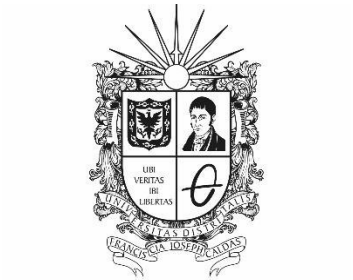
Diagnóstico del manejo del recurso hídrico para uso doméstico e industrial en el Campo Quifa y propuesta de aprovechamiento de aguas lluvias.



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Acreditación Institucional de Alta Calidad

Autor

Jack Klein Alarcón Arias

Director

Helmut Espinosa García

Universidad Distrital Francisco José de caldas

Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales

Tecnología en Gestión Ambiental y Servicios Públicos

Bogotá D.C, septiembre de 2026

Tabla de contenido

Resumen 9

INTRODUCCIÓN 10

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 11

JUSTIFICACIÓN 12

OBJETIVOS 12

Objetivo general 12

Objetivos específicos 13

MARCO DE REFERENCIA 13

Antecedentes 13

Marco Normativo 15

Marco Conceptual 17

EL ciclo hidrológico 17

Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) 18

Sistema de captación de agua lluvia 19

Método Gravedad 20

Precipitación 21

Cálculos 21

Balance hídrico 26

Modelo Water Pinch aplicado a la gestión del recurso hídrico 26

Marco Geográfico 27

Campamento Quifa 28

Clima 30

Población 30

Infraestructura asociada al manejo del recurso hídrico 30

Infraestructura asociada al industrial del recurso hídrico 31

CMA..... 31

Batería 04..... 34

PADS de inyección y disposición de agua producida 36

Infraestructura asociada al uso doméstico del recurso hídrico..... 38

Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP)..... 38

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas (PTARD) 41

METODOLOGÍA 43

Tipo y enfoque de la investigación..... 43

Recopilación y organización de datos de precipitación 44

Técnicas e instrumentos de recolección de la información 45

DIAGNÓSTICO DEL MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS..... 46

DIAGNOSTICO DEL USO DOMÉSTICO DEL RECURSO HIDRICO 46

Sistema de abastecimiento 46

Suministro de agua para uso domestico..... 47

Análisis de trazabilidad del agua en el sistema doméstico..... 52

Evaluación de la gestión doméstica del recurso hídrico..... 53

DIAGNOSTICO DEL USO INDUSTRIAL DEL RECURSO HIDRICO..... 59

Abastecimiento de agua para uso industrial 59

Reinyección del agua producida..... 60

Reúso y disposición de aguas residuales industriales para riego en vías 62

Entrega de agua para reúso agrícola (SAARA)..... 64

Agua de rechazo 65

Evaluación de la gestión industrial del recurso hídrico 67

Análisis de datos de precipitación 70

Balance hídrico 74

Volumen de agua captada de PASUB 2 75

Salidas 76

Uso del Recurso Hídrico del campamento Base Quifa 77

Cumplimiento normativo de captación 82

Resultado general del balance 83

Oferta potencial de aprovechamiento de agua lluvia 84

Precipitación 84

Superficies potenciales de captación 84

Oferta potencial mensual 86

Aplicación del modelo Water Pinch en la gestión del recurso hídrico 88

Fuentes hídricas disponibles 88

Identificación de unidades consumidoras 88

Caracterización de la oferta y demanda hídrica 89

Clasificación de los requerimientos de tratamiento 89

Identificación de oportunidades de sustitución 90

Definición de corrientes de oferta y demanda 92

Balance mensual e indicadores de cobertura y sustitución potencial 93

Selección del escenario de mayor potencial 95

Curva acumulada de oferta y demanda hídrica 97

Punto Pinch 97

PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS 98

Modelo empresarial para la gestión del aprovechamiento de aguas lluvias 98

Evaluación de las condiciones para la implementación 99

Compatibilidad con el sistema actual 99

Requerimientos técnicos 102

Volumen de almacenamiento potencial 103

Limitantes 106

Implicaciones 107

Recomendaciones técnicas para la implementación 108

CONCLUSIONES 110

RECOMENDACIONES 112

Referencias 113

Índice de tablas

Tabla 1 Marco normativo aplicable al aprovechamiento de aguas lluvias para el campo Quifa 16

Tabla 2 Técnicas e instrumentos de recolección de la información 45

Tabla 3 Características de las fuentes de abastecimiento Campo Quifa 47

Tabla 4 Diagnóstico de la distribución del agua potable - campamento Quifa 51

Tabla 5 Parámetros de referencia para la evaluación de la calidad del agua tratada en la PTARD 55

Tabla 6 Parámetros de referencia para la evaluación de la calidad del agua tratada en la PTARD 55

Tabla 7 Criterios cualitativos utilizados para la evaluación del manejo del recurso 57

hídrico

Tabla 8	Evaluación del manejo del recurso hídrico para uso doméstico del campo Quifa	58
Tabla 9	Volúmenes totales inyectados por pozo – Capa de dispersión 1 (C1-INTC5)	60
Tabla 10	Volúmenes totales inyectados por pozo – Capa de dispersión 2 (BASALES)	60
Tabla 11	ARD usada para riego en vías por Frontera Energy durante el año 2025	62
Tabla 12	Volúmenes de agua residual entregada a SAARA	63
Tabla 13	Volumen de ARI de rechazo generada y dispuesta	65
Tabla 14	Evaluación del manejo del recurso hídrico para uso industrial del campo Quifa	66
Tabla 15	Precipitaciones históricas mensuales (2006-2025)	71
Tabla 16	Entradas de agua al campamento Quifa	73
Tabla 17	Entradas de agua a Batería 04	74
Tabla 18	Salidas del recurso hídrico del campamento Quifa	75
Tabla 19	Principales unidades consumidoras del campamento Quifa	76
Tabla 20	Diferencia de entradas y salidas del recurso hídrico para el campamento Quifa	76
Tabla 21	Verificación del volumen captado frente al caudal autorizado para uso domestico	80
Tabla 22	Resultado general del balance hídrico	80
Tabla 23	Superficies potenciales de captación	82
Tabla 24	Oferta potencial mensual de aprovechamiento de agua lluvia	83
Tabla 25	Fuentes hídricas disponibles	85
Tabla 26	Unidades consumidoras campo Quifa	85
Tabla 27	Oferta vs demanda hídrica	86
Tabla 28	Requerimientos de tratamiento para cada unidad receptora	87

