colegio se promovieron diversas actividades educativas orientadas a fortalecer la conciencia sobre el uso y cuidado del agua. Entre estas se incluye la celebración del Día Mundial del Agua, en la cual estudiantes prepararon rondas, relatos e representaciones teatrales relacionadas a la importancia del recurso hídrico. Asimismo, se organizaron salidas pedagógicas para que las niñas y niños conocieran la planta y se familiarizaran con la tecnologia de desalinización

Ya que uno de los desafíos identificados en el territorio es la resistencia al cambio de fuente de agua, el comité asumió un papel clave en promover el consumo de agua tratada como medida esencial para la salud y el bienestar. Asimismo, dos meses después de la inauguración, para abril de 2024, se llevó a cabo un actividad de grupo focal y encuesta facilitado por una trabajadora social del equipo de ZOA con el propósito de evaluar como habían cambiado los usos del agua, la frecuencia de recolección y los hábitos de higiene después de la implementación de planta. Los resultados de esta actividad indicaron que la comunidad había adoptado con éxito el consumo de agua tratada por la planta. Entre los beneficios percibidos, los participantes reportaron mejoras en el sabor de las bebidas y alimentos preparados, deposiciones sólidas y un aumento en la cantidad de agua dulce disponible para sus necesidades diarias.

Figura 21. *Actividades desarrolladas por la comunidad de Katanamana*



Nota. Reunión del comité de agua (izquierda y centro). Celebración del día del agua en la escuela IEIR Katanamana (derecha). Fuente: ZOA, 2025.

7.2 Conceptualización del Nexo Agua-Energía-Alimentación

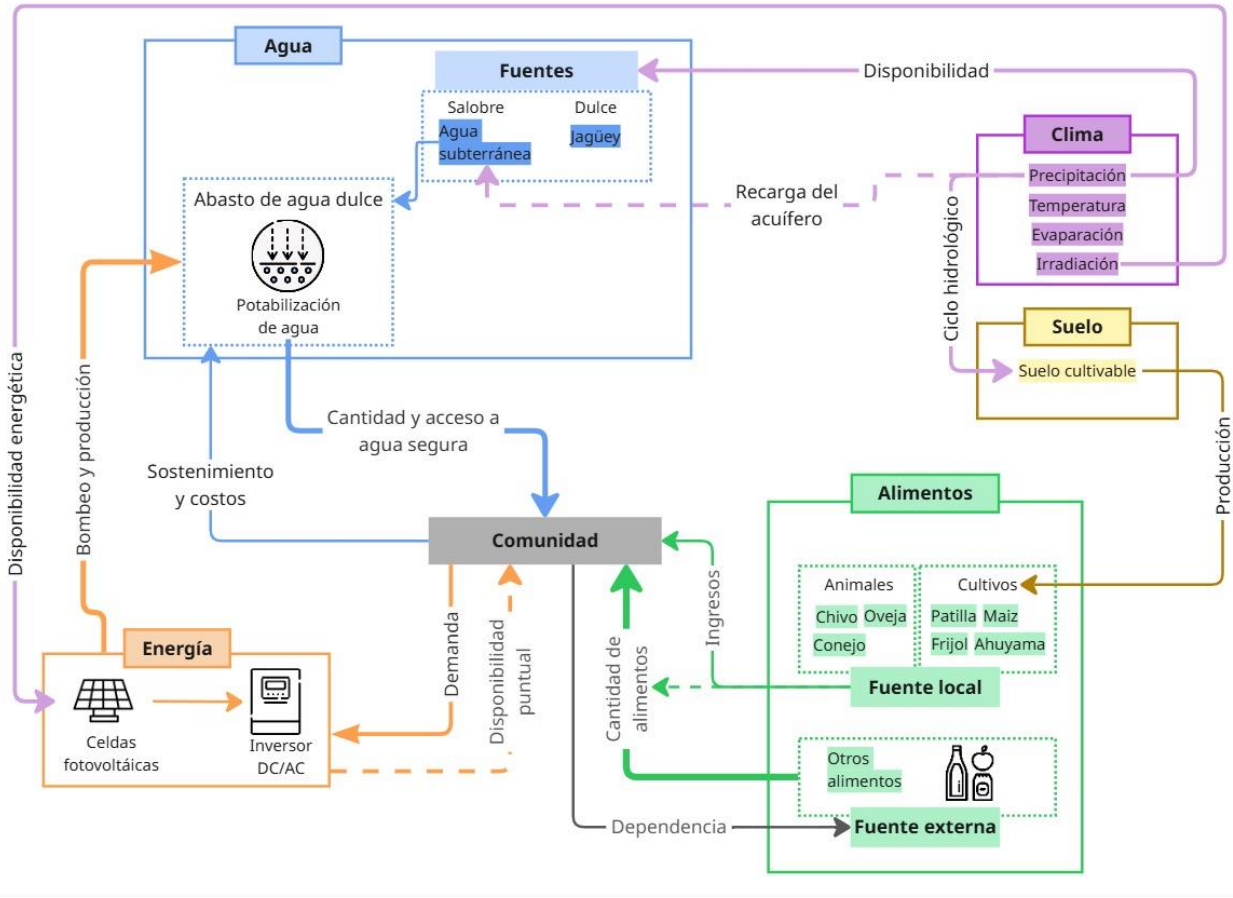
7.2.1 Modelo conceptual del Nexo AEA en la comunidad de Katanamana

En base a la información recopilada se presenta el modelo conceptual del Nexo AEA para la comunidad de Katanamana (Figura 22). Este modela ayuda a visualizar como los componentes de un sistema complejo interactúan entre sí, define las fronteras del sistema, los sectores relevantes y presenta los mecanismos de interacción entre estos sectores.

Dentro de lo elementos clave es importante destacar que el sistema se ve condicionado por la alta variabilidad climática y por limitaciones estructurales a nivel social y económico. La disponibilidad de agua depende principalmente del sistema de acuíferos y de los jagüeyes, cuya recarga está fuertemente marcada por la estacionalidad de las lluvias. El recurso hídrico es esencial para el consumo humano, pero tanto el acceso como la calidad presentan limitaciones debido a patrones de recarga-demanda poco conocidos y a la percepción comunitaria de ciclos hidrológicos alterados, con eventos lluviosos más intensos y en periodos distintos a los tradicionales. En términos energéticos, el uso de energía solar es aún limitado y se concentra principalmente en el acceso a agua y producción de agua segura mediante bombeo alimentado por sistemas fotovoltaicos y la planta de desalinización solar. Pese a ello, persiste una demanda insatisfecha de electricidad, lo que restringe actividades productivas y domésticas. El componente alimentario se caracteriza por un predominio del pastoreo, actividad que cumple funciones tanto de seguridad alimentaria como de ingreso económico. Los cultivos agrícolas son escasos y dependen estrictamente del ciclo hidrológico, realizándose de manera tradicional y con baja productividad. En el ámbito socioeconómico, la comunidad enfrenta dificultades para cubrir sus necesidades básicas, y su localización remota limita el acceso a mercados, incrementa los costos de transporte y lo que condiciona, a su vez, la disponibilidad de alimentos.

Tanto la planta de desalinización solar como el aprovechamiento de agua para el piloto de cultivos verticales son soluciones tecnológicas que asocian entre sí, por lo menos dos de las dimensiones del Nexo. Desde el modelo conceptual es posible intuir potenciales compensaciones entre las dimensiones. Por ejemplo, el mayor acceso a agua segura y el favorecimiento de la producción agrícola, a la vez que efectos desconocidos para las reservas de agua subterránea. Asimismo, la mayor demanda de agua para actividades agrícolas podría tener efectos en la calidad del suelo. Con este modelo conceptual en mente se plantearon los indicadores particulares en la búsqueda de evaluar el sistema sociotécnico de la comunidad de Katanamana.

Figura 22. *Modelo conceptual del Nexo AEA en la comunidad de Katanamana*



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del análisis del Nexo AEA en Katanamana muestran que la interacción dominante se da en la relación *energía para agua*, dado que el agua es el elemento principal del Nexo y la operación del sistema de desalinización depende totalmente del suministro energético solar. No obstante, el análisis evidencia que esta interacción está condicionada por dos dimensiones transversales: la *ecosistémica* y la *social*.

La dimensión ecosistémica actúa como base estructural del Nexo, al constituir la única fuente de agua subterránea, delimitar la disponibilidad hídrica, habilitar indirectamente el acceso a energía mediante el recurso solar y restringir el desarrollo de actividades agrícolas tradicionales. Por su parte, la dimensión social configura el espacio de gestión del Nexo, desde donde se toman decisiones, se opera el sistema y se materializan los beneficios asociados al acceso a agua segura y a la satisfacción de necesidades básicas.

7.2.2 Matriz de evaluación del Nexo Agua-Energía-Alimentación

La matriz para la evaluación del Nexo AEA se nutrió de información disponible en artículos académicos, repositorios institucionales y consultas a expertos. Teniendo en cuenta que se trata de un proyecto de carácter comunitario y rural se desarrolló una matriz teórica ideal para la evaluación de las dimensiones del Nexo AEA en este tipo de contextos. La matriz de evaluación ideal considera

27 indicadores que buscan estructurados bajo un modelo Presión-Estado-Impacto-Respuesta que busca analizar el funcionamiento y la sostenibilidad del Nexo. Esta estructura tiene como objetivo facilitar la identificación y cuantificación de los elementos claves del Nexo, así como posibles oportunidades y compensaciones entre las dimensiones de agua, alimentación y energía. Cada indicador fue categorizado según si evalúa un aspecto asociado a la dimensión de agua, de energía, de alimentos o en el caso de relacionar dos de las dimensiones se clasificó como un indicador de tipo transversal. Por ejemplo, el indicador de "Condiciones de Producción de las Unidades Agrícolas" involucra la dimensión tanto de agua al considerar la calidad del agua para riego, como de alimentos al asociarse a la actividad agrícola, y es por lo tanto, considerado un indicador de tipo transversal.

En la Figura 23 se presenta la estructura por factores de la matriz de evaluación desarrollada. El primer factor, de presión cuenta con seis indicadores enfocados en la evaluación de los efectos potenciales sobre el sistema ambiental y los recursos naturales, derivados de acciones antrópicas de uso, generación o consumo. Un ejemplo de este tipo de indicador es la demanda hídrica o la presión territorial por el uso del suelo. Segundo, el factor de estado considera trece indicadores que permiten caracterizar las condiciones actuales del sistema en las dimensiones ambiental, tecnológica y social. En el componente ambiental, evalúan la calidad y el estado de los recursos naturales en función de su disponibilidad y vulnerabilidad. Desde el enfoque tecnológico, consideran los requerimientos y la eficiencia de los sistemas tecnológicos en el uso de dichos recursos, y desde el social se examina la calidad y nivel de servicio brindado a la comunidad. Algunos de los indicadores considerados son la cantidad de agua segura y la producción alimenticia local. Tercero, los cuatro indicadores del factor de impacto, evalúan las consecuencias que las actividades y presiones del sistema tecnológico generan sobre el capital natural, social y humano. Estos indicadores reflejan los cambios producidos en la calidad y disponibilidad de los recursos ambientales, así como las repercusiones en la salud y el bienestar de la población. De igual manera, contemplan los efectos sobre el capital social, entendiendo este como la capacidad colectiva para organizarse, cooperar y sostener procesos de gestión ambiental. Por ejemplo, se incluye el impacto de las tarifas en el ingreso familiar o la percepción comunitaria de mejora en salud. Finalmente, el factor de respuesta comprende el análisis de las acciones implementadas por la comunidad, las instituciones y los sistemas tecnológicos frente a las presiones e impactos identificados a través de cuatro indicadores. Estos indicadores reflejan los cambios en la dinámica comunitaria, la adopción de prácticas sostenibles y la capacidad de gestión colectiva para afrontar los retos ambientales y sociales.

Figura 23. *Estructura de matriz de evaluación Nexo AEA*

Variable	Agua	Alimentos	Energía	Transversal	Total
Presión					
Generación	1	2		2	5
Emisiones y contaminantes	1				1
Estado					
Requerimientos del sistema				1	1
Estado del recurso natural	3				3
Capacidades locales				2	2
Calidad	4	1		1	6
Apropiación social de conocimiento				1	1
Impactos					
Efectos en salud	1	1			2
Efectos en el capital social	1			1	2
Respuesta					
Emisiones y contaminantes			1		1
Cambios en la dinámica comunitaria				3	3
Total	**11**	**4**	**1**	**11**	**27**

Fuente: Elaboración propia.

Aunque se desarrolló una matriz de evaluación teórica, en la práctica la evaluación de una matriz tan robusta se hace compleja por la alta demanda de información, que en muchos casos no está disponible en las condiciones de trabajo rurales. En ese sentido y durante el proceso de desarrollo los indicadores incluidos apuntaron a mantener el equilibrio entre la necesidad de la evaluación del indicador y su posibilidad de medición.

La Tabla 14 presenta una lista general de los indicadores particulares comprendidos en la matriz de evaluación, se incluye una clasificación según si el indicador es de tipo ecológico, social o técnico-económico. Además, los colores por indicador indican la dimensión a la cual se asocia, sea la dimensión de agua (azul), energía (amarillo), alimentos (verde) o se trate de un indicador transversal (lila). En la sección 7.3 se presentará la formulación de todos los indicadores particulares y la evaluación de aquellos que pudieron ser medidos para el caso de estudio.

Tabla 14. *Indicadores particulares de matriz de evaluación*

No.	Indicador	ID	Tipo de indicador	Tipo de variable
1	Demanda hídrica por consumo	DH	Ecológico	Numérica
2	Generación y gestión de subproductos	GGS	Técnico-económico	Categórica
3	Riesgo de calidad del agua para riego	CAS	Ecológico	Categórica
4	Demanda hídrica por unidad agrícola productiva	DUP	Técnico-económico	Numérica
5	Presión territorial por el uso del suelo	PUS	Ecológico	Categórica
6	Condiciones de producción de las unidades agrícolas	CPA	Ecológico	Categórica
7	Cantidad de agua segura	CA_{seg*}	Social	Numérico
8	Accesibilidad al suministro de agua segura	SA_{seg}	Social	Numérico
9	Cobertura de servicio de agua segura	COA	Social	Numérico
10	Índice de riesgo de calidad del agua para consumo humano	IRCA	Ecológico	Numérico
11	Nivel de conocimiento sobre la fuente de agua	CF	Ecológico	Categórico
12	Riesgo de calidad de la fuente de agua	RCF	Social	Dicotómico

13	Medición de contaminantes en fuente de abastecimiento	MCF	Ecológico	Dicotómico
14	Producción alimenticia local	PAL	Técnico-económico	Numérico
15	Pobreza energética	PE	Social	Categórico
16	Nivel de conocimiento de la tecnología	NC_{tec}	Social	Dicotómico
17	Vulnerabilidad del sistema por reemplazo de componentes	VRC	Técnico-económico	Dicotómico
18	Capacidad de respuesta a fallas	CRF	Técnico-económico	Categórico
19	Gestión comunitaria	GC	Social	Categórico
20	Equidad en acceso a agua segura	EAA	Social	Numérico
21	Percepción comunitaria de mejora en salud	PCS	Social	Categórico
22	Inseguridad alimentaria en hogares	IAH	Social	Dicotómico
23	Impacto de tarifas en ingreso familiar	ITI	Social	Categórico
24	Gestión y disposición final de componentes	GF	Técnico-económico	Categórico
25	Cambio comunitario en el desarrollo productivo	CCD	Social	Categórico
26	Cambio comunitario en la organización comunitaria	CCO	Social	Categórico
27	Cambio comunitario en la articulación de alianzas estratégicas	CCA	Social	Categórico

Fuente: Elaboración propia.

7.3 Evaluación del Nexo Agua-Energía-Alimentación en Katanamana

A continuación se presenta la formulación de cada indicador particular y la evaluación de aquellos indicadores que pudieron ser estimados para el caso de estudio. Todos los indicadores están normalizados entre cero y uno, siendo cero la peor calificación y uno la mejor.

7.3.1 Indicadores de presión

7.3.1.1 Demanda hídrica por consumo (DH)

Este indicador tiene como objetivo estimar el nivel de presión ejercido sobre el sistema de acuífero Formación Palanz (K1P) por el abastecimiento de agua. Aunque se cuenta con información general sobre las zonas de recarga y con una estimación preliminar de la recarga del acuífero, no existe información sobre la demanda calculada total para el sistema de acuífero. Esto limita la posibilidad de aplicar el indicador de forma cuantitativa (Tabla 15).

Tabla 15. *Formulación y cálculo de demanda hídrica*

No.	Indicador	Formulación	Descripción	
1	DH	$D_{hid} = \frac{Q_t}{Q_{rh}}$	$\boldsymbol{D_{hid}} \in [0,n]$, ***Qt:*** Demanda calculada total anual, $\boldsymbol{Q_{rh}}$**:** Recarga hídrica anual estimada en el área de influencia	
Criterio de decisión			**Estimación**	**Calificación**
$DH = \begin{cases} 1: si\ D_{hid} \geq 1\ Sobrecaptación \\ (0,1): si\ D_{hid} < 1 \\ 0: si\ no\ existe\ información \end{cases}$			Qt no reporta información	0

Es importante recordar que el acuífero K1P forma parte de un sistema de acuíferos discontinuos, de baja productividad y, en varios sectores, con comportamiento confinado. Estas características hidrogeológicas hacen que el indicador sea particularmente relevante, pues acuíferos de este tipo tienden a tener respuestas más lentas y volúmenes explotables reducidos. En estos sistemas, incluso

tasas de extracción bajas pueden generar descensos piezométricos significativos si se sostienen en el tiempo. Aunque se cuenta con información de recarga hídrica anual para el año 2018, no existe un estimado de la demanda calculada para el sistema acuífero. Al no contar con la información se asigna una calificación de cero.

7.3.1.2 Generación y gestión de subproductos (GGS)

Este indicador evalúa el nivel de presión ambiental asociada a la gestión de subproductos generados por el sistema de desalinización solar, considerando las prácticas de disposición, control y reaprovechamiento observadas en campo (Tabla 16). La salmuera es el principal subproducto generado en Katanamana (aprox. 600 L/día). Este tipo subproductos tienen un alto contenido de sales y pueden contener virus, bacterias, metales y químicos adicionados para el pretratamiento, por lo que su correcta disposición en importante (Kumar & Prakash, 2019).

Tabla 16. *Formulación y cálculo de generación y gestión de subproductos*

No.	**Indicador**	**Formulación**	**Descripción**
2	GGS	$GGS = f(C)$	***C:*** Nivel de manejo de los subproductos observado.

Puntaje	**Clasificación (C)**	**Descripción**	**Calificación**
1	Gestión integral y aprovechamiento	Existe un sistema establecido para el reaprovechamiento de salmuera (ej.: piletas de evaporación con producción de sal). La disposición remanente es controlada y sin vertimientos.	0,50
0,75	Disposición controlada y parcial valorización	Existen mecanismos de disposición controlada (ej.: piletas de evaporación) o un reaprovechamiento menor al 50% del subproducto	
0,50	Disposición controlada limitada	La salmuera se concentra o almacena parcialmente bajo control (ej.: tanque). Se evitan descargas directas, pero existen riesgos de filtración o manejo intermitente.	
0,25	Gestión básica	No existe almacenamiento adecuado (ej.: tanque); el residuo se descarga en zanjas o áreas abiertas sin impermeabilizar, aunque la comunidad reconoce el residuo y realiza acciones empíricas de manejo o registro esporádico.	
0	Gestión nula	Vertimiento directo al suelo o cuerpos de agua sin ningún tipo de control. No se evidencian prácticas de manejo ni infraestructura.	

Fuente: Kumar & Prakash, 2019.

En Katanamana la salmuera es almacenada para su posterior uso diario en labores domésticas por estudiantes internos o profesores. Este uso es empírico y responde al valor que tiene contar con agua en un punto cercano y de ágil acceso. Aunque las descargas no son puntuales, existe el riesgo de infiltración al no contar con una solución tecnificada de respaldo por lo que se asigna una calificación de 0,50.

7.3.1.3 Riesgo de calidad del agua para riego (CAS)

En base a la matriz desarrollada por el SGC (figura 15), el indicador evalúa el riesgo de la calidad del agua subterránea para el riego a partir de la sodificación y salinización de los suelos (Tabla 17).