Tabla 29 Identificación de usos, demandas y escenarios potenciales de acoplamiento o sustitución mediante la integración de agua lluvia 88

Tabla 30 Corrientes de oferta y demanda utilizadas en la aplicación del Water Pinch. 89

Tabla 31 Indicadores de cobertura y sustitución potencial – escenario doméstico 90

Tabla 32 Indicadores de cobertura y sustitución potencial – escenario industrial 91

Tabla 33 Comparación de indicadores para los escenarios doméstico e industrial de aprovechamiento de agua lluvia 92

Tabla 34 Modelo empresarial sugerido para el sistema de aprovechamiento 94

Tabla 35 Comparación entre el esquema operativo actual y el esquema operativo propuesto 95

Tabla 36 Infraestructura susceptible a integración 97

Tabla 37 Simulación mensual del almacenamiento de agua lluvia para el escenario industrial 100

Tabla 38 Comportamiento mensual de la oferta de agua lluvia, la demanda industrial y el volumen almacenado. 102

Tabla 39 Limitantes del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias 104

Índice de figuras

Figura 1 Sistema de captación de aguas lluvias 22

Figura 2 Coeficiente de escorrentía 25

Figura 3 Ubicación geográfica área de explotación campo Quifa 30

Figura 4 Área de pozos perforados Campo Quifa 31

Figura 5 Fotografía campamento Quifa 31

Figura 6 Imagen satelital del Campamento Quifa 32

Figura 7 Centro de manejo de aguas (CMA) Quifa 35

Figura 8 Imagen satelital del Centro de manejo de aguas (CMA) 35

Figura 9 Piscinas – CMA 36

Figura 10 Batería 04 37

Figura 11 Esquema general Batería 04 38

Figura 12 Localización pozos inyectores capa de dispersión 1 (C1-INTC5) 39

Figura 13 Localización pozos inyectores capa de dispersión 2 (BASALES) 40

Figura 14 Tanques de almacenamiento - PTAP 41

Figura 15 Químicos usados en PTAP 41

Figura 16 Cajas conectoras - PTARD 43

Figura 17 Sistema de flotación por aire disuelto (DAF) 44

Figura 18 Lodos dispuestos en Ecoquifa 45

Figura 19 Diagrama de flujo proceso de captación PASUB 2 para uso domestico 50

Figura 20 Fuga identificada durante el periodo de evaluación. 52

Figura 21 Esquema general de la gestión del agua industrial en el Campo Quifa. 68

Figura 22 Ubicación estación meteorológica Puerto Gaitan y el campamento Quifa 72

Figura 23 Grafica promedio histórico de precipitación mensual 74

Figura 24 Diferencia de entrada y salida de agua en el campamento Quifa 79

Figura 25 Diagrama de flujo del recurso hídrico en el campamento Quifa 81

Figura 26 Vista aérea de las superficies potenciales de captación 84

Figura 27 Curva acumulada de oferta y demanda hídrica uso industrial 95

Figura 28 Comportamiento mensual de la oferta de agua lluvia, la demanda industrial y el volumen almacenado 103

Resumen

Primeramente, se realizó una caracterización del sistema hídrico existente con el fin de comprender con más detalle el funcionamiento el sistema y a partir de ello se realizó el diagnóstico del componente doméstico, en el cual se analizaron sistemas de captación, registros de consumo, trazabilidad del recurso, calidad del agua tratada, entre otros componentes. Para el componente industrial se evaluaron las principales estrategias de manejo de las aguas producidas y residuales industriales, como el tratamiento, reinyección, reúso y disposición mediante terceros y sistemas autorizados. Posteriormente, se analizaron los registros históricos de precipitación de la estación meteorológica seleccionada, para el periodo 2006–2025, buscando establecer el comportamiento temporal de la precipitación y determinar los periodos de mayor y menor disponibilidad. A partir de esto, se obtuvieron unos resultados de precipitación promedio anual de 2.322 mm/año, lo que permitió estimar una oferta potencial de agua lluvia de aproximadamente 8.438.28 m³/año para las superficies de captación consideradas. Los resultados del diagnóstico evidenciaron que el sistema actual presenta fortalezas en el cubrimiento de la demanda y una correcta calidad, continuidad, y cobertura en el servicio, aunque también se identificaron oportunidades de mejora relacionadas con la dependencia de agua subterránea y la trazabilidad del recurso hídrico. Con la aplicación conceptual del modelo Water Pinch se estimó un potencial de aprovechamiento de 8.438.28 m³/año, equivalente aproximadamente al 72.79 % de la demanda de agua subterránea captada para las calderas de batería 04. Por último, se formuló una propuesta

conceptual de aprovechamiento de aguas lluvia buscando complementar el sistema de abastecimiento existente, optimizar el uso del recurso hídrico y reducir la dependencia de fuentes de agua subterránea en aquellos usos compatibles con las condiciones operativas del Campo Quifa.

Palabras clave: gestión del recurso hídrico; aguas lluvias; aprovechamiento de aguas lluvias; balance hídrico; Water Pinch; uso eficiente del agua; Campo Quifa.

INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico es un elemento indispensable para la vida en el planeta tierra, desde la fauna y flora hasta los seres humanos y con ello, el desarrollo de todas nuestras actividades económicas y sociales, ya que se encuentra presente en todos los sectores económicos especialmente en sectores como el de los hidrocarburos, donde el agua es requerida desde su abastecimiento para necesidades domésticas hasta para su extracción. En este contexto, su gestión ambiental presenta una importancia fundamental por las implicaciones técnicas, normativas y económicas asociadas a su uso.

Una de estas empresas es la Multinacional Frontera Energy, quien desarrolla actividades de exploración y producción en Colombia en 17 bloques, entre sus principales se encuentra el campo Quifa, ubicado en el departamento del Meta, el cual aunque cuenta con sistemas estructurados para el manejo del agua, existen oportunidades de fortalecer aún más su gestión, mediante la identificación de alternativas complementarias que contribuyan a la sostenibilidad del recurso, esto debido al incremento en la demanda de agua y la presión sobre las fuentes hídricas que se presenta a nivel global. Dentro de estas, una opción viable resulta ser el aprovechamiento de aguas lluvias.

En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo realizar un diagnóstico del manejo del recurso hídrico para usos domésticos e industriales en el Campo Quifa, a partir del análisis de información operativa y ambiental disponible. Con base en este diagnóstico, se busca plantear una propuesta de aprovechamiento de aguas lluvias para el campamento base Quifa, como alternativa de abastecimiento complementaria.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, una gran parte del volumen de agua en las actividades relacionadas con el uso del recurso hídrico en el Área de Explotación de Hidrocarburos Quifa depende principalmente de fuentes convencionales, las cuales son utilizadas para diferentes procesos industriales y domésticos. Por consiguiente, no se cuenta con una estrategia específica de aprovechamiento de aguas lluvias que permita evaluar su incorporación como fuente complementaria. Esta situación representa una oportunidad de mejora, especialmente por la disponibilidad de superficies potenciales de captación y de actividades que no necesitan estrictamente agua potable.

En este contexto, surge la oportunidad de realizar un diagnóstico general de la gestión actual del recurso hídrico para uso doméstico e industrial, integrando la información disponible sobre captación, tratamiento, consumo, disposición final y reúso y a partir de esto, evaluar el potencial de aprovechamiento de aguas lluvias mediante la metodología Water Pinch para el campo Quifa y formular una propuesta conceptual que funcione como base para que la empresa Frontera Energy pueda considerar diversificar las fuentes de abastecimiento y fortalecer el uso eficiente y sostenible del recurso hídrico en el Campo Quifa.

JUSTIFICACIÓN

La presente pasantía se justifica en tener una oportunidad de mejora en la gestión y uso eficiente del recurso hídrico, en la posibilidad de plantear una propuesta para el aprovechamiento de aguas lluvias como fuente complementaria de abastecimiento, que pueda contribuir a optimizar el consumo del agua disponible e identificar posibles beneficios asociados desde su captación, tratamiento, uso y disposición final.

La pertinencia del estudio también se relaciona con la variabilidad climática, fenómenos de calentamiento global, fenómenos climáticos como el fenómeno del niño y en general la ocurrencia de períodos de disminución de las precipitaciones y aumento de las temperaturas, condiciones que pueden causar estrés hídrico y generar mayores requerimientos de almacenamiento o fuentes alternativas de abastecimiento.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Diagnosticar el manejo del recurso hídrico para usos domésticos e industriales en el Campo Quifa de la empresa Frontera Energy y formular una propuesta de aprovechamiento de aguas lluvias como alternativa complementaria de abastecimiento.

Objetivos específicos

- Caracterizar el manejo del recurso hídrico para usos domésticos e industriales en el Campo Quifa, considerando fuentes de abastecimiento y procesos de captación, tratamiento, distribución, reúso y vertimiento.
- Analizar la información disponible (registros operativos, plataforma IRIS y datos de campo) para identificar oportunidades técnicas, ambientales y económicas para el aprovechamiento de aguas lluvias.
- Formular una propuesta de aprovechamiento de aguas lluvias para usos domésticos e industriales, considerando criterios técnicos, ambientales y económicos.

MARCO DE REFERENCIA

Antecedentes

Como antecedente relacionado con la identificación de usos no potables, Rojas Salazar (2016) desarrolló el trabajo *Diseño e implementación de un sistema de captación aprovechamiento de aguas lluvias (SCALL) como alternativa de ahorro y uso sostenible de agua potable a nivel residencial en la ciudad de Bogotá*. El estudio se orientó a sustituir el uso de agua potable en actividades que no requieren las mismas condiciones de calidad, específicamente en la descarga de sanitarios y el lavado de ropa. Este estudio demuestra la importancia de poder relacionar la oferta de agua lluvia con usos específicos y con las condiciones reales de la infraestructura disponible cuando se busca sustituir parcialmente una fuente convencional.

En relación con la integración entre oferta, demanda y almacenamiento, Urueña González y Ardila Barreto (2019) desarrollaron una propuesta para el aprovechamiento de aguas lluvias en la sede Bosa Porvenir de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. El principal aporte de este antecedente se presenta en la necesidad de analizar conjuntamente la disponibilidad temporal del agua lluvia y la demanda del uso seleccionado, así como en la importancia del almacenamiento como elemento regulador frente a las diferencias entre los períodos de mayor y menor disponibilidad hídrica.

En estudios más recientes, López Mejía y Bain Loayza (2025) desarrollaron una metodología para calcular volúmenes de aprovechamiento de aguas lluvias y apoyar el dimensionamiento de estructuras hidráulicas asociadas a la captación, almacenamiento y aprovechamiento del recurso. El estudio incorporó el análisis de registros de precipitación y diferentes criterios relacionados con la variabilidad climática para establecer metodologías aplicables al diseño de sistemas hidráulicos en edificaciones.