Tabla 17. *Formulación y cálculo de riesgo de calidad del agua para riego*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
3	CAS	*CAS = clasifica según matriz de par (RAS, CE)*	Par ordenado *(RAS, CE)*: ***RAS*****:** Relación de Absorción de Sodio, ***CE*****:** Medición de conductividad eléctrica *CAS* se califica según resultado por pares ordenados dado por clasificación en matriz de Figura 16. Sea ***A:*** Apto para riego, ***AR:*** Apto para riego con restricciones, ***NA:*** No apto para riego

Criterio de decisión	Estimación	Calificación
$CAS = \begin{cases} 1: si\ (RAS, CE) \in \text{A} \\ 0{,}50: si\ (RAS, CE) \in \text{AR} \\ 0: \text{si}\ (RAS, CE) \in \text{NA} \end{cases}$	(RAS, CE) = (26, 7428) No apto para riego	0

Fuente: Custodio & Llamas, 1999; SGC, 2014.

La composición salobre y clorurada-sódica del acuífero sugiere una concentración elevada de sodio respecto a calcio y magnesio, indicando un RAS moderado a alto (10 a 26). Por otro lado, teniendo en cuenta la conductividad eléctrica del pozo salobre P2 (CE: 7428 µS/cm) existe un riesgo muy alto de sodificación. Aguas con este grado de mineralización no son apropiadas para riego en condiciones ordinarias, aunque podrían utilizarse de manera restringida en suelos permeables y bien drenados, con exceso de agua que permita mantener un lavado constante de sales (SGC, 2014).

7.3.1.4 Demanda hídrica por unidad agrícola productiva (DUP)

El indicador estima la relación entre el volumen de agua aplicado en las unidades agrícolas y el volumen teórico requerido por los cultivos, con el fin de evaluar la eficiencia y la presión ejercida sobre el recurso hídrico (Tabla 18). Al plantear la relación valores DUP < 0,9 indican déficit o estrés hídrico sobre los cultivos y DUP > 1,10 indican sobre riego y mayor presión sobre el recurso.

Tabla 18. *Formulación y cálculo de demanda hídrica por unidad agrícola productiva*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
4	DUP	$DUP = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{real,i}}{\sum_{i=1}^{n} V_{teórico,i}}$ $V_{teórico,i} = \frac{K_{c,i} \cdot ETo \cdot A_i \cdot 10}{IE_i}$	DUP ∈ [0, n], si DUP < 1 estrés hídrico, si DUP = 1 Óptimo; si DUP>1 Sobre riego Para los cultivos más representativos se considera: $V_{real,i}$: m³ de agua usado para irrigación en campo/ha cultivada en periodo determinado, $V_{teórico,i}$: volumen de agua estimado como necesario para satisfacer los requerimientos hídricos de los cultivos según evapotranspiración (ET_o), superficie cultivada (A_i), coeficientes de cultivo ($K_{c,i}$) e índice de eficiencia del sistema de riego (IE_i).

Puntaje	Criterio de decisión	Calificación
1	Óptimo si 0,90 ≤ DUP ≤ 1,10	No se realiza medición del indicador
0,75	Desviación leve si 0,75 ≤ DUP < 0,90 o 1,10 < DUP ≤ 1,25	
0,50	Desviación moderada si 0,60 ≤ DUP < 0,75 o 1,25 < DUP ≤ 1,40	
0,25	Desviación severa si DUP < 0,60 (estrés hídrico para el cultivo) o DUP > 1,40 (sobre riego severo)	

Durante la visita de campo, no se realizó la evaluación del indicador, ya que no existían cultivos activos al momento del levantamiento de la información. La comunidad reportó inactividad en actividades agrícolas debido a la prolongada sequía y se encontraban a la espera de la temporada de lluvias de octubre. No obstante, sí se identificaron los cultivos de interés predominantes en la zona: frijol guajiro, patilla, ahuyama y melón.

7.3.1.5 Presión territorial por el uso del suelo (PUS)

El PUS evalúa el grado de interferencia del proyecto con los usos actuales del territorio y las funciones ecológicas del suelo (Tabla 19). Considera tanto la proporción del área ocupada por la infraestructura frente al área agrícola o de referencia, como los posibles efectos sobre la fragmentación del hábitat y la pérdida de servicios ecosistémicos asociados.

Tabla 19. *Formulación y cálculo de la presión territorial por el uso del suelo*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
5	PUS	$PUS = \frac{C_1 * S + C_2 + C_3}{3}$ $S = min\ (1, \frac{Área\ energía}{Área\ agrícola\ útil})$	C_i se califica (0; 0,50; 1) según criterios: ***C1:*** Competencia por uso del suelo, ***C2:*** Fragmentación del hábitat, ***C3:*** Funcionalidad ecológica, **S:** ajuste por peso espacial del sistema energético sobre el territorio. Máximo valor es 1

Puntaje	Criterios de calificación	Valoración	Calificación
C1	**Competencia por uso del suelo**		
1	El área ocupada por el proyecto es < 5 % del área agrícola/productiva, o no implica sustitución directa del uso del suelo y la infraestructura energética ocupa < 0,3 ha (uso marginal o coexistente).	1	
0,5	Uso compartido, interferencia en 5–10% del área agrícola, o pérdida de productividad menor por ocupación o acceso		
0	Uso del suelo por el proyecto >10% del área agrícola útil o reemplazo de uso productivo		
C2	**Fragmentación del hábitat**		
1	No se evidencia fragmentación de la conectividad ecológica		0,83
0,5	Afectación puntual < 1 ha, posible restauración natural	0,5	
0	Evidencia de fragmentación severo ≥ 1 ha o interrupción de corredores biológicos		
C3	**Funcionalidad ecológica**		
1	Sin pérdida observable de función ecosistémica		
0,5	Alteración leve o localizada: compactación o erosión superficial, cambios puntuales en infiltración o cobertura vegetal	1	
0	Evidencia de pérdida relevante: erosión activa, pérdida de horizonte orgánico, sellamiento o alteración de escorrentía		

Fuente: IGAC, 2024.

El indicador PUS alcanzo un nivel de presión baja. La superficie ocupada por las instalaciones es inferior al umbral de 0,3 ha y corresponde a infraestructura de pequeña escala (aprox. 282 m²). La actividad agrícola asociada es discontinua y marginal, lo que limita la intensidad del uso del suelo y la presión sobre los recursos naturales. Los sistemas se ubican en áreas previamente intervenidas, sin evidenciar transformación adicional del hábitat ni fragmentación del paisaje. No se identifican pérdidas en los principales servicios ecosistémicos del suelo, tales como recarga hídrica, control de erosión, cobertura vegetal o provisión de hábitat. Tanto los sistemas energéticos como la actividad agrícola se desarrollan a pequeña escala. Se refleja que el proyecto presenta una ocupación territorial

mínima y localizada, sin evidenciar competencia con actividades agrícolas ni afectaciones significativas sobre la estructura o las funciones ecológicas del suelo.

7.3.1.6 Condiciones de producción de las unidades agrícolas (CPA)

El indicador evalúa las prácticas agrícolas en función del tipo de riego, uso de fertilizantes, rotación de cultivos y tipo de labranza, con el fin de estimar el nivel de presión ejercida sobre el recurso suelo y el agua (Tabla 20). Dado que la principal forma de cultivo de la comunidad es con técnicas tradicionales se consideró principalmente este enfoque.

Tabla 20. *Formulación y cálculo de condiciones de producción de las unidades agrícolas*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
6	CPA	$CPA = \frac{C_1 * S + C_2 + C_3 + C_4}{4}$	CPA ∈ [0,1] Se califica (0; 0,33; 0,66; 1) para criterios: ***C1:*** Tipo de riego, ***C2:*** Uso de fertilizantes, ***C3:*** Rotación de cultivos, ***C4:*** Tipo de labranza

Puntaje	Criterios de decisión	Valoración	Calificación
	C1: Tipo de riego		
1	Sin riego o agricultura de secano tradicional.		
0,66	Riego por goteo o microaspersión.	1	
0,33	Riego por aspersión convencional o sin programación.		
0	Riego por inundación, sin control de lámina, pérdidas altas.		
	C2: Uso de fertilizantes		
1	No fertiliza por falta de medios o prácticas.		
0,66	Uso combinado con análisis de suelo.	1	
0,33	Uso combinado sin análisis de suelo (Quim./Org. de forma empírica).		
0	Uso intensivo de fertilizantes químicos sin control.		1
	C3: Rotación de cultivos		
1	Rotación diversificada con abonos verdes o barbecho		
0,66	Rotación planificada con cultivos mejoradores.	1	
0,33	Alternancia simple entre dos especies.		
0	Monocultivo continuo.		
	C4: Tipo de labranza		
1	Cero labranza o labranza mínima.		
0,66	Labranza reducida.	1	
0,33	Labranza convencional.		
0	Labranza intensiva o con maquinaria pesada.		

Fuente: FAO, 2019.

El valor obtenido fue 1.00, lo que indica que las unidades productivas no presentan una presión hacia los recursos naturales. Las actividades agrícolas se realizan con mínimo uso de agua, restringido a los periodos de lluvia, sin infraestructura de riego permanente. No existe acceso regular a insumos agrícolas, ni orgánicos ni químicos, y los pocos disponibles se producen localmente en cantidades limitadas. Los productores aplican rotación de cultivos con periodos de descanso del suelo según el ciclo hidrológico, y practican labranza mínima, lo que favorece la conservación del suelo. También se han desarrollado procesos de capacitación con el SENA, orientados a fortalecer prácticas sostenibles. No obstante, esta baja presión sobre los recursos se asocia también con baja productividad agrícola, dado el uso limitado de insumos y la falta de infraestructura para riego y manejo del suelo.

7.3.2 Indicadores de estado

7.3.2.1 Cantidad de agua segura (CA_{seg})

Este indicador evalúa la suficiencia del suministro de agua disponible para el consumo doméstico mediante la razón entre la dotación real en campo (D_{real}) y la dotación óptima recomendada ($D_{óptima}$) (Tabla 21). Si bien a nivel internacional la OMS establece una dotación óptima de 100 L/hab-día, en este caso se adopta un umbral de referencia de 20 L/hab-día, considerando que dicha cantidad permite cubrir las necesidades básicas de consumo, preparación de alimentos, lavado y aseo personal (OMS, 2024). Actividades como lavandería o limpieza doméstica no se garantizan con esta dotación; sin embargo, la comunidad dispone de fuentes alternas de agua salobre que complementan estos usos.

Con base en los registros del contador de la planta y una población abastecida de 842 habitantes, se estimó la dotación real en campo, utilizada para el cálculo del indicador.

Tabla 21. *Formulación y cálculo de cantidad de agua segura*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
7	CA_{seg*}	$CA_{seg} = \frac{D_{real}\ (\frac{L}{hab.día})}{D_{óptima}\ (\frac{L}{hab.día})}$	$CA_{seg} \in [0,n]$ ***D_{real}:*** Dotación de agua segura disponible por persona en un día (L/hab-día), ***$D_{óptima}$:*** Dotación óptima de agua segura disponible por persona en un día (L/hab-día)

Criterio de decisión	Parámetro	Valor	Comentarios	CA_{seg}	CA_{seg}*
$CA_{seg}* = \begin{cases} 1\ si\ CA_{seg} \geq 1 \\ [0,1)\ si\ CA_{seg} < 1 \end{cases}$ Si CA_{seg}* ≥ 1 dotación suficiente	Volumen de agua segura producido	992 m^3	Volumen de agua producido registrado hasta la visita de campo (13.09.2025)	0,11	0,11
	Tiempo de operación	527 días	Desde la entrada de operación (02.2024) a hasta la visita de campo (09.2025). Se consideran 45 días de salida de operación de la planta		
	Dotación real	2,24 15,68	(L/hab-día) (L/hab-semana)		
	Dotación óptima	20	L/hab-día		

Según los resultados obtenidos si toda las población beneficiaria se abasteció diariamente de la planta en los pasados 18 meses, la dotación por persona fue de 2,24 L/hab-día o 15,68 L/hab-semana. Esto coincide con la información recolectada en campo por ZOA en abril 2024 donde al encuestar a habitantes que se acercaban al punto de recolección 8 de las 9 personas encuestas manifestaron recolectar agua una única vez a la semana con un límite de capacidad de transporte de entre 80 a 100 litros. Esta cantidad no satisface la dotación mínima óptima y corresponde tan solo a un 10% del óptimo esperado.

7.3.2.2 Accesibilidad al suministro de agua segura (SA_{seg})

El indicador evalúa la proximidad y el tiempo de recolección del agua destinada al consumo doméstico, como medida del nivel de acceso físico al recurso (Tabla 22). Se califica de acuerdo con la ubicación de la fuente de abastecimiento y el tiempo total requerido para recolectar el agua (ida, espera y retorno).

El cálculo del indicador se realizó a partir de una estimación de la distribución poblacional, basada en la descripción del territorio obtenida en el taller participativo y en información de línea base recopilada por ZOA. En ese sentido, ya que no se realizó un encuesta hogar a hogar, los resultados del indicador deben ser interpretados como una aproximación orientativa, útil para la comprensión general de las condiciones de accesibilidad, mas no como una medición de carácter censal.

Tabla 22. *Formulación y cálculo de accesibilidad al suministro de agua segura*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
8	SA_{seg}	$SA_{seg} = \sum(p_i * s_i)$ $p_i = n_i/n_T$	$SA_{seg} \in [0,1]$, s_i: nivel de acceso (óptimo, intermedio, básico, inadecuado o muy inadecuado), p_i: proporción de población por nivel de acceso, n_i: habitantes con nivel de acceso s_i, n_T: población total

Puntaje	Criterio	Descripción	No. hab.	Estimación	SA_{seg}
1	Óptimo	Agua disponible continuamente en punto dentro de la vivienda.	0	0,00	0,50
0,75	Intermedio	Agua disponible en punto comunitario a <100m o un tiempo de recolección total de ≤ 5 min	400	0,36	
0,50	Básico	Punto de recolección entre 100 a 500 m de distancia o un tiempo de recolección total de 5-20 min.	173	0,10	
0,25	Inadecuado	Punto de recolección entre 500 a 1000 m de distancia o un tiempo de recolección total de 20-30 min.	129	0,04	
0	Muy inadecuado	Punto de recolección a más de 1000 m de distancia o un tiempo de recolección ≥ 30 min.	131	0,00	

Fuente: MinVivienda, 2018; ZOA, 2023.

El 68% de la población se encuentra en un rango de acceso intermedio o básico, es decir, que requieren como máximo 20 minutos para tareas de recolección de agua. Asimismo, se estima que alrededor del 30% de la población requieren tiempos superiores a 20 minutos. La población con el mejor nivel de acceso corresponde a estudiantes, profesores y algunas familias residentes en el centro poblado, dentro de un radio de 100 metros alrededor de la planta de tratamiento, quienes disponen de acceso rápido al punto de abastecimiento.

7.3.2.3 Cobertura de servicio de agua segura (COA)

El COA mide el acceso a una fuente mejorada de agua en la comunidad después de la implementación del sistema. Se entiende como fuente mejorada pozo o manantial protegido, red pública, agua tratada o agua envasada con provisión regular (Tabla 23). El cálculo se basa en estimaciones poblacionales y testimonios cualitativos, dado que no se dispone de un censo de consumo previo ni de registros formales de distribución.

Tabla 23. *Formulación y cálculo de cobertura de servicio de agua segura*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
9	COA	$COA = \frac{P_{acc}}{P_{tot}}$ $\Delta COA = \frac{COA - C_{base}}{100}$	P_{acc}: habitantes con acceso a servicios de agua segura actualmente, P_{tot}: habitantes con acceso a servicios de agua segura actualmente, C_{base}: % de cobertura de habitantes con acceso a servicios de agua segura en línea base (antes del proyecto)

Criterio de decisión	Parámetro	No. hab	Valor (%)	Comentarios	ΔCOA	COA
$COA,$ $\text{COA} \in [0,1]$	Cobertura actual (COA)	842	100	Todas las familias y estudiantes acceden al agua tratada la planta.	0,64	1
	Cobertura base (C_{base})	305	45	Escuela y profesores realizaban compra de agua envasada y recibían carrotanque semanal.		

Antes de la implementación del SDS, el acceso a agua segura era muy limitado y segmentado. Según la información obtenida en los talleres comunitarios y entrevistas, los docentes (20 personas) eran quienes compraban agua envasada desde Uribia para su consumo. Adicionalmente, la IEIR Katanamana recibía semanalmente un carrotanque de 10.000 L, con capacidad para abastecer con 5 L/día a 285 habitantes. En conjunto, se estima que solo 91 personas (≈11 % de la población) contaban con acceso a una fuente mejorada de agua, mientras que el resto de la comunidad dependía de fuentes salobres o superficiales sin tratamiento.

Tras la puesta en marcha del sistema comunitario, la situación cambió de forma significativa. Según lo manifestado en el taller comunitario, las familias, estudiantes y docentes acceden actualmente al agua tratada de la planta mediante el cronograma de recolección organizado por la comunidad, lo que permite estimar una cobertura actual del 100 % en el acceso al servicio. Los participantes reportaron haber abandonado el consumo de agua salobre y adoptado de manera generalizada el uso del agua tratada. El indicador refleja un incremento neto del 64 % en la cobertura de acceso a fuente mejorada de agua y alcanza actualmente el 100 % de la población objetivo.

7.3.2.4 Índice de Riesgo de Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCA)

El indicador evalúa el riesgo sanitario del agua destinada al consumo humano mediante el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA) (MinAmbiente, 2007). Este indicador permite valorar el nivel de seguridad sanitaria del agua tratada, considerando parámetros microbiológicos, fisicoquímicos y de desinfección críticos para la salud pública (Tabla 24).

Tabla 24. *Formulación de índice de riesgo de calidad del agua para consumo humano*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
10	IRCA	$IRCA^* = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i}{\sum_{i=1}^{n} C_{tot}}$	C_i: Puntajes de riesgo de características no aceptables, C_{tot}: Puntajes de riesgo de todas las características analizadas, ***IRCA:*** IRCA normalizado
Criterio de decisión		**Estimación**	**Calificación**
$IRCA = 1 - IRCA^*$ [0: Inviabilidad sanitaria, 1: Sin riesgo]		No se reporta medición	0

La comunidad de Katanamana no está constituida como prestadores de servicio, por lo que no tiene obligación de reportar IRCA (MinAmbiente, 2007). Por lo tanto, la responsabilidad de la vigilancia sanitaria recae en la autoridad municipal o departamental. Sin embargo, no se cuenta con análisis fisicoquímicos o microbiológicos recientes, y el acompañamiento programado por ZOA no se concretó tras su salida del territorio, lo que impidió realizar la caracterización prevista.

Adicionalmente, el último Boletín de Vigilancia de Calidad del Agua emitido en diciembre 2024 muestra que en las zonas rurales de La Guajira se analizó solo una muestra que obtuvo un riesgo alto (INS, 2024). En informes pasados, directamente no se reportan información para la zona rural del municipio de Uribia (INS et al., 2024). Esto evidencia una falta generalizada de monitoreo en sistemas comunitarios de la zona. En ausencia de esta información, el indicador se califica como cero, destacando la necesidad de realizar análisis de la calidad real del agua suministrada a la comunidad.

7.3.2.5 Nivel de conocimiento sobre la fuente de agua (CF)

Este indicador evalúa el grado de información hidrogeológica disponible y el nivel de seguimiento técnico del pozo, elementos fundamentales para la gestión sostenible del recurso subterráneo (Tabla 25). Se compone de cuatro criterios binarios que permiten identificar vacíos críticos en la comprensión y vigilancia de la fuente.

Tabla 25. *Formulación y cálculo de nivel de conocimiento sobre la fuente de agua*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
11	CF	$CF = \frac{\sum_{i=1}^{4} C_i}{4}$	C_i: Categoría evaluada, C_1 hasta C_4

Puntaje	Criterio de decisión	Valoración	Calificación
0: Ausencia 1: Presencia	C_1: Existencia de modelo conceptual del acuífero	1	0,25
	C_2: Existencia de Plan de Manejo Ambiental del acuífero	0	
	C_3: Monitoreo periódico de nivel de agua del pozo	0	
	C_4: Existencia de prueba de bombeo	0	

El área de estudio se encuentra dentro del alcance del SAC 3.2, el cual incluye un modelo conceptual hidrogeológico desarrollado por el Servicio Geológico Colombiano. Este modelo describe el funcionamiento del acuífero, los procesos de recarga, el movimiento del agua subterránea y la interacción con el medio superficial, constituyendo una base técnica esencial para orientar decisiones de uso y protección (véase sección 7.1.2).

Corpoguajira informó que el Plan de Manejo del Acuífero está en proceso de elaboración, pero el documento aún no existe. Esta ausencia limita la orientación técnica para el uso sostenible del recurso y es especialmente relevante porque el acuífero se utiliza para consumo humano y requiere medidas claras de protección.