Finalmente, el antecedente metodológico más directamente relacionado con la presente investigación corresponde al trabajo de Beltrán Linares (2026), titulado *Diagnóstico de oportunidades para el reúso de aguas lluvias en usos no potables mediante la metodología Water Pinch en la Empresa Licores de Cundinamarca*. El estudio tuvo como objetivo identificar oportunidades para sustituir parcialmente el uso de agua potable mediante el aprovechamiento de aguas lluvias en procesos compatibles con sus características de calidad. Este estudio constituye el antecedente metodológico más importante para la presente investigación, debido a que su estructura fue adaptada a las condiciones particulares del Campo Quifa, integrando el diagnóstico de la gestión actual del recurso hídrico, la caracterización de la oferta y la demanda, la evaluación de escenarios de aprovechamiento y el análisis de la alternativa con mayor potencial de sustitución.

Estos aportes metodológicos fueron de base para identificar las condiciones operativas del Campo Quifa y orientar la propuesta hacia la sustitución parcial de una fuente convencional mediante el aprovechamiento de aguas lluvias en un uso compatible.

Marco Normativo

En este apartado se muestran las principales referencias normativas relacionadas con la gestión del recurso hídrico, el uso eficiente y ahorro del agua y el aprovechamiento de aguas lluvias aplicables al campo Quifa. Las cuales componen el marco legal que orienta la formulación de la propuesta de aprovechamiento de aguas lluvias, para ello se realizó una revisión de las disposiciones legales y técnicas. En la Tabla 1 se presentan las normas seleccionadas, una síntesis de su contenido y su relación con el desarrollo del proyecto.

Tabla 1

Marco normativo aplicable al aprovechamiento de aguas lluvias para el campo Quifa

Norma	Descripción	Relación con el proyecto
Ley 99 de 1993	Crea el Ministerio de Ambiente y el Sistema Nacional Ambiental (SINA), estableciendo los principios generales para la gestión y conservación de los recursos naturales renovables.	Fundamenta la implementación de medidas orientadas al uso sostenible del recurso hídrico y al aprovechamiento de fuentes alternativas como las aguas lluvias.

Ley 373 de 1997	Establece el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA), promoviendo medidas para optimizar el uso del recurso hídrico.	Sustenta la implementación de estrategias como el aprovechamiento de aguas lluvias para disminuir la demanda sobre fuentes convencionales.
Decreto 1076 de 2015	Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible que compila la normativa relacionada con el uso y manejo del recurso hídrico.	Define el marco regulatorio general para la administración y aprovechamiento del agua.
Resolución 1257 de 2018	Establece los lineamientos para la formulación y desarrollo de los Programas de Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA).	Orienta la implementación de medidas encaminadas al uso racional y eficiente del agua.
Resolución 0330 de 2017	Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, estableciendo criterios técnicos para sistemas de abastecimiento de agua.	Sirve como referencia técnica para la formulación conceptual del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias.
Decreto 1575 de 2007	Establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.	Permite identificar los requisitos asociados a la calidad del agua según los usos previstos.
Resolución 2115 de 2007	Define las características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.	Constituye una referencia para determinar las condiciones de calidad requeridas en caso de usos

		con contacto humano.
Resolución 2015	Establece los parámetros y valores límites máximos permisibles para vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y sistemas de alcantarillado público.	Se relaciona con la gestión integral del recurso hídrico y el manejo adecuado de efluentes asociados a la operación
Resolución de 2023	Resolución mediante la cual se establecen/modifican las condiciones de la licencia ambiental aplicables al Campo Quifa, incluyendo disposiciones relacionadas con el aprovechamiento de aguas lluvias.	Definen las obligaciones ambientales particulares del Campo Campo Quifa.

Nota. Elaboración propia a partir de la normativa ambiental colombiana relacionada con la gestión y aprovechamiento del recurso hídrico.

Marco Conceptual

EL ciclo hidrológico

Es un proceso de circulación y transformación del agua que describe la circulación y renovación del agua en el planeta. El agua se almacena en la atmósfera, en la superficie terrestre y en el subsuelo. Se mueve a gran escala, a través de las cuencas, la atmósfera y debajo de la superficie de la Tierra. También se mueve a escalas muy pequeñas a través de nosotros, las plantas y otros organismos. Las actividades humanas impactan este ciclo, afectando su almacenamiento, su pureza y cómo se mueve. [IDEAM], 2013).

Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH)

De acuerdo con la Global Water Partnership (GWP), la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) es un proceso que promueve el desarrollo y la gestión coordinada del agua, el suelo y los recursos relacionados, con el propósito de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas. Este enfoque integra aspectos ambientales, sociales, económicos e institucionales para orientar la planificación y el aprovechamiento sostenible del recurso hídrico. (Global Water Partnership [GWP], 2000).

La GIRH reconoce el agua como un recurso limitado y estratégico, cuya gestión debe considerar de manera articulada su disponibilidad, las necesidades de los diferentes usuarios, la conservación de los ecosistemas y la eficiencia en su utilización. Por lo tanto, la toma de decisiones debe contemplar integralmente las etapas relacionadas con el recurso, desde su captación, tratamiento y distribución hasta su consumo, reúso y disposición final. (GWP, 2000).

Sostenibilidad

Se entiende como la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades, mediante un equilibrio entre el desarrollo económico y social y la conservación y protección del medio ambiente (Universidad Europea, 2024). Por ende, en la gestión del recurso hídrico implica promover un uso eficiente y responsable del agua, procurando mantener su disponibilidad y calidad a largo plazo y reducir los impactos asociados a su aprovechamiento.

Sistema de captación de agua lluvia

En la Figura 1 se podrá observar los componentes necesarios del sistema de aprovechamiento:

Figura 1

Sistema de captación de aguas lluvias



Nota. Por Organización Panamericana de la Salud (OPS), 2004.

A continuación, se explicará cuáles son los componentes del sistema de recolección de agua lluvia.

- **Captación**

De acuerdo con la Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2004), la captación de agua lluvia en techos está constituida por la superficie del techo de la vivienda o edificación, acondicionada con una pendiente adecuada que facilite el escurrimiento del agua hacia el sistema de recolección. Esta superficie constituye el

componente inicial del sistema de captación y debe presentar características que favorezcan una adecuada recolección del agua.

- **Recolección y conducción**

Conformada por canaletas instaladas en los bordes inferiores del techo, cuya función es recolectar y conducir el agua lluvia hacia los componentes posteriores del sistema. Deben ser de materiales livianos, resistentes al agua y de fácil unión, con el fin de minimizar las fugas, como guadua, madera, metal o PVC (OPS, 2004).

- **Interceptor**

El interceptor o dispositivo de descarga de las primeras aguas, es el que permite desviar el agua proveniente del lavado inicial de la superficie de captación. Esta primera escorrentía puede contener materiales acumulados en el techo. Su función es evitar que estos elementos ingresen al tanque de almacenamiento, reduciendo así la contaminación del agua almacenada (OPS, 2004).

- **Almacenamiento**

Infraestructura que permita conservar el agua lluvia captada para su posterior utilización, especialmente durante los períodos de baja precipitación o sequía (OPS, 2004).

Método Gravedad

Corresponde a un sistema de abastecimiento que utiliza la diferencia de altura y la fuerza gravitacional para transportar y distribuir el agua, sin requerir sistemas de bombeo mecánico. Su funcionamiento depende de la ubicación y diferencia de nivel entre los puntos de almacenamiento y consumo.

Precipitación

La precipitación se obtiene principalmente del proceso de condensación del vapor de agua dentro de la atmósfera. Ocurre cuando el aire cargado de humedad asciende y se enfría como resultado de la disminución de la presión atmosférica a medida que aumenta la altura y se dan condiciones donde el vapor de agua se condensa alrededor de núcleos de condensación (Correa Sastoque,2014). En el proceso de ascenso el aire llega a su punto de rocío, el vapor de agua se condensa y forma nubes. Bajo las condiciones atmosféricas adecuadas las gotas de agua o partículas de hielo en la nube crecen en tamaño y precipitan desde la atmósfera en forma de lluvia, nieve, granizo u otros tipos de precipitación dependiendo de las condiciones de temperatura atmosférica (Correa Sastoque,2014).

A continuación, se presentan las ecuaciones usadas para el presente trabajo.

Cálculos

A partir de la Ecuación 1, se comparó el volumen de agua que ingresó al sistema de abastecimiento del campamento con el volumen de agua residual tratado atribuible al mismo.

Ecuación 1

Balance entre entrada y salida de agua

$$D_{PTAP-PTARD} = V_{PTAP} - V_{PTARD}$$

Nota. Donde **DPTAP – PTARD** = diferencia entre entrada y salida de agua (m³). **VPTAP**= volumen de agua registrado a la entrada de la PTAP (m³). **VPTARD** = volumen de agua residual tratado en la PTARD correspondiente al campamento (m³).

La Ecuación 2 fue una de las principales ecuaciones del estudio y se utilizó para estimar el volumen de agua lluvia potencialmente aprovechable sobre las superficies de captación identificadas.

Ecuación 2

Cálculo de la oferta potencial de agua lluvia

$$V_{lluvia} = \frac{P \times A \times C}{1000}$$

Nota. Donde **VIluvia** corresponde al volumen potencial de agua lluvia (m³)., **P** corresponde a la precipitación (mm). y **A** es el área de captación (m²). **C** es el coeficiente de escorrentía y **1000** es el factor de conversión para expresar el resultado en m³.

El coeficiente de escorrentía usado fue de C= 0,9. Se obtuvo de la Figura 2, donde dependiendo del tipo de superficie se le asigna un valor.

Figura 2

Coeficiente de escorrentía

Tipo de superficie	C
Cubiertas	0.90
Pavimentos asfálticos y superficies de concreto	0.90
Vías adoquinadas	0.85
Zonas comerciales o industriales	0.90
Residencial, con casas contiguas, predominio de zonas duras	0.75
Residencial multifamiliar, con bloques contiguos y zonas duras entre estos	0.75
Residencial unifamiliar, con casas contiguas y predominio de jardines	0.60
Residencial, con casas rodeadas de jardines o multifamiliares apreciablemente separados	0.45
Residencial, con predominio de zonas verdes y parques-cementerios	0.30
Laderas sin vegetación	0.60
Laderas con vegetación	0.30
Parques recreacionales	0.30

Nota. Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, 2016, como se citó en Sarmiento Ávila & Ávila Padua, 2021.

Para determinar qué proporción de la demanda podría ser atendida mediante agua lluvia se utilizó la Ecuación 3:

Ecuación 3

Cobertura mensual de la demanda

$$C_m = \frac{O_m}{D_m} \times 100$$

Nota. Donde **Cm** = cobertura mensual (%). **Om** = Oferta potencial de agua lluvia del mes (m³). **Dm** = demanda hídrica del mes (m³).

Para evaluar el volumen de demanda que podría ser sustituido progresivamente por agua lluvia se utilizó la suma acumulada de los volúmenes potencialmente aprovechables como muestra la Ecuación 4:

Ecuación 4

Sustitución acumulada

$$S_{ac} = \sum_{i=1}^{n} S_i$$

Nota. Donde **Sac** = sustitución acumulada (m³). ***Si*** volumen de demanda sustituible en cada período (m³). **n** = número de períodos analizados.

El porcentaje de sustitución permite expresar qué proporción de la demanda total puede ser atendida mediante la fuente alternativa usando la Ecuación 5:

Ecuación 5

Porcentaje de sustitución

$$PS = \frac{S_{ac}}{D_{ac}} \times 100$$

Nota. Donde **Ps** = porcentaje de sustitución (%). **Sac** = volumen acumulado potencialmente sustituido (m³). **Dac** = demanda acumulada del período (m³).

Para el balance mensual entre oferta y demanda se utilizó la diferencia de la Ecuación 6:

Ecuación 6

Volumen de agua potencial

$$B_i = O_i - D_i$$

Nota. Donde **Bi** = balance del período i(m³). **Oi** = oferta potencial de agua lluvia (m³). **Di** = demanda hídrica (m³).