Aunque la comunidad manifiesta que el pozo responde bien a la demanda y tiene un tasa de producción de hasta 5.000 L/h, la comunidad no cuenta con el equipo de sondeo ni realiza ningún tipo de monitoreo periódico. Este bajo nivel de conocimiento de la fuente representa un alto riesgo pues no es posible conocer las capacidades de producción ni de recuperación del sistema.

7.3.2.6 Riesgo de calidad de la fuente de agua (RCF)

Este indicador valora el estado indirecto de la fuente subterránea en términos de posibles factores que pueden afectar su calidad. Se evalúan seis criterios relacionados con la protección del territorio, la presencia de actividades susceptibles de deteriorar la calidad del agua y las condiciones estructurales de los pozos (Tabla 26).

Tabla 26. *Formulación y cálculo de riesgo de calidad de la fuente de agua*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
12	RCF	$RCF = \frac{\sum_{i=1}^{6} C_i}{6}$	***Ci:*** Categoría evaluada, C_1 hasta C_6

Criterio de decisión	Puntaje	Valoración	Calificación
C_1: Existen zonas protegidas en la área hidrográfica	0: No existen 1: Existen	0	0,50
C_2: Actividades de minería en la zona hidrográfica	0: Ocurre 1: No ocurre	0	
C_3: Uso de agroquímicos en la zona hidrográfica		1	
C_4: Deforestación en la zona hidrográfica		1	
C_5: Intrusión marina		0	
C_6: Integridad de pozos	0: Pozos mal sellados 1: Pozos bien construidos y protegidos	1	

El territorio se encuentra dentro de un resguardo indígena, lo que le otorga reconocimiento y protección socio territorial; sin embargo, esta figura no corresponde a un área protegida ambiental del SINAP ni implica medidas específicas de conservación ecosistémica. A escala municipal, Uribia no presenta niveles significativos de deforestación en comparación con municipios vecinos como Riohacha, Barrancas o Maicao (Global Forest Watch, 2024). Entre 2015 y 2024 se reportan alrededor de dieciséis hectáreas deforestadas dentro del Parque Nacional Natural Macuira, una cifra relativamente baja y localizada en una zona distante, hacia el norte del municipio (Global Forest Watch, 2024).

La vocación del territorio en Uribia es mayoritariamente pastoril y no agrícola. Aunque el municipio cuenta con una frontera agrícola potencial del 36 %, su aporte a la producción agrícola departamental es marginal (Alcaldía de Uribia, 2024). En cuanto a actividades extractivas, tal como se describió en la sección correspondiente, se identifican tres Unidades de Producción Minera activas en el municipio (Alcaldía de Uribia, 2024), aunque su escala y localización no representan una presión directa sobre la cuenca de recarga asociada al pozo evaluado. Finalmente y como se mostró en la sección 7.1.3, se han adelantado proyectos de obra civil para el mejoramiento y encerramiento de pozos en comunidades indígenas en el municipio de Uribia.

7.3.2.7 Medición de contaminantes en fuente de abastecimiento (MCF)

Este indicador evalúa la calidad del agua en la fuente de abastecimiento mediante la verificación de la presencia de contaminantes que pueden afectar la salud humana (Tabla 27). Este es un indicador proxy, toma información de puntos cercanos y pertenecientes al acuíferos levantados por el SGC. Aunque en el Estudio Nacional del Agua 2022 se reportan el monitoreo de diferentes parámetros con frecuencia anual, Corpoguajira solo cuenta con pruebas realizadas en el 2015. El análisis presentado deja por fuera sustancias de interés como arsénico, plomo, cadmio y cromo VI. En este caso, se seleccionaron como contaminantes de interés nitratos, flúor, y fosfatos que se encontraban dentro de las sustancias reportadas. Se presentan como contexto los resultados de 5 puntos de relevancia geográfica. Sin embargo, esto es sobre todo ilustrativo, considerando que se toman como base resultados del 2015 y que se genera una incertidumbre compleja sobre la presencia de contaminantes en la fuente

Tabla 27. *Formulación y cálculo de medición de contaminantes en fuente de abastecimiento*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
13	MCF	$MCF = \begin{cases} 1 & máx_c < Vr \\ 0 & máx_c \geq Vr \ o \ NRI \end{cases}$	***Máxc:*** Máxima concentración detectada de contaminante de interés, ***Vr*:** Valor de referencia de riesgo para la salud, ***NRI:*** No reporta información

Sustancia	Límite	Uribia	Media Luna	Samutpio	Sichichon	MCF
Nitratos (mg NO_3/L)	50	0,7	<0,2	<0,2	<0,2	0
Flúor (mg F/L)	1,5	0,6	7,8	14,6	3,1	
Fosfatos (mg PO_4 /L)	1,23	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	

Fuente: OMS, 2024; SGC, 2014.

Los resultados de la caracterización muestran que el flúor supera el límite permitido en tres de los puntos evaluados, lo que indica una condición de riesgo sanitario asociada a las características naturales del acuífero. En contraste, los nitratos se encuentran por debajo del valor máximo permitido y no evidencian contaminación por aguas residuales o actividad agrícola. Los fosfatos también se mantienen en niveles bajos y no representan un riesgo conocido para la salud. Considerando que no se cuenta con información reciente del sistema acuífero el indicador se califica con cero.

7.3.2.8 Producción alimenticia local (PAL)

Este indicador evalúa la producción alimentaria local mediante el rendimiento promedio de los cultivos expresado en kilogramos por hectárea (Tabla 28). Su propósito es medir la capacidad productiva del territorio y la contribución de las unidades agrícolas a la seguridad alimentaria de la comunidad. El rendimiento se calcula para los cultivos relevantes del área y se normaliza con respecto a rendimientos de referencia para zonas semiáridas, lo que permite interpretar el resultado en una escala entre cero y uno.

Tabla 28. *Formulación y cálculo de producción alimenticia local*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
14	PAL	$PAL = \frac{\sum I_{i*} A_i}{\sum A_i} \quad Ii = \frac{P_{i*} A_i}{R_{opt}}$	***Ii:*** Normalización del rendimiento por cultivo, ***Pi:*** Producción total por cultivo (kg), ***Ai:*** Área sembrada por cultivo (ha), ***Ropt:*** Rendimiento óptimo de producción por cultivo (kg/ha)

Criterio de decisión	Estimacion	Calificación
$PAL, con\ PAL \in [0,1]$	No se reporta información	0

Durante la visita de campo no se identificaron cultivos activos ni cosechas recientes que permitieran estimar valores reales de producción. Los habitantes señalaron que la siembra se realiza únicamente durante los periodos de lluvia y que desde hace varios meses no se registran precipitaciones suficientes para establecer cultivos. La ausencia de producción activa durante el periodo de evaluación no solo se relaciona con la falta de lluvias recientes, sino también con las limitaciones propias del suelo poco favorables para la agricultura. Además, aunque inicialmente se planteó el fortalecimiento de las actividades agrícolas haciendo uso de agua de rechazo de la planta, las

dotación de rechazo es baja y cuenta con características de alta salinidad, por lo que el nexo entre agua y alimentos no ha sido posible en ese sentido. En este contexto, el indicador obtiene un valor equivalente a cero debido a la ausencia de producción medible en el periodo de análisis.

7.3.2.9 Pobreza energética (PE)

La pobreza energética refiere a la ausencia o privación de servicios energéticos en los hogares (MinMinas, 2024). Este indicador evalúa las condiciones de pobreza energética en la comunidad considerando las dimensiones propuestas por el Ministerio de Minas y Energía, pero ajustadas a la realidad social, cultural y tecnológica de Katanamana (Tabla 29).

Tabla 29. *Formulación y cálculo de pobreza energética*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
15	PE	$PE = \frac{\sum_{i=1}^{4} C_i}{4}$	C_i: Dimensiones de la pobreza energética

Categoría	Puntaje	Valoración	Explicación	Calificación
C1: Acceso a energía eléctrica y continuidad del servicio en hogar	0: Nulo 0,25: Limitado 0,50: Aceptable 0,75: Bueno 1: Muy bueno	0	No cuentan con acceso a electricidad a nivel de vivienda	0,33
C2: Espacios adecuados para cocinar		0,25	Cuentan con estufas con kerosene pero lo más usado es el fogón de leña al no representar un gasto adicional	
C3: Acceso comunitario a comunicaciones (internet, computadores, smartphone)		0,75	Acceso a electricidad y comunicaciones en espacio comunitarios como la escuela o la enramada	

Fuente: (MinMinas, 2024).

La evaluación presenta un alto nivel de pobreza y vulnerabilidad energética. El acceso y uso de la electricidad tiene un enfoque primordialmente comunitario, lo cual es una característica clave al pensar en el Nexo AEA en la comunidad. Si bien la disponibilidad de energía en espacios colectivos permite la operación de infraestructuras esenciales, como el sistema de desalinización, el acceso a medios energéticos a nivel domiciliario es inexistente y no soporta actividades básicas de la vida cotidiana ni actividades económicas, incluyendo la refrigeración de alimentos. Todavía hay un gran potencial para mejorar las condiciones de vida a nivel de vivienda través de la disminución de la pobreza energética. El indicador obtiene una calificación de 0,33.

7.3.2.10 Nivel de conocimiento de la tecnología (NC_{tec})

Este indicador evalúa el nivel de conocimiento que posee que opera la tecnología instalada para el suministro de agua tratada (Tabla 30). Considera la comprensión general del sistema, la capacidad para ejecutar labores básicas y rutinarias de operación y mantenimiento, así como el nivel de autonomía ante fallas o situaciones que requieren respuesta inmediata. El objetivo es identificar hasta qué punto el operador domina los componentes esenciales de la tecnología y está preparado para sostener el funcionamiento cotidiano del sistema.

Tabla 30. *Formulación y cálculo de nivel de conocimiento de la tecnología*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
		$NC_{tec} = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i}{n}$	

16	NC_{tec}			***Cᵢ:*** Categoría evaluada del nivel de conocimiento de la tecnología, C_1 hasta C_n	
Categoría	**Puntaje**	**Valoración**	**Explicación**	**CF**	
C1: Participó de las capacitaciones dadas sobre O&M de la planta	0: No aplica 1: Aplica	1	Se contó con la asistencia y participación	0,80	
C2: Puede explicar el funcionamiento y los componentes principales de la tecnología		1	Puede explicar el funcionamiento de la tecnología e identificar sus componentes más relevantes		
C3: Puede ejecutar labores de O&M básicas y rutinarias sin asistencia externa		1	Todas las labores rutinarias se desarrollan sin problema		
C4: Puede ejecutar tareas técnicas especializadas		0	El lavado con ácidos anual se realiza con asistencia externa. Otras tareas más especializadas (ej.: eléctricas) también.		
C5: Puede identificar fallas, aplicar medidas iniciales de respuesta y conoce a quién contactar en casos de daño grave o situación crítica.		1	En ocasiones previas, han podido identificar fallas a tiempo y solicitar el apoyo correspondiente.		

La evaluación refleja un nivel alto de conocimiento técnico y operativo, con una calificación de 0,80. El operador demuestra claridad en el funcionamiento general de la planta, reconoce los componentes clave y puede ejecutar de manera adecuada las tareas diarias y rutinarias de operación y mantenimiento. También ha mostrado capacidad para identificar fallas iniciales y activar las rutas de apoyo necesarias. La dependencia de asistencia externa para actividades altamente especializadas reduce ligeramente la calificación, aunque no compromete la operatividad regular del sistema. En conjunto, los resultados indican una apropiación técnica suficiente para garantizar el funcionamiento básico de la planta bajo las condiciones actuales.

7.3.2.11 Vulnerabilidad del sistema por reemplazo de componentes (VRC)

Este indicador evalúa la vulnerabilidad del sistema frente a la necesidad de reemplazo de componentes técnicos esenciales, considerando dos categorías claves para cada ítem evaluado (Tabla 31). El primero es la disponibilidad de repuestos en el mercado local o nacional y el segundo, corresponde al costo del reemplazo del componente. Ambos aspectos permiten identificar la facilidad real con la que la comunidad puede mantener la operatividad del sistema ante fallas o deterioro. En base al trabajo de campo y las entrevistas tanto con el desarrollador de la tecnología, como con el operador, se establecieron los cinco componentes fundamentales para el funcionamiento del sistema de desalinización. Con el fin de estimar el nivel de dependencia externa y el riesgo asociado a la reposición cada uno de estos componentes fue evaluado.

Tabla 31. *Formulación y cálculo de vulnerabilidad del sistema por reemplazo de componentes*

No.	**Indicador**	**Formulación**	**Descripción**
17	VRC	$VRC^{*}=\frac{\sum_{i=1}^{5}\frac{C1+C2}{2}}{5}$	VRC ∈ [0,1] Para los 5 componentes principales del sistema (n=5) se califica: ***C₁:*** Disponibilidad de repuesto, ***C₂:*** Costo relativo de reemplazo

Categoría	**Criterios**	**Valoración por componente**					
		Prefiltros	**Membrana**	**Bomba**	**Químicos de limpieza**	**Componentes eléctricos [a]**	**VRC**

C1: Disponibilidad de repuesto	0: Difícil acceso, importado 0,5: Intermedio, nacional 1: Fácil acceso, regional (ej: en La Guajira)		1	0	0,5	1	0	
C2: Costo del reemplazo	0: >750.000 / año 0,5:>500.000 / año 1: < 500.000 / año	$COP	$ 615.000	$ 4.500.000	$4.600.000	$700.000	$900.000	0,35
		Tiempo de uso	6 meses	5 años	5 años	2,2 años	1,5 años	
		$COP/año	$1.230.000	$880.000	$931.000	$350.000	$600.000	
			0	0	0	1	0,5	
	VRC$_i$		0,5	0	0,25	1	0,25	

Nota. (ª) Componentes eléctricos incluyen variador de frecuencia, inversor, batería, entre otros. Los precios de mercado se estimaron considerando referencias de los productos usados y los valores de mercado para enero 2026.

El valor final del indicador fue 0,35 reflejando una vulnerabilidad moderada derivada principalmente de la reposición de los componentes más especializados. Las bombas son un componente clave de alto valor económico. Las membranas del sistema requieren modelos específicos que no se comercializan en el país y deben ser importadas, lo que incrementa el tiempo de reposición y el costo. El caso es similar para equipos eléctricos como el inversor, que opera en una configuración de voltaje y frecuencia poco común en Colombia (220V, 50Hz). Estos elementos no solo son costosos sino que requieren proveedores especializados por fuera del territorio. En contraste, repuestos productos químicos de limpieza son de fácil acceso en el mercado local y tienen un costo relativamente bajo, lo que disminuye la vulnerabilidad en estos rubros. Por otro lado, los el material filtrante como carbón activado, arena y cartuchos aunque son de fácil acceso requieren una frecuencia de cambio más constante y representan uno de los principales gastos anuales.

7.3.2.12 Capacidad de respuesta a fallas (CRF)

Este indicador evalúa la estabilidad operativa del sistema a través de la frecuencia y severidad de los daños ocurridos durante el periodo de análisis (Tabla 32). Su propósito es identificar el grado de vulnerabilidad funcional del sistema frente a fallas que puedan interrumpir el servicio, considerando que la continuidad de la operación es esencial para garantizar el acceso regular al agua tratada. El análisis se concentra en el número y la naturaleza de los eventos de daño registrados, los cuales permiten estimar el nivel de riesgo asociado al funcionamiento cotidiano de la tecnología.

Tabla 32. *Formulación y cálculo de capacidad de respuesta a daños*

No.	**Indicador**	**Formulación**	**Descripción**	
18	CRF	$CRP = f(C)$	***C:*** Cantidad de fallas y capacidad de respuesta	
Puntaje	**Criterio**	**Descripción**		**CRF**
1	Alta	Las fallas son muy poco frecuentes o inexistentes: solo 1 falla en el último año, la falla no impidió la operación de la planta.		0,50
0,75	Aceptable	Ocasional de baja severidad: más de 2 fallas del sistema en el último año, los daños no impidieron la operación de la planta por más de un día.		
0,50	Medio	Recurrentes moderados: Tres a cuatro fallas al año o fallas que afectan temporalmente la continuidad del servicio.		

0,25	Bajo	Frecuentes o relevantes: cinco o más daños al año o fallas que dejan el sistema fuera de servicio varios días.
0	Muy bajo	Fallas críticas y sistemáticas: Fallas constantes, interrupciones prolongadas o colapso del sistema

El indicador obtuvo una calificación de 0,50 debido a fallas intermitentes que han afectado la operación. Durante la visita se constató un daño que ha generado interrupciones recurrentes, relacionado con la falta de recarga adecuada de las baterías que alimentan el panel de control y permiten iniciar la operación. Cuando las baterías se descargan por completo, deben ser trasladadas hasta Uribia para ser recargadas, lo que incrementa la vulnerabilidad del sistema y afecta su continuidad. La comunidad mantiene comunicación con el técnico en Riohacha que anteriormente apoyaba a través del equipo de ZOA y que continúa brindando acompañamiento de forma voluntaria tras la salida de la organización del país. Sin embargo, la gestión con el proveedor se realiza a través del técnico y la comunidad reporta que la atención es lenta y que el problema persiste sin una solución definitiva.

Aunque la comunidad ha logrado mantener la operación mediante ajustes temporales, la falla evidencia una condición técnica inestable que interrumpe la continuidad del servicio y representa un desafío para la gestión cotidiana de la planta.

7.3.2.13 Gestión comunitaria (GC)

Este indicador evalúa el grado de organización, participación y continuidad de las acciones comunitarias asociadas a las dimensiones de agua, energía y alimentación (Tabla 33). Busca identificar cómo la comunidad asume roles de gestión, cómo se articula entre generaciones y qué tan activos son los grupos de comités en el acompañamiento y fortalecimiento de estas dimensiones.

Tabla 33. *Formulación y cálculo de gestión comunitaria*

No.	**Indicador**	**Formulación**	**Descripción**
19	GC	$GC = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i}{n}$	***Ci:*** Categoría evaluada de la gestión comunitaria, C_1 hasta C_n

Categoría	**Puntaje**	**Valoración**	**Explicación**	**CF**
C1: Existencia de junta u organización social asociados al agua, energía o alimentos	1: Considera las tres dimensiones AEA 0,66: Considera las dos dimensiones AEA 0,33: Considera solo 1 dimensión AEA	0,33	Comité de agua conformado desde inicio de operación de la planta, con nivel de actividades intermitentes.	0,66
C2: Participación activa de los y las jóvenes en espacio de organización comunitaria asociados al agua, energía o alimentos		0,33	Las y los jóvenes son miembros activos del comité de agua. Representan el 41% de los miembros del comité.	
C3: Existe transferencia de conocimiento para la formación de nuevas personas en la comunidad (ej.: uso del agua, actividades productivas fomentada por electricidad, agricultura)		0,66	Se organizan visitas al sistema de agua con estudiantes y miembros de la comunidad, también se fomenta proyectos agrícolas desde la escuela y el hogar	
C4: Existe un equipo en capacidad de operar los sistemas AEA		0,66	5 personas fueron capacitadas para operación del sistema solar. Los cultivos verticales están sin uso	
C5: Existen espacios de concientización respecto al uso responsable de recursos naturales asociados al AEA		1	Desde la escuela se gestiona la cátedra y promoción de estos espacios	

C6: Existen cooperación entre la comunidad e instituciones u organizaciones para gestión de agua, energía o alimentos	0: No se considera ninguna dimensión	1	Existe cooperación con Alcaldía, ONG y SENA, para proyectos de agua, alimentos y electricidad

El indicador de gestión comunitaria entorno a las dimensiones AEA refleja una participación intermedia de la comunidad y un alto enfoque en la dimensión de agua. La existencia de un comité de agua activo ha permitido la organización de diversas actividades comunitarias y espacios de concientización en la escuela. Es muy positivo que la comunidad cuente con un espacio colectivo de organización en torno al agua y al sistema de desalinización solar. Por otro lado, la dimensión de alimentos no ha logrado un desarrollo similar, evidenciado, en la limitada actividad agrícola en los pilotos de cultivos verticales y por consiguiente, en la ausencia de una organización comunitaria sostenida en torno a esta iniciativa. Respecto a la dimensión de energía, la comunidad ya ha logrado desarrollar proyectos para fortalecer la gestión relacionada a esta dimensión, especialmente, para el beneficio de espacios comunitarios. Existe un gran interés de la comunidad en el desarrollo de proyectos y alianzas que materialicen un avance en el nivel de vivienda.