A partir de este resultado se usó la Ecuación 7:

Ecuación 7

Cálculo de excedente y déficit

$$Excedente_i = \max(O_i - D_i, 0)$$

$$Déficit_i = \max(D_i - O_i, 0)$$

De esta manera, el excedente representa el volumen de agua lluvia que queda disponible después de atender la demanda del período, mientras que el déficit corresponde al volumen que no puede ser cubierto mediante la fuente alternativa.

Para la construcción de la curva Water Pinch se utilizaron los valores acumulados de oferta y demanda como se muestra en la Ecuación 8:

Ecuación 8

Valores acumulados de oferta y demanda

$$O_{ac,i} = \sum_{j=1}^{i} O_j$$

$$D_{ac,i} = \sum_{j=1}^{i} D_j$$

Nota. Donde **Oac, i** = oferta acumulada hasta el período i(m³). **Dac, i** = demanda acumulada hasta el período i(m³).

Estos valores permiten representar gráficamente las curvas acumuladas de oferta y demanda y analizar su comportamiento a lo largo del período de estudio.

Para el análisis del escenario industrial, el almacenamiento mínimo se relaciona con la necesidad de compensar temporalmente los períodos en los que la demanda supera la oferta. Conceptualmente se determina a partir de la Ecuación 9 del rango acumulado del balance:

Ecuación 9

Volumen de agua potencial

$$V_{alm,min} = \max(B_{ac}) - \min(B_{ac})$$

Esta expresión permite estimar la capacidad de almacenamiento necesaria para compensar las variaciones temporales entre oferta y demanda, bajo el supuesto de que el agua disponible puede ser almacenada y utilizada posteriormente.

Demanda hídrica

La demanda hídrica corresponde al volumen de agua requerido para satisfacer las diferentes necesidades y actividades desarrolladas en el área de estudio durante un período determinado. Es un elemento fundamental para evaluar la relación entre la disponibilidad del recurso y los requerimientos de los diferentes usos, así como para identificar oportunidades de sustitución.

En el presente estudio, la demanda no fue estimada mediante valores teóricos de dotación o fórmulas basadas en el número de usuarios, sino a partir de registros reales de operación y captación disponibles para el Campo Quifa. Este enfoque permitió utilizar información representativa de las condiciones reales de consumo.

Balance hídrico

El balance hídrico es el cálculo utilizado para cuantificar las entradas, salidas y variaciones de almacenamiento del agua dentro de un sistema determinado. La cual permite conocer el comportamiento del recurso hídrico mediante la comparación entre la oferta disponible y la demanda generada por los diferentes usos, volviéndose un instrumento fundamental para la planificación, gestión y optimización del agua.

Modelo Water Pinch aplicado a la gestión del recurso hídrico

El modelo de Water Pinch es un método de optimización desarrollado para mejorar la gestión del recurso hídrico en procesos industriales mediante el análisis de las fuentes de agua disponibles y de los distintos puntos de consumo dentro de un sistema. Su objetivo principal es minimizar el uso de agua fresca y reducir la generación de efluentes mediante la identificación de oportunidades de reutilización, recirculación e integración de corrientes de agua. Consiste en analizar las características de las corrientes de entrada y las necesidades de calidad de cada proceso, lo que permite establecer el punto óptimo de intercambio de agua, conocido como *Pinch Point*. A partir de este análisis es posible identificar alternativas para redistribuir el recurso hídrico sin afectar las condiciones operativas de los procesos. (Wang & Smith, 1994)

En esta investigación, el modelo Water Pinch es aprovechado desde un enfoque conceptual para identificar las unidades operativas del campamento donde el agua de lluvia podría incorporarse como fuente complementaria de abastecimiento. Con el fin de formular una propuesta técnicamente viable que contribuya al uso eficiente del recurso hídrico.

Marco Geográfico

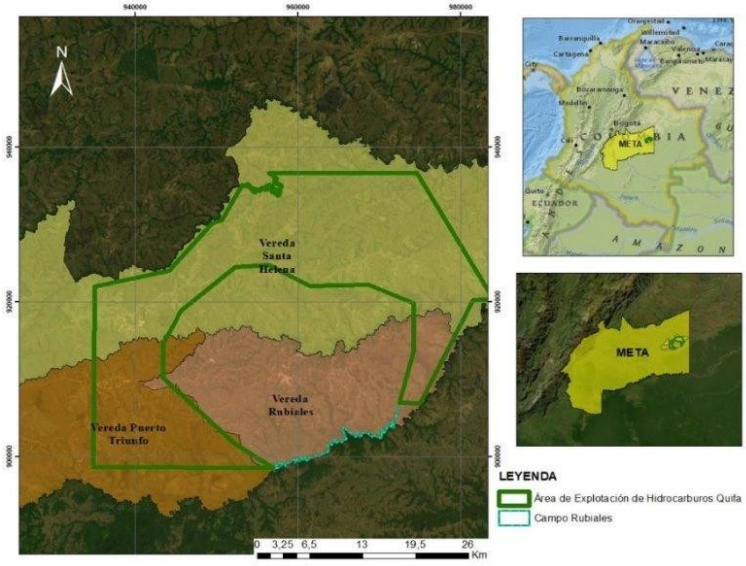
Ubicación

El Área de Explotación de Hidrocarburos (AEH) Quifa se encuentra localizado en el departamento del Meta bajo jurisdicción del municipio de Puerto Gaitán, a 127 km de su casco urbano y a 432 km de Bogotá.

Enmarcado político - administrativamente en las veredas Santa Helena, Rubiales y Puerto Triunfo. La autoridad ambiental regional competente es la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena (CORMACARENA). Con un área licenciada de 76.928 hectáreas. La Figura 3 muestra la ubicación geográfica del área permitida para explotación y exploración de hidrocarburos Quifa.

Figura 3

Ubicación geográfica área de explotación campo Quifa

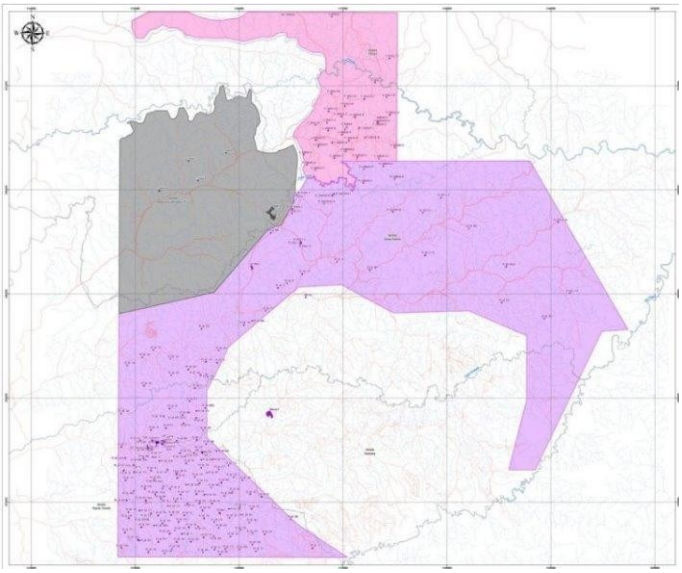


Nota. Tomado de información contenida en el Informe de Cumplimiento Ambiental (ICA) 30, por Frontera Energy, 2025, documento interno.

La Figura 4 muestra la ubicación de los pozos perforados en el área de explotación Quifa.

Figura 4

Área de pozos perforados Campo Quifa



Nota. Tomado de información contenida en el Informe de Cumplimiento Ambiental (ICA) 30, por Frontera Energy, 2025, documento interno.

Campamento Quifa

El campamento Quifa se encuentra ubicado en Puerto Gaitán dentro del Área de Explotación de hidrocarburos (AEH) Quifa, en el departamento del Meta, sus coordenadas son (3°46'46.62"N 71°37'29.80"W). En la Figura 5 se muestra una fotografía de una de las áreas comunes del campamento Quifa

Figura 5

Fotografía campamento Quifa



La Figura 6 muestra una imagen satelital de toda el área del campamento Quifa.

Figura 6 *Imagen satelital del Campamento Quifa*



Nota. *Tomado de imágenes satelitales de Google Earth*

Clima

La región es caracterizada por presentar un clima cálido tropical, con temperaturas elevadas durante gran parte del año que oscilan entre 28°C y 34°C, una temperatura promedio de 30°C y un régimen de lluvias influenciado por las dinámicas climáticas del Orinoco colombiano. La zona presenta periodos de alta precipitación de abril a noviembre y temporadas secas marcadas de diciembre a marzo, condiciones que influyen directamente en la disponibilidad del recurso hídrico durante el año y en el desarrollo de las actividades operativas del campo.

Población

Para la caracterización de la población se tomó como referencia la información más reciente disponible, correspondiente a la presentación elaborada por Frontera Energy para la visita de control y seguimiento realizada por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) (*Presentación Visita de Control y Seguimiento ANLA – Julio 2026*) que se llevó a cabo entre el 23 y el 28 de julio de 2026. De acuerdo con la información consolidada y validada por el equipo técnico de la compañía, se estimó una población promedio de 470 personas en el campamento, valor que se adoptó como referencia para los análisis relacionados con la demanda del recurso hídrico.

Infraestructura asociada al manejo del recurso hídrico

Para el manejo del recurso hídrico el Campo Quifa cuenta con un conjunto de infraestructuras que permiten la captación, almacenamiento, tratamiento, distribución, reúso y disposición final del agua requerida para el desarrollo de las actividades domésticas e industriales, las cuales permiten garantizar la disponibilidad del recurso para las operaciones

del campo, así como el cumplimiento de los requisitos ambientales asociados a su uso y manejo.

A continuación, se describen las principales infraestructuras asociadas a cada uno de estos sistemas, destacando su función dentro de la gestión integral del recurso hídrico en el Campo Quifa.

Infraestructura asociada al industrial del recurso hídrico

CMA

El Campo Quifa cuenta con un Centro de Manejo de Aguas (CMA), ubicado dentro del área de las Facilidades Centrales de Producción (CPF), cuya función principal es realizar el manejo, tratamiento y acondicionamiento del agua producida proveniente de las operaciones del campo. Esta infraestructura fue autorizada mediante la Resolución 2035 de 2010, correspondiente a la construcción y operación de las Facilidades Centrales de Producción Quifa.

Al Centro de Manejo de Aguas llega aproximadamente el 37% de la totalidad de los fluidos de producción generados en el campo, los cuales presentan un alto contenido de agua asociada al crudo. Dentro del CMA se desarrollan procesos de separación, tratamiento y acondicionamiento del agua producida mediante diferentes unidades operativas, entre las que se encuentran tanques de separación de agua libre (FWKO), tanques Skim de primera y segunda etapa, sistemas de micro burbujeó, filtros de cascarilla de palma, bombas de transferencia e inyección y tanques de almacenamiento.

El proceso desarrollado en el CMA permite disminuir progresivamente el contenido de aceite presente en el agua producida, con el fin de obtener un agua acondicionada para procesos de reinyección y reutilización dentro de la operación del campo. Asimismo, el sistema contempla procesos de recuperación y recirculación de agua provenientes del retrolavado de filtros, favoreciendo el aprovechamiento del recurso hídrico y la reducción de pérdidas operacionales. La Figura 7 muestra una imagen completa del área del Centro de Manejo de Aguas. A su vez la Figura 8 muestra la imagen satelital.

Figura 7

Centro de manejo de aguas (CMA) Quifa



Nota. Tomado de información contenida en el Informe de Cumplimiento Ambiental (ICA) 30, por Frontera Energy, 2025, documento interno.