Cabe también destacar que ya hay una estructura organizativa existente y una dinámica intergeneracional positiva, lo que es una gran base para seguir fortaleciendo la dinámica comunitaria. En el caso de la calificación del indicador, la dimensión de agua se identifica como el eje principal de organización comunitaria y las dimensiones de alimentos y energía están menos integradas a esta gestión comunitaria

7.3.3 Indicadores de impacto

7.3.3.1 Equidad en acceso a agua segura (EAA)

Este indicador busca evaluar la equidad espacial en el acceso al agua segura dentro de la comunidad, analizando si la distancia entre los hogares y el punto de hidratación influye en la cantidad de agua que las familias logran recolectar (Tabla 34). La premisa fundamental es que un acceso equitativo se refleja en volúmenes de agua similares entre hogares cercanos y lejanos, evitando que la ubicación geográfica se convierta en una barrera para el acceso servicio. Su formulación se basa en la comparación de los volúmenes de agua recolectados semanalmente por hogares ubicados en zonas próximas y zonas más alejadas del punto de abastecimiento, lo que permite identificar posibles desigualdades territoriales en el uso del sistema de agua tratada.

Tabla 34. *Formulación de equidad en acceso a agua segura*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
20	EAA	$A_{seg} = \frac{Z_{per}}{Z_{cer}}$	EAA ∈ [0, 1] asumiendo que Z_{cer} siempre tiene acceso a más agua $\boldsymbol{Z_{per}}$**:** Volumen promedio semanal recolectado por grupo de habitantes ubicados a > 20 min hasta el punto de hidratación (ida y vuelta), $\boldsymbol{Z_{per}}$**:** Volumen promedio semanal recolectado por grupo de habitantes ubicados a < 20 min hasta el punto hidratación (ida y vuelta).

Criterio de decisión	Estimación	Calificación
EAA, con EAA ∈ [0, 1]	No se cuentan con una muestra representativa de los niveles de recoleccion por familia	No se midió el indicador

Este indicador no fue evaluado debido a la ausencia de información sobre los volúmenes de agua recolectados a nivel de hogar y la distancia real de cada vivienda al punto de hidratación. Aunque se cuenta con estimaciones generales de distancia y con testimonios de tiempos de recolección, estos datos no permiten construir grupos comparables ni estimar promedios confiables para los hogares cercanos y lejanos. La estructura dispersa del territorio, junto con la falta de un levantamiento georreferenciado de viviendas y consumos, limita la posibilidad de aplicar el indicador y obtener un valor representativo. Aun así, la inclusión del indicador es relevante porque evidencia un aspecto crítico del acceso al agua segura en comunidades dispersas, donde la distancia puede afectar la capacidad real de uso del servicio.

7.3.3.2 Percepción comunitaria de mejora en salud (PCS)

Este indicador evalúa la percepción general de la comunidad sobre los cambios en su estado de salud en el último año (Tabla 35). Se fundamenta en la información obtenida durante el taller participativo, donde las y los habitantes expresaron de manera colectiva cómo han sentido su bienestar físico desde que acceden al agua tratada. Aunque no reemplaza medidas clínicas o epidemiológicas, la percepción comunitaria constituye un insumo esencial para comprender el impacto social de un proyecto de agua, ya que refleja cambios observados en la vida cotidiana a partir del uso de una fuente segura.

Tabla 35. *Formulación y cálculo de percepción comunitaria de mejora en salud*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
21	PCS	$PCS = \begin{cases} 1 \; si \; P = Alto \\ 0{,}75 \; si \; P = Moderado \\ 0{,}50 \text{ si } \; P = Ambiguo \\ 0{,}25 \; si \; P = Igual \\ 0 \; si \; P = Peor \end{cases}$	***P:*** Percepción comunitaria de mejora en salud

Categoría	Descripción	Explicación	PCS
[1] Alto	Mejora percibida, fuerte consenso explícito en la comunidad. Cambio positivo ampliamente reconocido.	Se manifiesta de forma clara y consistente efectos positivos en la salud especialmente asociados al cambio de agua.	1
[0,75] Moderado	Mejora percibida moderada por varios testimonios. Algunos indican que los cambios han sido marginales. Existe una tendencia positiva, pero no unanimidad.		
[0,50] Ambiguo	Opiniones mixtas sin patrón claro. Algunos reportan mejoras y otros no perciben ningún cambio.		
[0,25] Sin cambios	Se percibe que no ha habido mejoras sin agravamiento		
[0] Peor	Se percibe que la situación de salud ha empeorado		

Durante el taller comunitario las personas participantes manifestaron una percepción positiva respecto a su salud desde que consumen el agua tratada de la planta. La reducción de malestares gastrointestinales, mencionada en repetidas ocasiones, fue uno de los ejemplos concretos aportados para explicar esta mejora, aunque la percepción expresada se extendió a un bienestar general asociado a contar con agua segura para beber y preparar alimentos. A pesar de que no se cuenta con encuestas a nivel de hogar ni con datos clínicos que permitan cuantificar cambios en la incidencia de enfermedades, el testimonio colectivo proporciona una aproximación válida del impacto

percibido en la salud. Este tipo de evidencia es especialmente relevante en territorios donde el consumo de agua salobre o no tratada ha estado históricamente vinculado a problemas de salud, por lo que la valoración positiva de la comunidad constituye un indicio significativo del beneficio social generado por la intervención.

7.3.3.3 Inseguridad alimentaria en hogares (IAH)

Este indicador evalúa la inseguridad alimentaria desde la experiencia directa de los hogares adaptado desde la Escala de Experiencia de Inseguridad Alimentaria (FIES) propuesta por la FAO (Tabla 36). Es una herramienta ampliamente utilizada a nivel nacional y departamental en Colombia para medir la gravedad y prevalencia de la inseguridad alimentaria. Permite identificar si las familias enfrentan dificultades para acceder a alimentos suficientes y nutritivos, si han debido reducir la calidad o cantidad de sus comidas y si han experimentado episodios más severos como saltarse comidas o pasar un día sin comer. Al estar basada en experiencias vividas durante los últimos 12 meses, constituye una medida sensible y comparativa del bienestar alimentario y del impacto potencial de las condiciones territoriales o de intervenciones comunitarias sobre el acceso a alimentos.

Tabla 36. *Formulación y cálculo de inseguridad alimentaria en hogares*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
22	IAH	$IAH^* = \frac{\sum_{i=1}^{8} C_i}{8}$ $IAH = 1 - IAH^*$	***Cᵢ:*** Categoría evaluada de escala de inseguridad alimentaria, C_1 hasta C_8

Categoría	Descripción	Criterios	IAH
Preocupación	Se preocupó por no tener suficientes alimentos para comer	1: Si 0: No 0: No sabe / no informa, si NRI > 3 respuestas → no aplica	No se midió
No saludable	No pudo comer alimentos saludables y nutritivos		
Poca variedad	Consumió poca variedad de alimentos		
Saltó comidas	Tuvo que saltar una comida (desayuno, almuerzo o cena)		
Comió menos	Comió menos de lo que pensaba que debía comer		
Sin alimentos	Tuvo hambre pero no comió		
Día sin comer	No comió en un día entero		

Fuente: DANE, 2024.

Este indicador no fue evaluado en Katanamana debido a que no se realizaron encuestas a nivel del hogar, requisito indispensable para aplicarlo correctamente. La escala exige recopilar información individual y confidencial sobre las experiencias alimentarias de las familias, algo que no fue posible en el marco de esta evaluación. Aun así, el indicador se considera altamente relevante para futuras mediciones, ya que permitiría monitorear restricciones en el acceso a alimentos y como estas limitaciones afectan la calidad nutricional, la suficiencia diaria o la regularidad de las comidas.

7.3.3.4 Impacto de tarifas en ingreso familiar (ITI)

Uribia registra el índice de pobreza multidimensional más alto en todo el departamento (92,2%). Teniendo en cuenta este nivel tan crítico, se toma como base para la estimación de este indicador los ingresos mensuales establecidos para el departamento para personas en condición de pobreza monetaria extrema (DANE, 2018)(Tabla 37).

Teniendo en cuenta los costos de producción del sistema de desalinización (sección 7.1.3.3), el volumen producido y los días de operación hasta la fecha del trabajo de campo (sección 7.3.2.1), se establece el valor del pago por una dotación de 20 litros para el caso de que esta tarifa no contara con un subsidio del 100%. Actualmente, todos los costos de operación y de sostenimiento de la planta son subsidiados por la institución semi internado IEIR Katanamana. Esta estrategia ha funcionado pues se ha intercambiado el agua empacada obtenida para suplir la demanda de la escuela por el rubro con el cual se mantiene la planta y que beneficia a toda la comunidad. Este método de sostenimiento económico fue propuesto por la comunidad y es una pieza clave en el sostenimiento del sistema.

Tabla 37. *Formulación y cálculo de impacto de tarifas en ingreso familiar*

No.	**Indicador**	**Formulación**	**Descripción**
23	ITI	$ITI_{ratio} = \frac{Vt}{Iprom} x100$	V_t**:** Valor pago por dotación de agua (sin subsidio), I_{Prom}**:** Ingresos promedio ($COP /mensuales)

Parámetro	**Valor**	**ITI_{Ratio}**	**Criterio de decisión**	**ITI**
Producción de agua	1.886 L/d	1,81%	1: $ITI_{Ratio} \leq 3\%$ de I_{prom} 0,75: $4\% \geq ITI_{Ratio} > 3\%$ de I_{prom} 0,50: $5\% \geq ITI_{Ratio} > 4\%$ de I_{prom} 0,25: $6\% \geq ITI_{Ratio} > 5\%$ de I_{prom} 0: $ITI_{Ratio} > 6\%$ de I_{prom}	1
Costo de producción ($COP/día)	$37.256			
V_t (20L/día)	$395			
V_t (400L/mes)	$7.900			
I_{prom}: Ingresos mensuales	$435.375			

Nota. Todos los valores están dados en COP. Los costos de producción consideran cubrir los costos de operación y mantenimiento, no se consideran fondo de ahorro extra.

Con los niveles de producción actuales y los costos de operación y mantenimiento se establece una tarifa de $395 COP por dotación de 20 litros. Con los valores actuales, y en caso de que los hogares tuvieran que realizar el pago por el servicio de agua, los hogares estarían destinando el 1,81% de sus ingresos mensuales para acceder al servicio de agua. Este valor se sitúa por debajo de los umbrales utilizados para evaluar la asequibilidad del servicio de agua, lo que sugiere un bajo impacto económico en los hogares y una condiciones favorable en términos de sostenibilidad tarifaria del servicio.

7.3.4 Indicadores de respuesta

7.3.4.1 Gestión y disposición final de componentes (GF)

Este indicador evalúa el nivel de preparación existente para asegurar una gestión adecuada de los componentes del sistema una vez alcancen el final de su vida útil (Tabla 38). Considera aspectos como la existencia de lineamientos documentados, la inclusión de medidas específicas para residuos peligrosos y materiales recuperables, la formalización de acuerdos con gestores autorizados y la asignación de recursos para su manejo. Su propósito es identificar si la comunidad o el proyecto

cuentan con los elementos mínimos para garantizar una disposición final segura y ambientalmente responsable de equipos como paneles solares, baterías, membranas, filtros y otros elementos tecnológicos asociados al sistema.

Tabla 38. *Formulación y cálculo gestión y disposición final de componentes*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
24	GF	$GF = 0{,}2*(C_1 + C_2)+0{,}3*(C_3 + C_4)$	***C1:*** Plan documentado de disposición final, ***C2:*** Inclusión de medidas para residuos peligrosos y reciclaje, ***C3:*** Convenios con gestores autorizados o proveedores, ***C4:*** Presupuesto asignado para disposición final

Categoría	Criterio	Nivel	RCF
C1: Plan documentado de disposición final	0: No cumple 0,33: Cumplimiento mínimo 0,66: Cumplimiento parcial 1: Cumplimiento pleno	0	0
C2: Inclusión de medidas para residuos peligrosos y reciclaje		0	
C3: Convenios con gestores autorizados o proveedores.		0	
C4: Presupuesto asignado para disposición final		0	

El indicador de gestión y disposición final obtuvo una calificación de cero, lo que refleja que no existen avances significativos en los componentes evaluados. A pesar de que la comunidad reconoce la importancia de manejar adecuadamente los equipos y residuos asociados al sistema, no se cuenta con un plan documentado ni con medidas específicas para residuos peligrosos.

7.3.4.2 Cambio comunitario en el desarrollo productivo local (CCD)

Este indicador evalúa los cambios comunitarios asociados a procesos de desarrollo que surgieron en la comunidad en relación a las dimensiones agua, energía y alimentos (Tabla 39. *Formulación y cálculo de cambio comunitario en el desarrollo productivo*. La evaluación se hace en base al grado de emergencia y consolidación de las iniciativas desarrolladas.

Tabla 39. *Formulación y cálculo de cambio comunitario en el desarrollo productivo*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
25	CCD	$CCD = \frac{\sum_{i=1}^{3} C_i}{3}$	***Ci:*** Valoración cualitativa normalizada del cambio en el desarrollo productivo local asociado a las dimensiones AEA

Indicador		Criterio	Valoración	Explicación	CCD
Desarrollo productivo local	Asociado al agua	0: Cambio negativo fuerte, desarticulación de prácticas positivas existentes 0,25: Cambio negativo débil, generación de tensiones o conflictos 0,50: Sin cambios 0,75: Cambio positivo débil, iniciativas piloto 1: Cambio positivo fuerte, iniciativas consolidadas	1	En desarrollo de proyecto piloto para asumir la distribución de agua segura a comunidades contiguas	0,75
	Asociado a la energía		0,75	En desarrollo de proyecto piloto para producir hielo en uso energía solar. Proyectos gestionados para la electrificación de espacios comunitarios. Todavía sin efectos en nivel vivienda o productivos.	
	Asociado a los alimentos		0,50	No se consolidaron proceso productivos entorno a la agricultura vertical. No derivó en cambios en las prácticas de producción alimentaria.	

La comunidad ha comenzado a desarrollar nuevas iniciativas entorno a las dimensiones de agua y energía. El proyecto de distribución de agua en alianza con la Alcaldía de Uribia, desea aprovechar el carrotanque comunitario para la distribución local. A través de esta actividad, se daría cumplimiento a la obligación existente del municipio en la distribución periódica de agua con las comunidades. Actualmente esta labor se cumple de manera intermitente debida a problemas de acceso al territorio. Katanamana cuenta, en ese sentido, con una posición geográfica favorable y cercana a otras comunidades. Además, esta actividad representaría un ingreso adicional para la comunidad. Por otro lado, la comunidad manifiesta su interés en adelantar proyectos energéticos. Actualmente adelantan un propuesta preliminar para contar con congeladores alimentados con energía solar, con el fin de producir y comercializar hielo. Finalmente, en la dimensión de alimentos no se identificaron transformaciones significativas.

7.3.4.3 Cambio en la organización comunitaria (CCO)

Este indicador evalúa los cambios comunitarios asociados a la organización comunitaria que surgieron en la comunidad en relación a las dimensiones agua, energía y alimentos (Tabla 40). La evaluación se hace en base al grado de emergencia y consolidación de las formas de organización.

Tabla 40. *Formulación y cálculo de cambio en la organización comunitaria*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
26	CCO	$CCO = \frac{\sum_{i=1}^{3} C_i}{3}$	***Ci:*** Valoración cualitativa normalizada del cambio en la organización comunitaria asociado a las dimensiones AEA

Indicador		Criterio	Valoración	Explicación	CCO
Organización comunitaria e institucional	Asociado al agua	0: Cambio negativo fuerte, debilitamiento de organización, dependencia externa 0,25: Cambio negativo débil, tensiones 0,50: Sin cambio 0,75: Cambio positivo débil, espacios emergentes 1: Cambio positivo fuerte, espacio comunitario consolidad y activo	1	Creación y operación del comité de agua	0,75
	Asociado a la energía		0,75	Existe un liderazgo emergente. Todavía no está organizado desde un espacio comunitario	
	Asociado a los alimentos		0,50	La comunidad no se ha organizado formalmente entorno a la gestión asociada a la dimensión de alimentos	

El indicador muestra un cambio intermedio de transformación organizativa en la comunidad. Se observa una clara evolución organizativa entorno a la dimensión de agua, evidenciada por un espacio comunitario específico para su gestión. La creación del comité de agua constituye un avance importante, pues es la primera estructura de este tipo en la comunidad y ha logrado articularse con la escuela para coordinar tareas y resolver necesidades puntuales. Para el momento de la visita, la comunidad compartió que los espacios semanales de reunión del comité habían disminuido considerablemente en los últimos seis meses, y habían sido reactivados entorno a las fallas que presentó el sistema en el mes de julio del 2025. En contraste, las proyectos de energía son impulsados por el líder comunitario y todavía no cuentan con un espacio de concertación colectiva. Por su parte, las iniciativas vinculadas a alimentos no presentan, hasta el momento, procesos comunitarios de organización.

7.3.4.4 Cambio comunitario en la articulación de alianzas estratégicas (CCA)

Este indicador evalúa los cambios comunitarios asociados a la articulación de alianzas estratégicas que surgieron en la comunidad (Tabla 41). La evaluación se hace en base al grado de emergencia y consolidación de las alianzas establecidas.

Tabla 41. *Formulación y cálculo de cambio comunitario en la articulación de alianzas*

No.	Indicador	Formulación	Descripción
27	CCA	$CCA = C_i$	***C_i:*** Valoración cualitativa normalizada del cambio en la articulación de alianzas asociado a las dimensiones AEA

Indicador	Criterio	Valoración	Explicación	CCA
Articulación de alianzas estratégicas	0: Cambio negativo fuerte, deterioro o ruptura de alianzas 0,25: Cambio negativo débil, relacionamiento asistencial 0,50: Sin cambio, sin nuevas alianzas ni fortalecimiento de existentes 0,75: Cambio positivo débil, alianzas puntuales 1: Cambio positivo fuerte, alianzas sostenidas, co-gestión	Alianzas activas con tres instituciones y otras comunidades. Gestión autónoma y comunitaria de por lo menos 3 proyectos ejecutados y 2 en desarrollo como resultado de estas alianzas estratégicas.	1	

La comunidad ha demostrado un fortalecimiento práctico de capacidades a través de la gestión autónoma y el establecimiento de alianzas estratégicas para la ejecución de proyectos de interés comunitario. Un ejemplo destacado es la formulación y cierre exitoso de un proyecto para la adecuación y encerramiento de la zona de pozos de agua salobre en alianza con la Alcaldía de Uribia. El fortalecimiento de capacidades se ha traducido en acciones concretas y en una mayor capacidad para movilizar recursos y coordinar iniciativas locales. En cuanto a articulación externa, la comunidad ha establecido vínculos con instituciones como el SENA, la Alcaldía de Uribia, la gobernación de la Guajira y ONG como ZOA. Con la Alcaldía se ha establecido una relación más cercana y se evidencia una disposición creciente para participar en proyectos cogestionados como los mencionados anteriormente.

7.3.5 Análisis de resultados de indicadores particulares

En base a la matriz propuesta se realizó la evaluación de los indicadores particulares para el caso de la comunidad de Katanamana, los resultados finales de esa evaluación se presentan en esta sección. De los 27 indicadores propuestos en la matriz teórica se evaluaron 24 para el caso de estudio. Los tres indicadores no evaluados corresponden a percepción de equidad en acceso a agua segura (EAA) e Inseguridad alimentaria en hogares (IAH) donde una adecuada evaluación debe considerar la recopilación de información a una muestra poblacional representativa. Asimismo, el indicador DUP no fue evaluado por la limitada actividad agrícola en el momento del trabajo de campo. La Tabla 42 presenta la evaluación de los indicadores particulares medidos.

Tabla 42. *Evaluación de indicadores particulares del Nexo AEA en la comunidad de Katanamana*

PRESIÓN

Sigla	Indicador	Valor
DH	Demanda hídrica por consumo	0,00
GGS	Generación y gestión de subproductos	0,50
CAS	Calidad de agua para riego	0,00
DUP	Demanda hídrica por unidad productiva	NRM
PUS	Presión territorial por el uso del suelo	0,83
CPA	Condiciones de producción de las unidades agrícolas	1

IMPACTO

Sigla	Indicador	Valor
EAA	Equidad en acceso a agua segura	NRM
PCS	Percepción mejora en salud	1,00
IAH	Inseguridad alimentaria en hogares	NSM
ITI	Impacto de tarifas en ingreso familiar	1,00

ESTADO

CAseg	Cantidad de agua segura	0,11
SAseg	Accesibilidad a agua segura	0,50
COA	Cobertura de servicio de agua segura	1,00
IRCA	Riesgo de calidad de agua para consumo	0,00
CF	Conocimiento sobre la fuente de agua	0,25
RCF	Riesgo de calidad de la fuente de agua para consumo	0,50
MCF	Medición de contaminantes en fuente de abastecimiento	0,00
PAL	Producción alimenticia local	0,00
PE	Pobreza energética	0,33
NCtec	Conocimiento de la tecnología	0,80
VRC	Vulnerabilidad del sistema	0,35
CRF	Capacidad de respuesta a fallos	0,50
GC	Gestión comunitaria	0,66

RESPUESTA

GF	Gestión y disposición final de componentes	0,00
CCD	Cambio comunitario desarrollo productivo local	0,75
CCO	Cambio en la organización comunitaria	0,75
CCA	Cambio comunitario en la articulación de alianzas	1,00

Valoración

Bajo	Regular	Aceptable	Bueno
[0 - 0,25]	(0,25 - 0, 50]	(0,50 – 0,75]	(0,75 – 1,00]

NRM: No realiza medición

Fuente: Elaboración propia.

La evaluación de indicadores permitió corroborar interrelaciones previamente identificadas en el modelo conceptual del Nexo. Siendo una de las más relevantes el mayor acceso a agua favorecido por sistemas energéticos solares con diferentes beneficios sociales. Si bien, se ha identificado una mayor accesibilidad y alta cobertura a agua segura la cantidad de agua sigue siendo muy limitada y no asegura suplir los usos básicos. La comunidad tiene acceso a otras fuentes no seguras y ha aprendido a priorizar el uso del agua segura para consumo directo, esto ha sido a su vez, de la mano de un trabajo de concientización en el uso adecuado del agua gestionado desde el comité de agua.

El desconocimiento sobre la fuente de agua es un agravante principal de la condición de limitada cantidad de agua pues no se cuenta con información sobre demanda hídrica calculada del acuífero ni de la calidad del agua de la fuente. Esto es especialmente crítico considerando que es la principal y única fuente permanente de agua con la que cuenta la comunidad. Aunque el sistema de agua ofrece oportunidades al generar un mayor acceso a agua pensar en potenciarlo para aumentar la cantidad de agua producida y asegurar una mayor cantidad de agua a los habitantes podría traer compensaciones no deseadas para el sistema subterráneo. Desde el nivel institucional se identifica de igual forma ausencia en planes de gestión, manejo y monitoreo del sistema. Por otro lado, aunque la cantidad de agua segura diaria es baja la comunidad identifica que ha traído impactos positivos especialmente relacionados a la salud.

En relación a la dimensión de energía se comprueba la alta relación a la prestación de servicio para el sistema de agua. Dado el limitado despliegue no se identifican presiones relevantes asociadas al uso del suelo pero si un gran potencial para soportar el desarrollo productivo comunitario poco explorado hasta el momento. Asimismo, la dimensión de alimentación se ve altamente limitada por la condiciones climáticas. La producción agrícola y pecuaria es de pequeña escala y está muy ligada a ser fuente de ingresos de la comunidad. Compensaciones relevantes se asocian al uso del agua salobre para riego pues trae riesgos de salinización y sodificación para el suelo. El proyecto piloto de cultivos verticales aunque en teoría es una buena alternativa pues potencia el reaprovechamiento de agua salobre o de rechazo de la planta a la vez que fortalece la producción alimenticia local no fue acogido por la comunidad y está en desuso. Aunque es una oportunidad identificada desde el Nexo, la no acogida comunitaria permite entrever la necesidad de entender y consensuar el desarrollo de proyectos con las comunidades para asegurar que el desarrollo de los mismo sea efectivo. Asimismo, plantear proyectos de mayor demanda hídrica debe considerar un análisis más riguroso de las capacidades naturales del sistema hídrico. Un indicador relevante para esta dimensión que no fue evaluado en esta ocasión en la inseguridad alimentaria en hogares.

Se identifica que la comunidad conoce bien sobre los aspectos relacionados a la operación básica del sistema y tiene capacidades para operarlo y mantenerlo. La comunidad ha fortalecido sus procesos de gestión comunitaria y en el desarrollo del proyecto se han considerado aspectos de interseccionalidad que permiten la participación de diversos grupos poblacionales y etarios. La comunidad ha sido muy ágil en identificar otras formas de establecer alianzas para fortalecer la operación de sus sistemas y traer nuevas formas de ingresos y esquemas tarifarios. Existen oportunidades de fortalecer la gestión comunitaria aún más, especialmente para continuar fortaleciendo las dimensiones de energía y alimentos ligado al desarrollo de nuevos proyectos productivos. Aun así, persisten vulnerabilidades asociadas a la capacidad de respuesta frente a daños mayores y a la dependencia de recursos públicos para la operación del sistema. Si estos aportes llegaran a disminuir o desaparecer, los costos de funcionamiento podrían volverse insostenibles para la comunidad, comprometiendo la continuidad del servicio.

Cabe destacar, la importancia de vincular el acceso al agua y la energía con actividades productivas que generen beneficios económicos tangibles, fortaleciendo la resiliencia comunitaria. En cuanto a las oportunidades del Nexo se identificó que actualmente la producción agrícola se realiza únicamente durante los periodos de lluvia. La incorporación de bombeo solar para la extracción y potabilización del agua permite no solo mejorar el acceso a agua segura para consumo humano, sino también generar agua de la planta desalinizadora, la cual puede constituir una fuente adicional para apoyar cultivos a pequeña escala. Esta opción, aunque representa una oportunidad para fortalecer la producción local, no ha sido adoptada por la comunidad.

Asimismo, la ampliación del uso de energía solar ofrece potencial para mejorar la cobertura de necesidades básicas, incrementando la disponibilidad de agua segura en los hogares y contribuyendo a estabilizar el suministro. También, podría evaluarse la abundante disponibilidad de energía solar en la región para fortalecer el acceso a electricidad limpia y segura, habilitando actividades productivas que generen ingresos y reduzcan la vulnerabilidad alimentaria. En este sentido, la energía se convierte en un habilitador clave para iniciativas productivas que, a su vez, mejoran la capacidad comunitaria de acceso a alimentos.

Finalmente, es importante destacar que la iniciativa desarrollada ha sido implementada a escala local y financiada por organizaciones internacionales, lo que ha permitido su despliegue en un contexto con capacidades institucionales limitadas. El proyecto se encuentra alineado con las políticas territoriales de acceso al agua y satisfacción de necesidades básicas en la Guajira, y constituye un caso demostrativo que puede ofrecer insumos importantes para el escalamiento de iniciativas similares en otros territorios de características comparables.

7.3.6 Análisis de sostenibilidad del Nexo Agua-Energía-Alimentación

En base a los resultados de los indicadores particulares esta sección presenta un análisis de sostenibilidad del Nexo AEA visto desde dos los enfoques de la sostenibilidad débil y fuerte. El enfoque de sostenibilidad débil establece un nivel de ponderación equitativo entre los componentes ecológico, social y técnico-económico. Esto implica que impactos negativos sobre el componente ecológico pueden ser compensados por mejoras sociales o técnicas. Por otro lado, el enfoque de sostenibilidad fuerte plantea que el sistema biofísico es la base de todo sistema sociotécnico, y que en ese sentido, no puede ser compensado por acciones sociales o técnicas. Desde este enfoque, se establece una ponderación diferenciada entre los tres componentes. Las Ecuación 3 y Ecuación 4 presentan los índices agregados construidos para la evaluación de ambos enfoques.

Ecuación 3. *Índice agregado de sostenibilidad desde enfoque débil (IAS_d)*

$$IAS_d = e\ \sum_{i=1}^{n} \frac{I(e)_i}{n} + s\ \sum_{i=1}^{n} \frac{I(s)_i}{n} + t\ \sum_{i=1}^{n} \frac{I(t)_i}{n}$$

$IAS_d \in [0,1]$ para $e + s + t = 1$ y $e = s = t$

Ecuación 4. *Índice agregado de sostenibilidad desde enfoque fuerte (IAS_f)*

$$IAS_f = e\ \sum_{i=1}^{n} \frac{I(e)_i}{n} (s\ \sum_{i=1}^{n} \frac{I(s)_i}{n} + t\ \sum_{i=1}^{n} \frac{I(t)_i}{n})$$

$IAS_f \in [0,1]$ para $e + s + t = 1$ y $e > s > t$

Sea la sumatoria de:

$\sum_{i=1}^{n} \frac{I(e)_i}{n}$ indicadores de tipo ecológico;

$\sum_{i=1}^{n} \frac{I(s)_i}{n}$ indicadores de tipo social;

$\sum_{i=1}^{n} \frac{I(t)_i}{n}$ indicadores de tipo técnico-económico.

Donde, e = ponderador de indicadores de tipo ecológico;

s = ponderador de indicadores de tipo social;

t = ponderador de indicadores de tipo técnico-económico.

Teniendo en cuenta la propuesta teórica de ponderaciones para el enfoque fuerte ($e > s > t$), se realizó una revisión de la literatura con el objetivo de identificar estudios de caso desarrollados en

contextos comunitarios y rurales, con énfasis en sistemas de agua, que permitieran sustentar empíricamente la asignación de pesos.

Se identificó el trabajo de Pinzón (2017), quien estimó ponderadores mediante el método de Análisis Jerárquico de Procesos a partir de una consulta a expertos para una comunidad ubicada en la zona de ladera de Cali. Este estudio resulta particularmente pertinente para el presente análisis, ya que comparte características clave con el caso de Katanamana, como la gestión comunitaria del recurso hídrico, la dependencia de condiciones biofísicas frágiles y la limitada disponibilidad de información ambiental de base. Los ponderadores obtenidos por Pinzón (2017) fueron adoptados como referencia para este estudio, al reflejar una priorización explícita del componente ecológico, coherente tanto con el enfoque de sostenibilidad fuerte como con los resultados empíricos obtenidos en Katanamana, donde el desconocimiento sobre el estado del acuífero emerge como un factor crítico que condiciona la sostenibilidad global del sistema. La Tabla 43 presenta los resultados obtenido para el índice agregado desde ambos enfoques de sostenibilidad.

Tabla 43. *Resultados de índice agregado de sostenibilidad débil y fuerte del Nexo AEA.*

Enfoque de sostenibilidad	**Parámetros**	**Componentes**			**IAS$_i$**
		Ecológico *(e)*	**Social *(s)***	**Técnico-económico *(t)***	
	Sumatoria de indicadores	2,083	8,409	1,350	
	Sumatoria normalizada	0,298	0,701	0,270	
Débil	Ponderadores	0,33	0,33	0,33	**0,419**
	Valores ponderados	**0,098**	**0,231**	**0,089**	
Fuerte	Ponderadores	0,742	0,162	0,096	**0,031**
	Valores ponderados	**0,221**	**0,114**	**0,026**	

El índice agregado desde el enfoque de la sostenibilidad débil presenta una condición regular (0,419). Si bien el componente mejor calificado corresponde al social, este no compensa los bajos resultados reportados en el componente ecológico y técnico-económico. Estos resultados permiten concluir tres aspectos críticos. Primero, el estado de desconocimiento ecológico es crítico, especialmente en relación con el acuífero que abastece como única fuente el sistema de tratamiento de la comunidad. La ausencia de información sobre la dinámica, recarga y niveles de abatimiento del agua limita los resultados del indicador y por tanto afecta la sostenibilidad.

Segundo, aunque el componente social obtuvo una calificación aceptable, se evidencia debilidad en variables relevantes como lo son la cantidad de agua y la pobreza energética. Pese a mejoras percibidas en salud, organización comunitaria y capacidades de operación aún no se alcanzan coberturas suficientes de necesidades mínimas básicas, como la dotación de agua básica o electricidad en la vivienda. En ese sentido, la interpretación de ese resultado debe considerar que el desempeño social se mantiene sobre condiciones mínimas de acceso, más que sobre una garantía estructural de bienestar.

Tercero, el componente técnico-económico presenta un margen de mejora volcado hacia la vulnerabilidad del sistema ante fallos, la dificultad de acceder a repuestos y la necesidad de soporte especializado. La ausencia de fallas es ante este panorama una vulnerabilidad latente. La mejora del indicador podría construirse desde el fortalecimiento de cadenas de asesoría técnicas más claras con el equipo desarrollador, en especial para problemas especializados que la comunidad no puede

resolver. El análisis desde el enfoque débil ya permite ver el riesgo para la sostenibilidad del sistema asociado al desconocimiento del sistema biofísico y técnico-económico, aun cuando existen avances sociales relevantes que permiten sostener la operación en el corto y mediano plazo.

Por otro lado, el enfoque fuerte obtuvo un resultado bajo (0,031) pues se ve amplificada la condición de desconocimiento crítico del componente ecológico. Aunque el agua es reconocida como un recurso central para la vida, esto no se ha visto reflejado en acciones para la protección de la fuente en el largo plazo. Desde el enfoque de sostenibilidad fuerte, la imposibilidad de establecer como el uso actual de la fuente está afectando los niveles de agua subterránea del acuífero permite reconocer con claridad el riesgo estructural para el sistema sociotécnico. Asimismo, mejoras en los componentes social o técnico tienen un efecto marginal sobre el resultado global si no se acompañan de avances sustantivos en el componente ecológico. Es decir, cualquier estrategia orientada a la sostenibilidad del sistema debe priorizar la generación de información, monitoreo y gestión del recurso hídrico de agua subterránea. Aunque este enfoque de sostenibilidad es considerablemente más restrictivo, permite identificar riesgos estructurales que no son evidentes en un esquema compensatorio.

8. Conclusiones

Los resultados de este trabajo de investigación permiten concluir que:

- El enfoque del Nexo permite mantener una visión simultánea sobre tres dimensiones que son fundamentales para la vida humana. De manera transversal, el estudio evidencia que los proyectos de desarrollo no solo deben orientarse a la generación de sinergias entre las dimensiones del agua, la energía y la alimentación, sino también a la identificación explicita de potenciales compensaciones entre estas dimensiones, que puedan comprometer la sostenibilidad en el corto, mediano o largo plazo.
- Este estudio destaca la importancia de explorar las dimensiones AEA desde el contexto rural y comunitario. Construye puentes entre el enfoque teórico del Nexo AEA donde prevalece la evaluación de la interacción técnica entre las dimensiones AEA, y otros enfoques de desarrollo local y comunitario donde el componente ecosistémico y social son mucho más relevantes que en estudios tradicionales del Nexo.
- La construcción de una línea base de información es un componente crítico en contextos rurales, donde los datos disponibles suelen limitarse a escalas municipales o departamentales, que aunque contextualizan el territorio se quedan cortos en reflejar las condiciones y necesidades locales. La organización de esta información en un mapa conceptual permitió establecer, de manera preliminar, posibles sinergias y compensaciones entre las dimensiones AEA, las cuales fueron evaluadas posteriormente mediante métodos cuantitativos, como en este caso, el sistema de indicadores particulares.
- Pensando en las tres dimensiones del Nexo en la comunidad de Katanamana, se pudo establecer como interacción principal las dadas en *energía para agua*. Cabe destacar que se identifican dos dimensiones adicionales características de este nexo, la *ecosistémica* y la *social*. La dimensión *ecosistémica* delimita en gran parte y como fuente única la interacción con las otras tres dimensiones. Es decir, *ecosistema para agua* fundamental al pensar en la disponibilidad hídrica, *ecosistema para energía* como fuente habilitadora de alimentación eléctrica del sistema de agua y *ecosistema para alimentos* como factor limitante para las actividades de agricultura tradicional. Por otro lado, se encuentra la dimensión *social*, pues es la comunidad desde donde se gestionan

estas interacciones y quienes se benefician de los resultados en el cubrimiento de necesidades básicas.

- La dimensión del agua es el corazón del Nexo en Katanamana. Las condiciones de bajo acceso a agua segura han sido críticas en la comunidad de Katanamana y condicionan en gran parte el desarrollo de la vida local. Las soluciones tecnológicas implementadas han permitido avances parciales en el acceso a agua segura en los hogares (100 litros/semana/familia). La comunidad ha adoptado el consumo de agua segura priorizando actividades como beber y cocinar. Esto ha traído mejoras en la percepción de bienestar y salud. No obstante, la dotación diaria per cápita (2,5 litros/persona/día) aún no alcanza el umbral de dotación básica sugerida por organismos internacionales (20 litros/persona/día), la pobreza energética es alta y no existen vías complementarias que permitan el fomento de la agricultura tradicional para fortalecer la seguridad alimentaria. Es decir, el bienestar social observado responde a una mejora en el acceso mínimas de acceso a servicios básicos, más que a una transformación estructural de las condiciones de vida.
- Los indicadores particulares aplicados permitieron una evaluación integrada del Nexo AEA, al identificar de manera articula las presiones, condiciones actuales, impactos y respuestas del sistema. De manera transversal a las dimensiones del Nexo, estos indicadores incorporaron aspectos de apropiación social del conocimiento y fortalecimiento de capacidades locales, reconociendo que la sostenibilidad depende tanto del entorno biofísico como de la fortaleza comunitaria y de la existencia de un sistema tecnológico que sea adapte a las condiciones y las capacidades locales, y no al contrario.
- La evaluación con indicadores particulares permite tener una idea clara y rápida sobre el estado de un sistema sociotécnico y biofísico. No obstante, los resultados no deben ser interpretados como conclusiones definitivas sobre el sistema, pues la caracterización de variables de alta relevancia puede verse afectada por vacíos de información o por la ausencia total de datos. Estas limitaciones prácticas condicionan la evaluación de variables críticas, como ocurrió en este caso con la disponibilidad hídrica del acuífero, que, a pesar de su importancia, fue calificado con un valor nulo al no contar con información suficiente. La identificación de la ausencia de información constituye en sí mismo un resultado relevante y, por tanto debe ser considerado de forma explícita dentro de la evaluación, en este caso como una penalización. En este sentido, la evaluación mediante indicadores puede verse como una herramienta orientativa que permite identificar prioridades y focos de intervención, más que como una representación definitiva de la realidad. Lo anterior resalta la necesidad de complementar los enfoques cuantitativos con trabajo de campo y metodologías participativas, que permiten incorporar información cualitativa y contextual proveniente de la comunidad. Este técnicas complementarias permiten una comprensión más ajustada de las condiciones ambientales, sociales y técnicas, especialmente valiosa en contextos donde la información formal es limitada o inexistente.
- La combinación del enfoque del Nexo Agua–Energía–Alimentación con esquemas de sostenibilidad débil y fuerte constituye un aporte metodológico relevante, ya que permite contrastar resultados bajo lógicas compensatorias y no compensatorias. Mientras el enfoque débil tiende a resaltar las mejoras sociales, el enfoque fuerte permite identificar los riesgos estructurales que no resultan evidentes en esquemas compensatorios. En este caso, se identificó la dimensión ecológica como una gran condicionante de la sostenibilidad del sistema en el corto, mediana y largo plazo. Se pudo notar que, aunque el sistema sea socialmente funcional, opera sin garantizar la conservación de la base ecológica y es técnicamente frágil. Mientras no se supere

el umbral de desconocimiento de la fuente, las mejoras sociales y técnicas no se traducen en un aumento significativo de la sostenibilidad general del Nexo.

9. Recomendaciones

- En comunidades como Katanamana, donde las condiciones biofísicas son altamente limitantes, es fundamental que el desarrollo de soluciones tecnológicas incorpore desde su diseño un análisis explícito de la dimensión ecosistémica y social. La ausencia de información ecológica crítica limita la sostenibilidad de las mejoras sociales y técnicas, tal como lo evidencia el análisis desde el enfoque de sostenibilidad fuerte. En ese sentido, integrar estas dimensiones permite reconocer la vulnerabilidad del sistema ecológico y, al mismo tiempo, ajustar las soluciones a las necesidades, capacidades y dinámicas reales de la comunidad, evitando enfoques exclusivamente técnicos.
- Se recomienda implementar un sistema básico y continuo de monitoreo del acuífero, que incluya el registro sistemático de volúmenes de extracción, niveles estáticos y dinámicos del pozo, con el fin de estimar la presión real sobre el recurso hídrico y fortalecer su gestión sostenible. Es prioritario actualizar el monitoreo fisicoquímico del agua subterránea, inexistente desde hace más de una década, e incluir parámetros críticos para la salud humana, como arsénico, plomo, cadmio y cromo VI. Asimismo, es importante realizar un análisis de la calidad de agua tratada por el sistema de desalinización solar ya que actualmente no existe una caracterización.
- Es pertinente continuar evaluando alternativas para la disposición y el aprovechamiento del agua de rechazo, incluyendo el cultivo de especies alimentarias tolerantes a la salinidad o sistemas de piscicultura adaptados. Asimismo, se sugiere analizar la valorización del residuo mediante la recuperación parcial de sales en estanques controlados, con potencial uso en actividades económicas locales o de pequeña escala industrial.
- En futuras evaluaciones se recomienda incorporar instrumentos de recolección de información a nivel de hogar, que permitan analizar con mayor precisión la equidad territorial en el acceso a los servicios y recursos asociados al Nexo, así como identificar diferencias intracomunitarias que no son visibles a escalas agregadas.

10. Referencias

Albrecht, T. R., Crootof, A., & Scott, C. A. (2018). The Water-Energy-Food Nexus: A systematic review of methods for nexus assessment. *Environmental Research Letters*, *13*(4), 043002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c6

Alcaldía de Uribia. (2020). *Plan de Desarrollo Municipal: 2020-2023*.

Alcaldía de Uribia. (2024). *Plan de Desarrollo de Municipal: Uribia 2024-2027*. Alcaldía de Uribia.

Al-Saidi, M., & Elagib, N. A. (2017). Towards understanding the integrative approach of the water, energy and food nexus. *Science of The Total Environment*, *574*, 1131-1139. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.046

Avellán, T., Roidt, M., Emmer, A., von Koerber, J., Schneider, P., & Raber, W. (2017). Making the Water-Soil-Waste Nexus work: Framing the boundaries of resource flows. *Sustainability (Switzerland)*, *9*(10). Scopus. https://doi.org/10.3390/su9101881

Banco Mundial. (2020). *Colombia: Cambiando de rumbo. Seguridad hídrica para la recuperación y el crecimiento sostenible.* World Bank, Washington, DC. http://hdl.handle.net/10986/34452

Banco Mundial. (2024). *Global Economic Prospects, January 2024*. World Bank. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-2058-8

Bazilian, M., Rogner, H., Howells, M., Hermann, S., Arent, D., Gielen, D., Steduto, P., Mueller, A., Komor, P., Tol, R. S. J., & Yumkella, K. K. (2011). Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*, *39*(12), 7896-7906. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.039

Bellfield H. (2015). *Water, Energy and Food Security in Latin America and the Caribbean.* Global Canopy Program.

Biggs, E. M., Bruce, E., Boruff, B., Duncan, J. M. A., Horsley, J., Pauli, N., McNeill, K., Neef, A., Van Ogtrop, F., Curnow, J., Haworth, B., Duce, S., & Imanari, Y. (2015). Sustainable development and the water–energy–food nexus: A perspective on livelihoods. *Environmental Science & Policy*, *54*, 389-397. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.002

Bonet Morón, J. A., & Hahn de Castro, L. W. (2017). *La mortalidad y desnutrición infantil en La Guajira*. Banco de la República. https://doi.org/10.32468/dtseru.255

Boreal Light GmbH. (2022). *Especificaciones del sistema Winture para Katanamana, La Guajira*.

Boreal Light GmbH. (2024). *Vista aérea de la planta de tratamiento de la comunidad de Katanamana* [Dataset]. https://www.boreallight.com/projects/template-nxs8d

Bringel, B., & Varella, R. V. S. (2016). A pesquisa militante na América Latina hoje: Reflexões sobre as desigualdades e as possibilidades de produção de conhecimentos. *Revista Digital de Direito Administrativo*, *3*(3), 474-489. https://doi.org/10.11606/issn.2319-0558.v3i3p474-489

Caiado Couto, L., Campos, L. C., da Fonseca-Zang, W., Zang, J., & Bleischwitz, R. (2021). Water, waste, energy and food nexus in Brazil: Identifying a resource interlinkage research agenda through a systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *138*, 110554. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110554

Cámara de Comercio La Guajira. (2018). *Informe socioeconómico de La Guajira: Estudio sobre el desempeño económico territorial 2017.* Cámara de Comercio La Guajira.

Cámara de Comercio La Guajira. (2024). *Informe socioeconómico La Guajira 2024*.

Cansino-Loeza, B., Sánchez-Zarco, X. G., Mora-Jacobo, E. G., Saggiante-Mauro, F. E., González-Bravo, R., Mahlknecht, J., & Ponce-Ortega, J. M. (2020). Systematic Approach for Assessing the Water–Energy–Food Nexus for Sustainable Development in Regions with

Resource Scarcities. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *8*(36), 13734-13748. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c04333

Cederlöf, G. (2021). Out of steam: Energy, materiality, and political ecology. *Progress in Human Geography*, *45*(1), 70-87. https://doi.org/10.1177/0309132519884622

CIAT & Banco Mundial. (1999). *Conceptual Framework to Develop and Use Water Indicators*. https://www.researchgate.net/profile/Andrew-Farrow-3/publication/265181775_Conceptual_Framework_to_Develop_and_Use_Water_Indicators/links/5540a19e0cf2736761c280d2/Conceptual-Framework-to-Develop-and-Use-Water-Indicators.pdf

CINARA. (2014). *Evaluación técnica de alternativas: Levantamiento de línea base, sistematización de experiencia de apropiación y evaluación del proyecto «Ideas para el Cambio»*. BID.

Corte Constitucional de Colombia. (2017). *Sentencia T 302*.

Custodio, E., & Llamas, R. (1999). *Hidrología subterránea* (Segunda). Omega.

DANE. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2018*.

DANE. (2024). *Inseguridad alimentaria a partir de la escala FIES - 2024*.

DANE. (2025). *Geovisor* [Map]. Geoportal.

Dar, W. D., & Twomlow, S. J. (2007). Managing agricultural intensification: The role of international research. *Crop Protection, Weed Science in Time of Transition*, *26*(3), 399-407. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.04.029

Dargin, J., Daher, B., & Mohtar, R. H. (2019). Complexity versus simplicity in water energy food nexus (WEF) assessment tools. *Science of The Total Environment*, *650*, 1566-1575. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.080

DNP. (2018). *TerriData*. Departamento Nacional de Planeación. https://terridata.dnp.gov.co/

Embid A. & Martín L. (2017). *The Nexus between Water, Energy and Food in Latin America and the Caribbean*. Nexus Regional Dialogue Programme (NRD), Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Endo, A., Burnett, K., Orencio, P., Kumazawa, T., Wada, C., Ishii, A., Tsurita, I., & Taniguchi, M. (2015). Methods of the Water-Energy-Food Nexus. *Water*, *7*(10), 5806-5830. https://doi.org/10.3390/w7105806

FAO. (2014). *Walking the nexus talk: Assessing the water-energy-food nexus in the context of the sustainable energy for all initiative*. Climate, Energy and Tenure Division (NRC), Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO (Ed.). (2019). *Trees, forests and land use in drylands: The first global assessment, full report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2023). *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2023*. FAO. https://doi.org/10.4060/cc8166en

Federico Pinzón. (2017). *Análisis de la sustentabilidad de escenarios futuros de abastecimiento de agua potable en la ciudad de Santiago de Cali. Caso de estudio sector hidráulico Reforma – Nápoles.* Universidad del Valle.

Fleischmann, J., Birkel, C., Blechinger, P., Ribbe, L., Nauditt, A., Corigliano, S., & Platzer, W. (2024). Guiding the data collection for integrated Water-Energy-Food-Environment systems using a pilot smallholder farm in Costa Rica. *Energy Nexus*, *13*. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100259

Foran, T. (2015). *Node and Regime: Interdisciplinary Analysis of Water-Energy-Food Nexus in the Mekong Region*. *8*(1).

Francois, D. E. (2022). *Future Perspectives on the Energy-Poverty Nexus in the Rural Areas of Ceará, Brazil*.

Global Forest Watch. (2024). *Pérdida del bosque primario en Uribía, La Guajira, Colombia* [Map].
González, N. (2017). Desafíos de la gobernanza ambiental: Una aproximación a las implicaciones de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico en Colombia. *Ciencia Política*, *12*(23). https://doi.org/10.15446/cp.v12n23.62595
Goodland, R. (1995). The Concept of Environmental Sustainability. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *26*, 1-24.
Google Earth. (2025). *Vista satelital de la comunidad de Katanamana, Uribia, La Guajira* [Map].
Granit, I. (2022). Microgrids through the Energy-Water-Food Security Nexus in La Guajira, Colombia: Increasing water and food security or jeopardizing groundwater levels? *Energy Research and Social Science*, *93*. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102814
Hejnowicz, A. P., Thorn, J. P. R., Giraudo, M. E., Sallach, J. B., Hartley, S. E., Grugel, J., Pueppke, S. G., & Emberson, L. (2022). Appraising the Water-Energy-Food Nexus From a Sustainable Development Perspective: A Maturing Paradigm? *Earth's Future*, *10*(12), e2021EF002622. https://doi.org/10.1029/2021EF002622
Hoff, H. (2011). *The Water. Energy and Food Security Nexus. Solutions for the Green Economy*. Stockholm Environment Institute.
Hornborg, A. (2019). Colonialism in the Anthropocene: The political ecology of the money-energy-technology complex. *Journal of Human Rights and the Environment*, *10*(1), 7-21. https://doi.org/10.4337/jhre.2019.01.01
Hurtado, A. R., Mesa-Pérez, E., & Berbel, J. (2024). Systems Modeling of the Water-Energy-Food-Ecosystems Nexus: Insights from a Region Facing Structural Water Scarcity in Southern Spain. *Environmental Management*, *74*(6), 1045-1062. Scopus. https://doi.org/10.1007/s00267-024-02037-6
IDEAM. (2022). *Estudio Nacional del Agua 2022*.
IEA. (2025). *World Energy Outlook 2025*. International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025
IGAC. (2024). *Geoportal: Suelos del Territorio Colombiano* [Map].
INS. (2024). *Boletín de vigilancia de la calidad del agua. Diciembre 2024*.
INS, Gardeazábal, P., Rodriguez, L., Prasca, T. G., & Carreño Buitrago, L. A. (2024). *Informe Nacional del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua Potable – IRCA urbano y rural por municipio 2020-2023*.
Kling, C. L., Arritt, R. W., Calhoun, G., & Keiser, D. A. (2017). Integrated Assessment Models of the Food, Energy, and Water Nexus: A Review and an Outline of Research Needs. *Annual Review of Resource Economics*, *9*(Volume 9, 2017), 143-163. https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100516-033533
Kumar, A., & Prakash, O. (Eds.). (2019). *Solar Desalination Technology*. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6887-5
Kurian, M., Scott, C., Reddy, V. R., Alabaster, G., Nardocci, A., Portney, K., Boer, R., & Hannibal, B. (2019). One Swallow Does Not Make a Summer: Siloes, Trade-Offs and Synergies in the Water-Energy-Food Nexus. *Frontiers in Environmental Science*, *7*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00032
Leck, H., Conway, D., Bradshaw, M., & Rees, J. (2015). Tracing the Water–Energy–Food Nexus: Description, Theory and Practice. *Geography Compass*, *9*(8), 445-460. https://doi.org/10.1111/gec3.12222
Li, W., Ward, P. J., & Van Wesenbeeck, L. (2025). A critical review of quantifying water-energy-food nexus interactions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *211*, 115280. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115280

Liu, J., Mao, G., Hoekstra, A. Y., Wang, H., Wang, J., Zheng, C., Van Vliet, M. T. H., Wu, M., Ruddell, B., & Yan, J. (2018). Managing the energy-water-food nexus for sustainable development. *Applied Energy*, *210*, 377-381. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.064

Mahlknecht, J., González-Bravo, R., & Loge, F. J. (2020). Water-energy-food security: A Nexus perspective of the current situation in Latin America and the Caribbean. *Energy*, *194*, 116824. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116824

Márquez-Bedoya, A., Carvajal-Quintero, S. X., López-García, D., Márquez-Bedoya, A., Carvajal-Quintero, S. X., & López-García, D. (2025). Energía sostenible en zonas aisladas de América Latina: Revisión de la integración del enfoque WEF Nexus para impulsar el desarrollo rural. *Información tecnológica*, *36*(1), 1-14. https://doi.org/10.4067/s0718-07642025000100001

MinAmbiente. (2007). *Resolución 2115 de 2007, por la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.* Ministerios de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

MinAmbiente. (2010). *Política nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*.

MinAmbiente. (2012). *Política Nacional de Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE)*.

MinMinas. (2024). *Informe sobre pobreza energética multidimensional en Colombia 2022-2023*. Ministerio de Minas y Energía de Colombia.

MinVivienda. (2018). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico – RAS*.

MinVivienda. (2023). *Informe de Rendición de Cuentas 2023*.

Moreira, F. A., Dalla Fontana, M., Sepe, P. M., Lopes, M. V., Moura, L. V., Medeiros, L. S., de Kraker, J., Malheiros, T. F., & Di Giulio, G. M. (2022). Co-creating sustainability indicators for the local water–energy–food nexus. *Sustainability Science*, *17*(6), 2315-2329. Scopus. https://doi.org/10.1007/s11625-022-01141-y

Muller, M. (2015). The'nexus' as a step back towards a more coherent water resource management paradigm. *Water Alternatives*, *8*(1), 675-694.

Muthu, S. (2021). *The Water–Energy–Food Nexus: Concept and Assessments* (Muthu, S.). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0239-9

Nhamo, L., Ndlela, B., Mpandeli, S., & Mabhaudhi, T. (2020). The water-energy-food nexus as an adaptation strategy for achieving sustainable livelihoods at a local level. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(20), 1-16. Scopus. https://doi.org/10.3390/su12208582

Ojeda-Matos, G., & Jones-Crank, J. L. (2025). The potential of the water-energy-food nexus approach in advancing the sustainable development goals: A PRISMA-based systematic review. *Environmental Science & Policy*, *163*, 103961. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103961

OMS. (2024). Guidelines for drinking-water quality: Small water supplies. *World Health Organization*.

ONU. (2025). *The Sustainable Development Goals Report 2025*. United Nations.

Pahl-Wostl, C., Conca, K., Kramer, A., Maestu, J., & Schmidt, F. (2013). Missing Links in Global Water Governance: A Processes-Oriented Analysis. *Ecology and Society*, *18*(2), art33. https://doi.org/10.5751/ES-05554-180233

Pérez, M. A., & Rojas Padilla, J. H. (2008). *Desarrollo sostenible: Principios, aplicaciones y lineamientos de políticas para Colombia.* Universidad del Valle.

Restrepo, J. D., Bottaro, G., Barci, L., Beltrán, L. M., Londoño-Behaine, M., & Masiero, M. (2024). Assessing the Impacts of Nature-Based Solutions on Ecosystem Services: A Water-Energy-

Food-Ecosystems Nexus Approach in the Nima River Sub-Basin (Colombia). *Forests*, *15*(11), 1852. https://doi.org/10.3390/f15111852

Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., … Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, *9*(37), eadh2458. https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., … Foley, J. (2009). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, *14*(2). https://www.jstor.org/stable/26268316

Rojas Padilla, J. H., Perez Rincón, M. A., Malheiros, T. F., Madera Parra, C. A., Prota, M. G., & Santos, R. D. (2013). Análisis comparativo de modelos e instrumentos de gestión integrada del recurso hídrico en Suramérica: Los casos de Brasil y Colombia. *Revista Ambiente & Água*, *8*, 73-97. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.971

Schlör, H., Hake, J.-F., & Venghaus, S. (2018). An Integrated Assessment Model for the German Food-Energy-Water Nexus. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, *6*(1), 1-12. https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d5.0182

SGC. (2014). *Modelo Hidrogeológico La Guajira*.

Shrestha, S., Adhikari, S., Babel, M. S., Perret, S. R., & Dhakal, S. (2015). Evaluation of groundwater-based irrigation systems using a water–energy–food nexus approach: A case study from Southeast Nepal. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, *3*(2), 53-66. https://doi.org/10.1080/23249676.2014.1001881

Silva-Afonso, A., & Pimentel-Rodrigues, C. (2024). Water–Energy–Nutrients Nexus of Urban Environments. *Water (Switzerland)*, *16*(6). Scopus. https://doi.org/10.3390/w16060904

Simpson, G. B., & Jewitt, G. P. W. (2019). The Development of the Water-Energy-Food Nexus as a Framework for Achieving Resource Security: A Review. *Frontiers in Environmental Science*, *7*, 8. https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00008

Simpson, G. B., Jewitt, G. P. W., Mabhaudhi, T., Taguta, C., & Badenhorst, J. (2023). An African perspective on the Water-Energy-Food nexus. *Scientific Reports*, *13*(1), 16842. https://doi.org/10.1038/s41598-023-43606-9

Srigiri, S. R., & Dombrowsky, I. (2021). Governance of the water-energy-food nexus for an integrated implementation of the 2030 Agenda. *Discussion Paper*. https://doi.org/10.23661/DP2.2021

Sušnik, J., & Staddon, C. (2022). Evaluation of Water-Energy-Food (WEF) Nexus Research: Perspectives, Challenges, and Directions for Future Research. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, *58*(6), 1189-1198. https://doi.org/10.1111/1752-1688.12977

UPME. (2025). *Boletín técnico: Cálculo de Índice de Cobertura de Energía Eléctrica ICEE 2023*.

Velázquez, E., Madrid, C., & Beltrán, M. J. (2011). Rethinking the Concepts of Virtual Water and Water Footprint in Relation to the Production–Consumption Binomial and the Water–Energy Nexus. *Water Resources Management*, *25*(2), 743-761. https://doi.org/10.1007/s11269-010-9724-7

Villamayor-Tomas, S., Grundmann, P., Epstein, G., Evans, T., & Kimmich, C. (2015). *The Water-Energy-Food Security Nexus through the Lenses of the Value Chain and the Institutional Analysis and Development Frameworks*. *8*(1).

Villarroel Walker, R., Beck, M. B., & Hall, J. W. (2012). Water—And nutrient and energy—Systems in urbanizing watersheds. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, *6*(5), 596-611. https://doi.org/10.1007/s11783-012-0445-4

Wichelns, D. (2017). The water-energy-food nexus: Is the increasing attention warranted, from either a research or policy perspective? *Environmental Science & Policy*, *69*, 113-123. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.12.018

Wolfe, M. L., Ting, K. C., Scott, N., Sharpley, A., Jones, J. W., & Verma, L. (2016). Engineering solutions for food-energy-water systems: It is more than engineering. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, *6*(1), 172-182. https://doi.org/10.1007/s13412-016-0363-z

Yan, X., Fang, L., & Mu, L. (2020). How does the water-energy-food nexus work in developing countries? An empirical study of China. *Science of The Total Environment*, *716*, 134791. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134791

Yuan, M.-H., & Lo, S.-L. (2022). Principles of food-energy-water nexus governance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *155*, 111937. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111937

ZOA. (2023). *Project proposal: Solar powered water desalinization III in La Guajira, Colombia*.

ZOA. (2025). *Final report: Solar powered water desalinization III in La Guajira, Colombia*.

11. Anexos

Anexo 1. Cronograma de visita técnica a la comunidad de Katanamana, La Guajira

Fecha: 13.09.2025 – 14.09.2025 Salida: 5:30 am desde Riohacha

Día 1	**13.09.2025**		
Horarios	**Actividad**	**Encargados/Participantes**	**Materiales**
9:00	*Llegada a Katanamana*		
9:00 – 10:00	Entrevista líder comunitario	Líder y director de la escuela: Leonardo González Recorrido por la comunidad	Formato de entrevista
10:00 – 12:00	Visita técnica planta y entrevista operario	Operario Técnico de ZOA	Desplazamiento hasta PTAP Equipo de medición de parámetros fisicoquímicos
12:00 – 13:30	*Almuerzo*		
14:00 – 17:30	Taller comunitario	Comité de agua y miembros de la comunidad (10 personas)	-Actividades taller comunitario - Refrigerio
19:00	*Cena*		
Día 2	**14.09.2025**		
Horarios	**Actividad**	**Encargados/Participantes**	**Materiales**
8:00 – 9:30	Visita hasta el pozo de captación	Operario y técnico de ZOA	Notas
9:30 – 10:30	*Desayuno*		
10:30 – 13:30	Entrevistas y recorrido por la escuela	Entrevistas Recorrido por la comunidad orientado por mapa social Acompaña: Profesoras	Formato de entrevistas Notas
13:30 – 14:30	*Almuerzo*		
15:00 – 18:30	*Regreso a Riohacha*		

Anexo 2. Formato de entrevista con líder comunitario y habitantes de la comunidad

- *Consentimiento informado de uso de datos*

FORMATO DE ENTREVISTA		
Nombre del entrevistado		**Fecha:**
Rol o cargo en la comunidad	Líder comité de agua	**Lugar:**
Nombre del entrevistador		

Objetivo de la investigación: Evaluar el funcionamiento y la sostenibilidad del Nexo agua-energía-alimentación en la comunidad de Katanamana.

Objetivo de la actividad:

- Comprender las dinámicas sociales, tecnológicas, económicas y ambientales asociadas al agua, la energía y la alimentación.
- Ganar un mayor entendimiento sobre el territorio.
- Recopilar información sobre los procesos de implementación del proyecto tecnológico.

A. CONTEXTO GENERAL

1. ¿Cómo describiría usted la vida en su comunidad? ¿Cuántas personas viven en la zona? ¿Son varias comunidades? ¿Cuántas personas viven en la zona?
2. ¿Qué labores realiza la gente durante el día (activades económicas u otras labores)? ¿Existen actividades industriales en la zona? Ej.: exploración de hidrocarburos, ganadería o agricultura intensiva.
3. ¿Cómo es el acceso a salud? ¿Educación?
4. ¿Cómo se da manejo a los residuos sólidos?
5. ¿Cómo es el acceso a saneamiento en la zona? (ej.: letrinas)
6. ¿Qué cambios importantes ha vivido la comunidad en los últimos años?

B. ACCESO AEA

¿Cómo accede actualmente la comunidad al AEA? ¿Este acceso es suficiente, seguro y constante?
¿Cómo ha sido el acceso al agua, la energía y la alimentación históricamente en la comunidad? ¿Pagan por servicios de agua o energía?

- AGUA:

7. ¿Cómo es el acceso a agua en la comunidad?
8. Desde hace más de un año (~feb 2024), la comunidad cuenta con una planta de tratamiento de agua. ¿Cómo ha sido este proceso?
9. ¿Desde cuándo cuenta la comunidad con un pozo? ¿Quiénes gestionaron este proyecto? ¿Mantienen algún tipo de contacto con el equipo perforador del pozo?
10. ¿Considera que la comunidad tiene ahora mayor acceso a agua desde la implementación de la planta?
11. ¿Cómo se dispone usualmente del agua residual?
12. ¿Cómo ha cambiado el uso de otras fuentes tras la implementación de la planta (mayor, menor, igual)?
13. Se estima que con la planta la comunidad tenga acceso a mayor cantidad de agua segura, ¿ha sido esto así? ¿Qué consecuencias han derivado desde la implementación de la planta?
14. ¿Cuáles son los principales obstáculos para que las familias accedan a agua?

- ALIMENTOS

15. ¿Cómo es el acceso de alimentos en la comunidad? ¿Kits de alimentación – salida ZOA?
16. ¿De dónde provienen principalmente los alimentos consumidos por las familias? ¿Se producen localmente o se traen desde afuera?
17. Considera que, el proyecto ha fortalecido al acceso a alimentos en la comunidad? (ej.: mayor acceso al agua ha fortalecido procesos de agricultura y pecuarios)
18. ¿Tiene la comunidad una vocación agrícola? ¿Qué productos son usualmente cultivados? ¿En dónde y en que magnitud (ha)? ej.: patio de la casa.
19. ¿Cómo se cultiva? (rotación de cultivos, tipo de riego, uso de fertilizantes, tipo de labranza)
20. ¿Existen temporadas de escasez o abundancia de alimentos? ¿Cómo se manejan esas situaciones? ¿Existen programas comunitarios o familiares (huertas, asociaciones, trueque, comedores) para mejorar el acceso a alimentos?
21. ¿Cuáles son los principales obstáculos para que las familias accedan a una buena alimentación?

- ENERGÍA

22. ¿Cómo es el acceso a energía en la comunidad (electricidad, gas, solar)?
23. ¿Qué fuentes se utilizan para cocinar e iluminar en casa? Ej.: gas, leña, diésel, baterías.

24. ¿Qué impactos percibe la comunidad asociado al acceso limitado a energía en sus vidas diarias? Ej.: producir, conservar alimentos o desarrollar actividades económicas. 25. ¿Cuáles son los principales obstáculos para que las familias accedan a estos servicios (energía, alimentación, agua)?
C. EQUIDAD Y PARTICIPACIÓN
Participación de la comunidad en los proyectos que se desarrollan e implementan 26. ¿Cómo se organiza la comunidad para tomar decisiones en la comunidad y qué grupos suelen participar más o menos en ese proceso? 27. Para la gestión de temas asociados al agua se contó con la creación de un comité de agua ¿Cómo fue la conformación del comité?¿Todavía se encuentra en funcionando el comité (obj: 1 vez/semana)? ¿Cómo es la dinámica del comité? ¿Qué tipo de actividades realiza? ¿Quiénes hacen parte del mismo? 28. ¿El comité de agua u otros posibles comités lideren temas asociados alimentos o energía? 29. ¿Qué grupos de la comunidad enfrentan más dificultades para acceder a los recursos básicos? Ej.: mujeres, niños, personas mayores. 30. En su experiencia, ¿cómo ha cambiado el bienestar de las familias de la comunidad en los últimos años? ¿En qué aspectos ha mejorado y en cuáles ha habido dificultades?
D. PROYECTOS
Desarrollo del proyecto 31. ¿Cómo fue el proceso de diseño, desarrollo y puesta en marcha del proyecto de agua? ¿Quiénes participaron? 32. ¿De qué manera estuvo involucrada la comunidad en el diseño y en la puesta en marcha del proyecto? 33. ¿Se han desarrollado otros proyectos o intervenciones importantes recientemente en la comunidad? 34. ¿Derivado de este(os) proyecto(s) han surgido otros nuevos proyectos, negocios, iniciativas, actividades? (ej.: proyecto de siembra de árboles, letrinas secas, construcción de turbina eólica) 35. ¿Cuáles son los impactos que asocia al proyecto? ej.: mayor empleo, menores gastos para familias en agua, disminución del éxodo rural – más personas permanecen en el territorio. 36. En su opinión, ¿qué tan útiles y pertinentes han sido los proyectos para la comunidad? 37. ¿Qué beneficios y dificultades destacaría relacionados a su implementación? 38. ¿Qué podría mejorarse en futuros proyectos o programas?
E. SOSTENIBILIDAD
39. ¿Considera que los esquemas de recuperación de costos son viables para mantener la planta? (cobro a escuela por agua, venta de agua por domicilio, empaque de agua) 40. ¿Cuáles son los logros más importantes de la comunidad y cuáles son los desafíos que persisten? 41. Si tuviera que priorizar desafíos/mejoras, ¿qué sería más urgente para la comunidad? Ej.: asegurar más agua, mejorar el acceso a alimentos o fortalecer la energía ¿Por qué? 42. ¿Considera que los recursos naturales (agua, suelo, alimentos) se están usando de forma adecuada/sostenible? ¿Se han presentado inconvenientes asociados al uso del agua o del suelo? 43. ¿Qué considera que necesita la comunidad para estar mejor preparada frente a los retos del futuro?
F. CIERRE
Muchas gracias por brindarme su tiempo y compartir su experiencia. Todo lo que me ha contado es muy valioso para comprender mejor la situación de la comunidad y ayudará a orientar las acciones del proyecto. Antes de terminar, *¿hay algo más que le gustaría agregar o algún aspecto importante que no hayamos tratado?* Le reitero que su participación es muy importante y la información que nos ha compartido será tratada con respeto y confidencialidad. Nuevamente, le agradezco mucho su colaboración.

Anexo 3. Formato de visita técnica y entrevista con el operario

- *Consentimiento informado de uso de datos*

VISITA TÉCNICA		
Nombre del responsable		**Fecha:**
Rol o cargo		**Lugar:**
Nombre del entrevistador		**Hora:**
Objetivo de la investigación: Evaluar el funcionamiento y la sostenibilidad del Nexo agua-energía-alimentación en la comunidad de Katanamana en el largo plazo. El propósito es aprender (ejercicio académico), identificar fortalezas y posibles mejoras junto con la comunidad.		

Objetivo de la actividad:

- Conocer el funcionamiento de la planta y revisar algunos aspectos técnicos de la operación
- Conocer sobre las tareas de mantenimiento y operación.

A. DATOS GENERALES	
No. de beneficiarios	Aprox. 71 familias (480 hab) + 362 est.
Caudal instalado (teórico)	1000 L/h
Caudal real de operación (cruda/tratada)	
Cantidad de agua producida diaria	8000 L/d
Tiempo de operación PTAP	8-10 h/día x 7 día/sem
Nombre de fuente de agua	
Válvulas de control de presión	[Si] / [No]
Precio de venta	500 COP por 20L para otras comunidades
Costos estimados de Operación	$280.000/mes - $1.800.000/año (membrana]
Costos de operario	580 USD/mes
Producción estimada de agua en tiempo de operación	

B. FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA

- Recorrido por la planta: cómo es el funcionamiento actual y quiénes son los responsables de O&M.
- Identificar los componentes del sistema (bombas, membrana, paneles, filtros, tubería): vida útil (años), requerimientos de mantenimiento, ***fallos*** [Tabla 2]
- Identificar insumos requeridos para la operación

- ***Subsistema de captación de agua***

  Caracterización del agua cruda previo a instalación: [Si] [No]
  Quién? Universidad de la Guajira?
  Salinidad del pozo: 2.221 ppm (ZOA) →
  Capacidad de tto. De la planta: hasta 4.000 ppm
  Datos de salinidad y Ph tras instalación:

1. ¿A qué profundidad se extrae agua del pozo?
2. ¿Desde cuándo cuenta la comunidad con un pozo? ¿Quién realizó la perforación? ¿Se tiene algún contacto con el equipo que realizó la perforación?
3. ¿Qué uso se daba al pozo antes de la instalación de la PTAP?
4. ¿Se mide regularmente el nivel del agua en el pozo? ¿Ha variado con el tiempo? Percepción: ¿Alguna vez se han presentado bajos niveles? Ej.: en periodos de sequía.
5. ¿Qué tipo de bomba se utiliza para la extracción? (capacidad, potencia, consumo, foto de modelo, configuración del sistema de captación).
6. ¿Cada cuánto tiempo funciona la bomba y durante cuánto tiempo?
7. ¿Se han presentado fallas o reparaciones recientes en la bomba (sistema de captación)?
8. ¿Existen sistemas de respaldo en caso de que la bomba deje de funcionar? ¿Existe otra bomba de respaldo?
9. ¿Existen actividades industriales en la zona que podrían afectar la calidad del pozo (exploración de hidrocarburos, ganadería o agricultura intensiva)? ¿Qué medidas se han tomado para proteger el pozo de posibles contaminaciones externas? Ej.: cercado, control de acceso, limpieza del área o control del uso de químicos cerca
10. ¿Conoce si existe una prueba de bombeo del pozo?

- ***Subsistema de generación de energía***

11. ¿Cuántos paneles solares tiene instalados el sistema y cuál es su capacidad instalada total (Kw)?
12. ¿Qué usos se dan a la electricidad generada por los paneles? Ej.: para la planta, carga de celulares o baterías.
13. ¿El sistema genera suficiente energía para cubrir la demanda diaria de bombeo y tratamiento (kwh)? ¿Qué ocurre en días nublados o con baja radiación solar?
14. ¿Se cuenta con baterías o respaldo de otra fuente de energía?
15. ¿Cómo se realiza mantenimiento a los paneles? ¿Hay presencia de manchas de agua o polvo sobre el vidrio de los paneles?
16. ¿Han identificado problemas de eficiencia, suciedad o deterioro en los paneles?
17. ¿Plan para disponer de paneles?

- ***Subsistema de tratamiento de agua y almacenamiento***

18. ¿Cuál es la capacidad de tratamiento instalada de la planta de agua (m^3/día)?
19. ¿Cuál es la cantidad de agua cruda/tratada para suplir la demanda de la comunidad (m^3/día o tanques llenos/diarios)? ¿El caudal requerido ha variado a lo largo de la operación de la planta? Ej.: mayor, menor.
20. ¿Cuántas personas se benefician de la planta?
21. ¿Cómo se realiza la distribución del agua? Ej.: acarreo
22. ¿Qué insumos son requeridos para la operación del sistema? (principales)
23. ¿Qué porcentaje del agua que entra al sistema se convierte en agua tratada y cuánto se desecha como salmuera (L/s)?
24. ¿Dónde se dispone la salmuera generada por la planta? ¿Se les da algún tipo de uso?
25. ¿Se genera algún otro tipo de subproducto a partir de la operación de la planta (ej.: salmuera)? ¿En qué cantidades?
26. ¿Cuentan con algún análisis de a) caracterización del agua cruda b) calidad del agua cruda tratada? (qué parámetros se miden, con qué frecuencia).
27. ¿Cuál es la capacidad de almacenamiento de los tanques (L)? ¿El agua almacenada es suficiente para cubrir la demanda diaria/semanal de la comunidad?
28. ¿Se han presentado problemas de operación o mantenimiento (fallos de componentes – membrana, filtros, insuficiencia de insumos)? ¿Han tenido que reemplazar algún componente? ¿Fue fácil?

C. GENERAL

29. ¿Cómo funciona el esquema de distribución de agua?
30. Una vez los componentes del sistema cumplan con su periodo de vida útil, ¿existe un plan económico para su reemplazo? Ej.: fondos de la organización comunitaria para el cubrimiento de gastos.
31. ¿Qué insumos son requeridos para el funcionamiento del sistema? ¿Cuáles son los principales (dependencia)? Relevancia, procedencia, precios, disponibilidad, inconvenientes en la adquisición [Tabla 3]

D. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

No. de personas operando el sistema	1 empleo
No. De personas capacitadas para operar el sistema	15 personas comité de agua
Frecuencia	Diaria?
No. De personas realizando mantenimiento al sistema	
Existencia de manuales de operación y mantenimiento	Debería ser visual
Inscripción como prestador de servicios públicos de acueducto	Instituto de la Gestión del Agua de La Guajira

32. ¿Quién son las personas encargadas de realizar mantenimiento y opera el sistema?
33. ¿Cómo se realiza mantenimiento del sistema?
34. ¿En qué consiste el mantenimiento a profundidad en 3 a 5 años?
35. ¿Cómo se capacitaron para operar y realizar mantenimiento al sistema? ¿Se realizaron talleres de capacitación? En caso afirmativo, ¿cuántos talleres se realizaron? ¿Quiénes participaron? ¿En qué consistieron?
36. ¿Existe un manual de operación y mantenimiento?
37. ¿Existen algún tipo registro sobre el funcionamiento y operación de la planta? Ej.: fallos presentados, frecuencia de labores de mantenimiento, calidad del agua, niveles del pozo, etc.
38. ¿Se han presentado fallas? ¿Cómo se han solucionado?
39. ¿Cuál es el mayor problema técnico observado?
40. ¿Cuenta con alguna estimación de los costos asociados a la operación de la planta para los tres subsistemas tanto en lo técnico (insumos, remplazo componentes) como O&M?
41. ¿Cómo se solventan los costos asociados a la operación y mantenimiento del sistema? Ej.: subsidios municipales, cobro de tarifas a usuarios, envío de domicilios
42. ¿Mantienen contacto con ONG, proveedor (Boreal Light)?

E. GESTIÓN Y ASPECTOS COMUNITARIOS

Pagos por servicio	[Si] - [No]

44. ¿La comunidad conoce el funcionamiento básico de la planta?
45. ¿Se hacen reuniones o socialización de problemas / mejoras?
46. ¿Han trabajado en alianza con CORPOGUAJIRA o la autoridad sanitaria? (Autorización sanitaria para obtener la concesión de agua, mapa de riesgo de la zona y monitoreo de IRCA)
47. ¿Han recibido apoyo de alguna otra entidad gubernamental o no gubernamental?

F. OBSERVACIONES

G. ANEXOS

Anexo 4. Formato de medición de parámetros fisicoquímicos en campo

TOMA DE MUESTRAS EN CAMPO		
Nombre del encargado		**Fecha:**
Hora de inicio		**Lugar:**
Hora de finalización		
Objetivo de la investigación: Evaluar el funcionamiento y la sostenibilidad del Nexo agua-energía-alimentación en la comunidad de Katanamana.		

OBJETIVOS DEL MUESTREO

- Fuentes de agua para muestreo: tratada de la planta

1. Medición de CE, pH, temperatura y oxígeno disuelto en muestras de agua cruda (pozo), tratada (para consumo) y de rechazo de la PTAP

MATERIALES

- Mediciones en campo de agua:
  - Multiparámetro
  - Oxímetro
  - Balde o beaker de 600 ml (recipiente de llenado para muestra)
  - Soluciones buffer de pH 6,89 y 4 (calibración)
  - Beaker pequeños (calibración)
  - Solución de llenado (Oxímetro)
  - Agua destilada y recipiente con dispensador para lavado
  - Servilletas (secado pH-metro)
  - Membrana (Oxímetro)

DESARROLLO

- ***AGUA***

1. Revisar solución de llenado en membrana de Oxímetro (sin burbujas), calibrar pH-metro
2. Captar agua (cruda/tratada/rechazo) en balde o beaker de 600 ml. Esperar mínimo 45 segundos hasta que la muestra se estabilice.
3. Tomar medición de oxígeno disuelto y conductividad eléctrica. Las lecturas deben ser cercanas, lo que indica que la muestra se ha estabilizado. Para fuentes como aguas subterráneas esto puede durar hasta 30 minutos. De la muestra estabilizada como mínimo tomar 4 lecturas por parámetro. Entre cada nueva lectura enjuagar sonda con agua destilada
4. Capturar datos de temperatura del agua.
5. Hacer medición de pH con pH-metro calibrado. De la muestra estabilizada como mínimo tomar 4 lecturas por parámetro. Entre cada nueva lectura enjuagar sonda con agua destilada
6. Tomar muestras de agua de las 3 fuentes de agua (250 ml): purgar botellas con la muestra de agua. Introducir botella boca abajo en balde de agua evitando generar burbujeo o captar muestra del pico expendedor.
7. Enjuagar el equipo con agua destilada

Anexo 5. Herramientas construidas y resultados del taller comunitario

- Guía actividad 1: Mapa de reconocimiento del territorio

BLOQUE 1.1: Reconocimiento participativa del territorio

Grupo 1: personas de diferentes sectores

Comenzar con una actividad de reconocimiento del territorio, entre todos y todas donde podamos ubicar en un mapa los lugares importantes para la comunidad. No se trata de un mapa técnico, se trata de plasmar la experiencia y conocimiento de la comunidad de su territorio.

- Preguntas guía:
  - *¿Qué lugares consideran más importantes en su comunidad y por qué?*
  - *¿Dónde están los lugares que más usan a diario: para el agua, la comida, el trabajo o la reunión de la gente?*
  - *¿Qué zonas creen que son seguras y qué zonas presentan más riesgos para la comunidad?*

Materiales
1. Carteleras
2. Marcadores, lapiceros

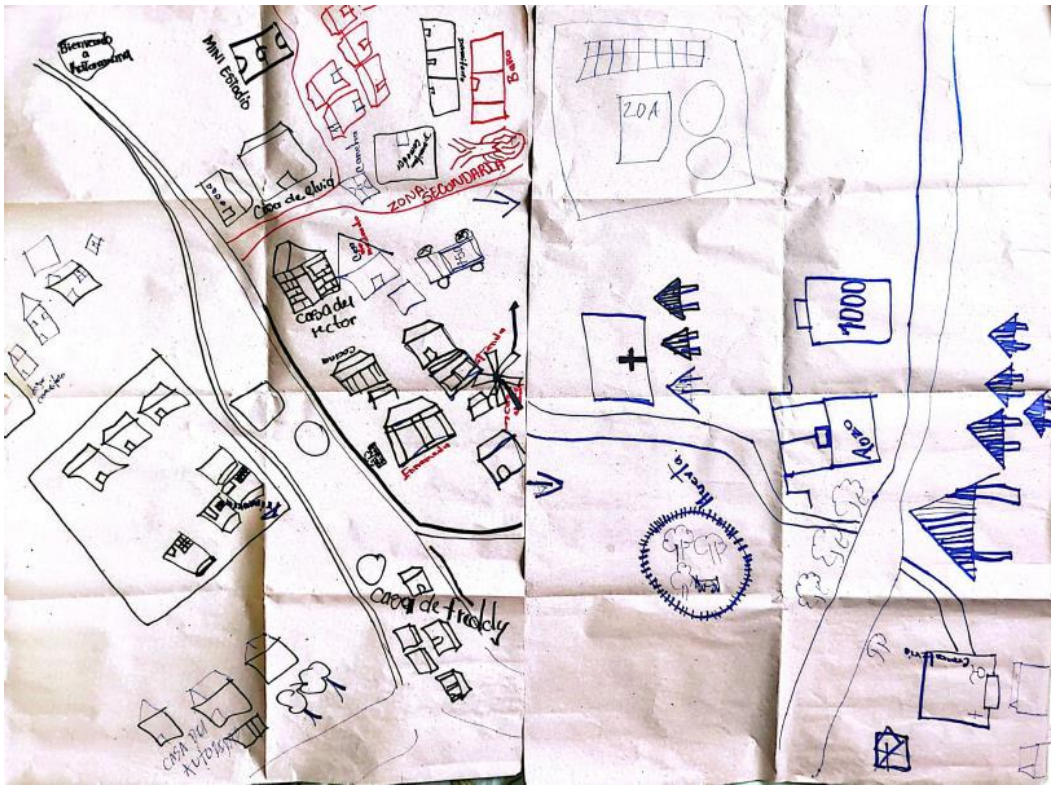
Identificar zonas de:
- Agua,
- agricultura,
- pecuarias,
- Peligro (inundaciones, sequías, inseguras)
- actividades industriales,
- acceso a electricidad/agua,
- áreas sin acceso a agua
- Zonas beneficiarias del proyecto

MAPA SOCIAL



Discusión: Presentación de los mapas. ¿Cuáles áreas tienen acceso al agua? ¿De qué fuente? ¿quiénes se benefician por el proyecto? ¿Cuáles áreas no se benefician o tienen un acceso limitado al agua?

- Mapa desarrollado por la comunidad para la actividad 1:



- Guía actividad 2: Usos del agua

BLOQUE 2.1: Usos y disponibilidad de recursos

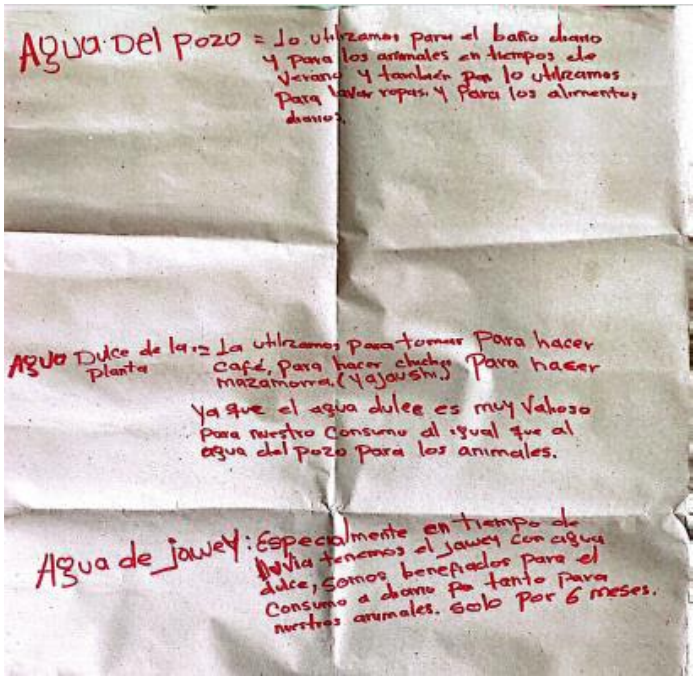
Relacionar fuentes de agua (planta, lluvia, jagüey, carrotanque, garrafas, otros) con posibles usos. Votar por la frecuencia de uso según cada fuente de agua.

- Preguntas guía:
- ¿Cuáles son las principales fuentes de agua?
- ¿Cómo se accede a estas fuentes y con que **frecuencia**?
- ¿Cuáles son costosas y cuáles accesibles?
- ¿Qué uso se le da a cada fuente de agua?



Discusión: ¿cómo ha cambiado el uso de las fuentes tras la implementación de la planta (mayor, menor o igual frecuencia)? ¿cuáles fuentes perciben como son seguras y cuáles no? ¿cómo se accede a cada fuente de agua? ¿Quién lo hace? ej.: mujeres, niños ¿con qué frecuencia? De todas las fuentes, ¿cuál es la que más usan para el consumo diario de agua? ¿Cómo cambia la disponibilidad del recurso según diferentes periodos del año? ¿Hay fuentes que solo se usan en ciertas temporadas (sequía, lluvias)?

- Esquema desarrollado por la comunidad para la actividad 2:

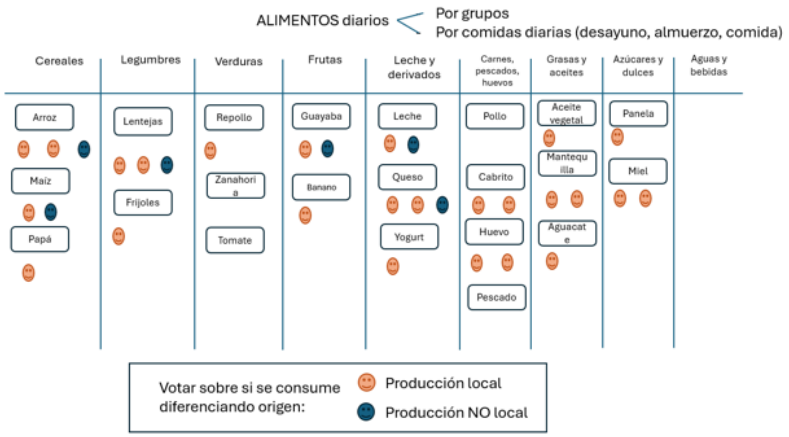


- Guía actividad 3: Dimensión de alimentos

BLOQUE 2.2: Usos y disponibilidad de recursos

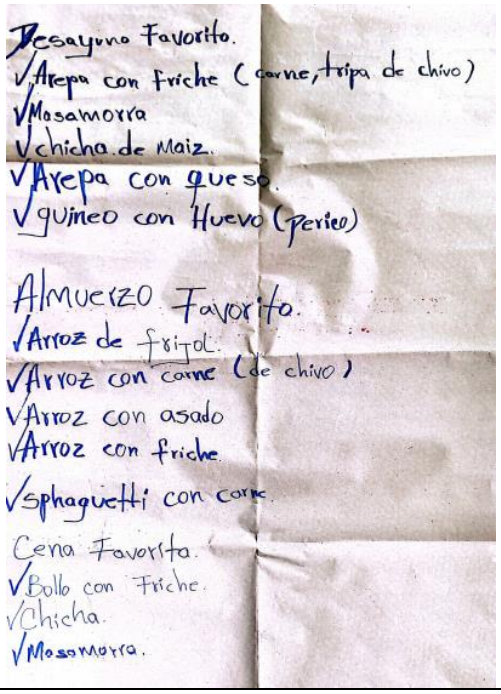
Identificar principales productos de la dieta,
- Preguntas guía
- ¿Cuáles son los alimentos que más se consumen diariamente en los hogares de la comunidad?
- ¿El alimento se produce localmente o se compra?
- ¿Cómo se accede a estos? ¿Cuáles son costosos y cuáles accesibles?

CONSUMO DE ALIMENTO Y ORIGEN



Discusión: ¿Cómo se realiza el riego de cultivos? ¿Hay uso de fertilizantes, de qué tipo? ¿ Se realiza rotación de cultivos? ¿Hay alimentos que llegan de ayudas externas (ONG, programas del Estado, etc.)?, ¿Qué alimentos son fáciles de conseguir todo el año?, ¿cuáles son más difíciles o costosos?, En su opinión, ¿es suficiente lo que se produce localmente o se depende más de lo que viene de afuera?, Qué cambios en la alimentación han visto en los últimos años? (ej. menos producción propia, más productos comprados, nuevas comidas), Si pudieran fortalecer un alimento local (más siembra, más producción), ¿cuál sería y por qué?

- Respuesta desarrollada por la comunidad para la actividad 3:



- Guía actividad 4: Identificación de desafíos y sinergias

BLOQUE 3: DESAFÍOS Y SINERGÍAS

Con esta actividad queremos conversar sobre qué **cosas nuevas pasaron en la comunidad** después de que llegó el proyecto de agua. Pueden ser cosas **buenas**, como capacitaciones, proyectos o más unión, pero también pueden ser **retos** o dificultades que hayan aparecido

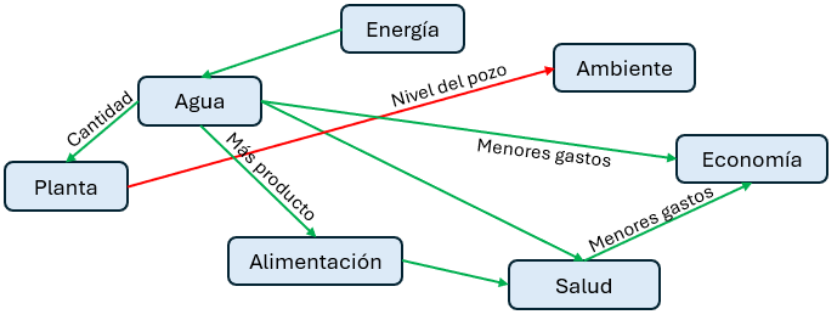
Hacer entre todos hagamos un mapa para ver cómo el proyecto cambió la vida de la comunidad y qué cosas faltan por mejorar.

- Preguntas guía:

- Desde que la planta funciona en la comunidad, ¿qué cosas nuevas han surgido? ¿Qué oportunidades abrió y qué retos trajo consigo?

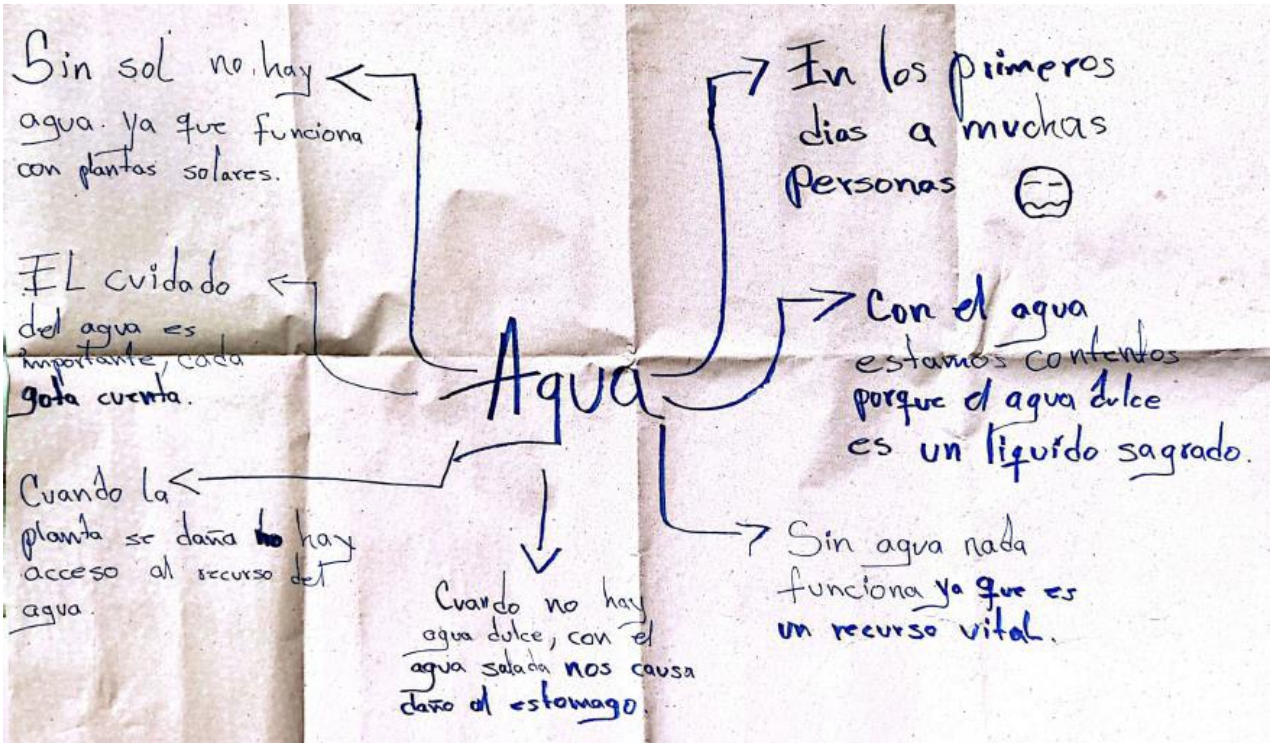
MAPA DE RELACIONES POSITIVAS Y NEGATIVAS

Ejemplo:



• *Discusión:* ¿Qué cambios creen que pueden mantenerse en el tiempo y cuáles necesitan más apoyo para continuar? Qué debería reforzarse o mejorarse para que estos cambios sean más duraderos y beneficien a todos por igual? ¿Cómo podría la comunidad aprovechar mejor los aprendizajes de este proyecto para nuevos procesos?

- Esquema desarrollado por la comunidad para la actividad 4:



Anexo 6. Formato de encuesta domiciliar

ENCUESTA DOMICILIAR KATANAMANA

Esta encuesta tiene como propósito conocer la percepción y experiencia de la comunidad en relación con el acceso al agua, la alimentación, la energía y otros aspectos de la vida comunitaria. La información que usted comparta nos ayudará a comprender los beneficios, desafíos e impactos que ha tenido el proyecto realizado en la comunidad en el año 2024 relacionado a la construcción de una planta desalinizadora de agua. Así como identificar oportunidades para mejorar en el futuro. Sus respuestas son confidenciales y serán utilizadas únicamente con fines de esta investigación. Por favor, marque la opción que mejor refleje su opinión en cada pregunta.

Género	[ ] Hombre [ ] Mujer [ ] Otro
Edad	
No. de personas que habitan en su hogar	
Principal(es) actividad(es) económicas en su hogar	
No. de personas que trabajan en su hogar	
Nombre de la comunidad donde habita	

SECCIÓN 1

1. Por favor seleccione la(s) fuente(s) de agua que utiliza para los diferentes usos del agua en su hogar. Puede seleccionar más de una fuente de agua en cada caso:

Actividad	**Agua de la planta**	**Agua de jagüey**	**Agua salada**	**Carro tanque**	**Agua embotellada /bolsa**	**Otro. ¿Cuál?**
Beber						
Cocinar						
Bañarse						
Lavado de manos						
Aseo del hogar						
Lavado de ropa						
Consumo animales						
Riego de cultivos						
Otro. ¿Cuál?						

2. Usted conoce el proyecto de la planta desalinizadora de agua. Seleccione una única opción:
   [ ] Si [ ] No

3. Usted ha utilizado ***alguna vez*** agua de la planta desalinizadora para su hogar Seleccione una única opción:
   [ ] Si [ ] No

4. ¿Cuántas veces en la semana va por agua al ***punto de hidratación***? Seleccione una única opción:
   [ ] 1 vez/semana [ ] 2 veces/semana [ ] 3 veces/semana
   [ ] 4 veces/semana [ ] 5 veces/semana [ ] 6 veces/semana
   [ ] Todos los días

5. ¿Cuánta agua recoge usualmente cuando visita el punto de hidratación? Seleccione una única opción:
   [ ] 1 jerrycan/pimpina grande [ ] 2 jerrycans/pimpina grande
   [ ] 3 jerrycans/pimpina grande: 60-75L [ ] 4 jerrycans/pimpina grande: 80-100 L

6. ¿Qué tipo de transporte utiliza para transportar el agua recolectada hasta su hogar? Puede seleccionar múltiples opciones:
   [ ] Burro [ ] Moto
   [ ] A pie [ ] Otro: _____

7. ¿Cuánto tiempo tarda en ir y volver por agua al punto de hidratación saliendo desde su casa? Seleccione una única opción:
   [ ] Menos de 10 minutos [ ] Entre 15 a 20 minutos [ ] Entre 25 a 30 minutos
   [ ] Entre 10 a 15 minutos [ ] Entre 20 a 25 minutos [ ] Más de 30 minutos

8. ¿Qué miembro(s) de su casa realiza(n) la recolección de agua? Puede seleccionar múltiples opciones:
   [ ] Mujer [ ] Hombre [ ] Niños [ ] Otro: _____

9. ¿En su vivienda lavan los recipientes de recolección de agua? Seleccione una única opción:
   [ ] Si [ ] No

10. ¿Con qué frecuencia se lavan los recipientes para recolectar agua? Seleccione una única opción:
    [ ] 1 veces/semana [ ] 2 veces/semana
    [ ] 1 vez/mes [ ] 2 veces/ mes [ ] Otro:_____

11. ¿Se han presentado ocasiones donde no ha podido acceder al agua de la planta? Seleccione una única opción
    [ ] Si, en alguna ocasión el agua de la planta no ha estado disponible
    [ ] No, siempre el agua de la planta está disponible

12. ¿Es esta situación muy frecuente? Seleccione una única opción:
    [ ] Si [ ] No ¿Con que frecuencia?: _____

13. En caso de que sus respuesta anteriores hayan sido afirmativas, por favor comparta los motivos que impidieron que accediera a agua de la planta.

    _____

    _____

14. ¿El proyecto de abastecimiento de agua relacionado a la planta de tratamiento y al punto de hidratación ha cambiado su acceso al agua?
    [ ] Si [ ] No

15. ¿De qué manera ha cambiado el acceso al agua en su hogar tras el desarrollo del proyecto? (ej.: mayor/menor cantidad de agua disponible):

    _____

    _____

16. ¿Qué tan satisfecho se siente con la calidad del agua que consume proveniente de la planta? (ej.: el sabor y color del agua)
    [ ] Muy satisfecho [ ] Satisfecho [ ] Regular
    [ ] Insatisfecho [ ] Muy insatisfecho

A. IMPACTOS ASOCIADOS AL PROYECTO

17. Desde su punto de vista, ¿qué impactos positivos (+), negativos (-) o neutro (n) para la comunidad trajo el desarrollo del proyecto de la planta de agua? Indique para cada caso que impactos asociados ha tenido.
    [ ] Salud (más/menos enfermedades, mejor/peor bienestar)
    [ ] Higiene (más/menos lavado de manos, limpieza de alimentos, aseo del hogar)
    [ ] Disponibilidad de agua (más/menos cantidad o mejor/peor acceso)
    [ ] Organización comunitaria (más/menos unión, espacios de participación)
    [ ] Economía familiar (más/menos gastos en agua)
    [ ] Acceso a alimentos
    Otros: _____

18. En el último año, ¿se han presentado casos de diarrea o dolor de estómago en su hogar?
    [ ] Nunca [ ] Algunas veces [ ] Muchas veces

19. En el último año, el gasto económico de su familia para asegurar el agua en su hogar ha:
[ ] Aumentado [ ] Disminuido [ ] Se ha mantenido igual

20. En el último año, ¿cómo ha cambiado en su hogar el acceso a alimentos (por cultivos propios o por capacidad de adquisición de productos)?
[ ] Aumentado [ ] Disminuido [ ] Se ha mantenido igual

21. En el último año, considera que se ha fortalecido la unión y la participación en la comunidad.
[ ] Si, mucho [ ] Si, un poco
[ ] No hubo cambios [ ] La debilitó
Por favor explique su respuesta: _____
_____

22. ¿Usted estuvo enterado del proyecto desde el inicio?
[ ] Si [ ] No, porque_____

23. Usted fue invitado y participó de alguna actividad asociada al desarrollo o implementación del proyecto (ej.: espacios de socialización, talleres de capacitación, preparación y obra)
[ ] Si, fui invitado y participe de_____
[ ] Si, fui invitado pero no participe porque _____
[ ] No fui invitado

B. RESPUESTAS LOCALES

24. ¿Después de que se implementó la planta de agua en la comunidad, ¿han surgido nuevas actividades, proyectos o espacios comunitarios? (puede marcar más de una opción)
[ ] Nuevos proyectos (ej.: agua, energía, alimentación)
[ ] Mayor participación comunitaria
[ ] Capacitaciones o talleres
[ ] Nuevos espacios comunitarios
[ ] Colaboraciones o alianzas con otras organizaciones
[ ] Colaboraciones o alianzas con otras comunidades
[ ] Nuevos negocios o emprendimientos
[ ] No ha surgido nada nuevo

25. ¿El proyecto ha generado o avivado nuevos desacuerdos, desafíos o retos en la comunidad? ¿Cuáles? ¿Cómo se manejan estos?
_____
_____

26. ¿Considera que toda la comunidad se beneficia por igual del proyecto?
[ ] Si [ ] No, porque _____

Nota. Los formatos de encuesta domiciliar guiaron la entrevista con los habitantes de Katanamana. La aplicación de una encuesta representativa a la comunidad no fue posible en esta ocasión pues hubo limitaciones importantes en el tiempo de la visita de campo en la comunidad y de comunicación en idioma Wayuu.