Figura 8

Imagen satelital del Centro de manejo de aguas (CMA)

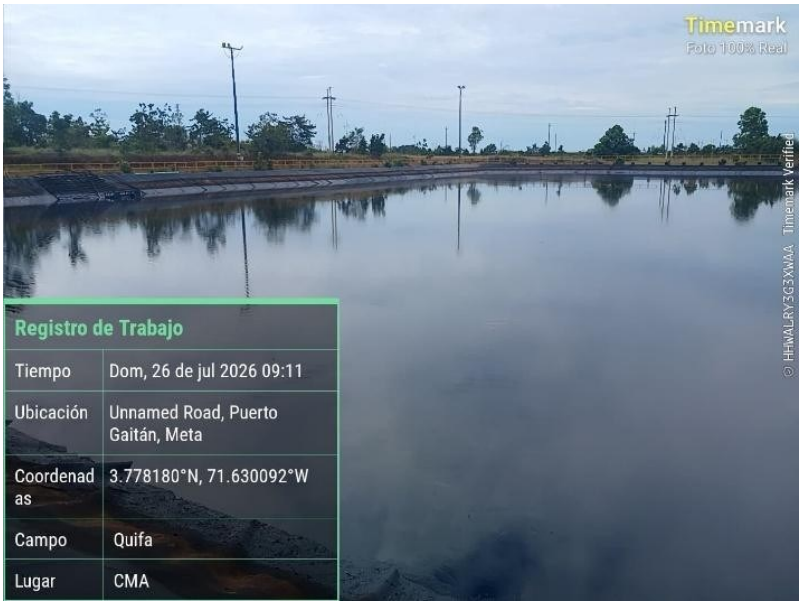


Nota. *Tomado de imágenes satelitales de Google Earth.*

Adicionalmente, el CMA cuenta con infraestructura complementaria para contingencias, como piscinas de almacenamiento destinadas a manejar volúmenes asociados al flujo de diseño del sistema. Ver Figura 9.

Figura 9

Piscinas – CMA



Batería 04

Batería 4 constituye una de las principales infraestructuras asociadas al manejo industrial de fluidos y agua producida dentro del Campo Quifa. En esta instalación se realiza el tratamiento de aproximadamente el 63% de los fluidos de producción generados en el área de explotación, mediante procesos orientados a la separación de agua y crudo cumpliendo con las especificaciones requeridas para la comercialización del hidrocarburo. Ver Figura 10.

Figura 10

Batería 04



Actualmente, Batería 4 recibe los fluidos provenientes de los pozos productores localizados en las diferentes locaciones o “clústeres” del campo, los cuales son transportados mediante líneas de flujo y tractocamiones. Una vez ingresan al sistema, los fluidos son sometidos a procesos de separación y tratamiento para remover el agua asociada al crudo, permitiendo así obtener un hidrocarburo apto para su venta.

La infraestructura de Batería 4 cuenta con una capacidad de tratamiento de hasta 1.800.500 BWPD. Dentro de las cuales, se desarrollan actividades relacionadas con el manejo, transferencia y tratamiento de grandes volúmenes de agua producida, evidenciando la importancia del recurso hídrico dentro de la operación industrial del Campo Quifa. A continuación, en la Figura 11 se muestra el esquema general de Batería 4

Figura 11

Esquema general Batería 04



Nota. Tomado de información contenida en el Informe de Cumplimiento Ambiental (ICA) 30, por Frontera Energy, 2025, documento interno.

PADS de inyección y disposición de agua producida

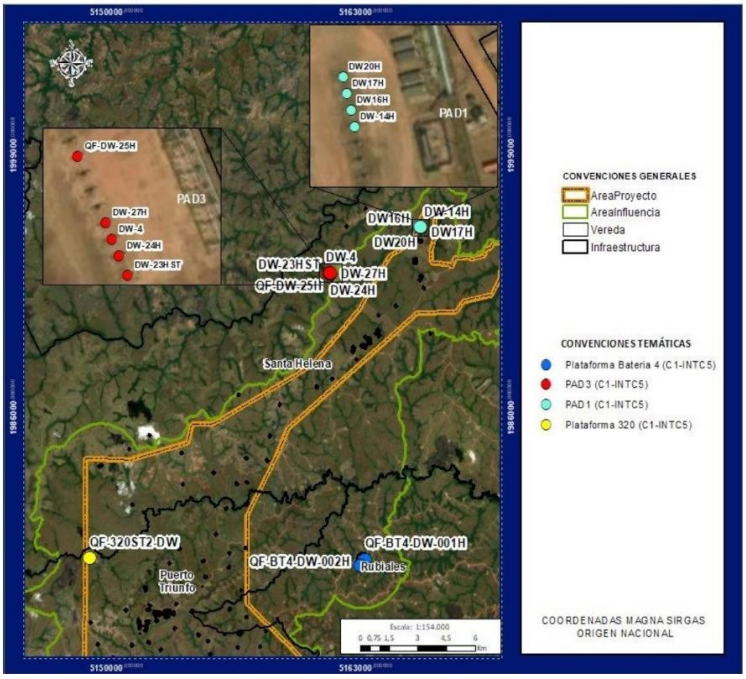
El Campo Quifa cuenta con infraestructura destinada a la disposición e inyección de agua producida en formaciones geológicas autorizadas. Actualmente, el Campo Quifa dispone de 28 pozos inyectores destinados a la disposición de aguas de producción mediante sistemas de inyección por capas. La operación contempla la distribución de la inyección en dos capas de dispersión geológica, con el propósito de evitar la concentración de grandes volúmenes de agua en un solo sector y garantizar una adecuada dispersión dentro del área de explotación.

La primera capa de dispersión corresponde a unidades de la Formación Carbonera asociadas a la unidad C1 y Arenas Intermedias C5, mientras que la segunda capa está conformada por las Areniscas Basales. Dentro de esta infraestructura se incluyen pozos de inyección simple y pozos con inyección dual, permitiendo una distribución operativa del agua producida acorde con las condiciones técnicas y ambientales autorizadas para el campo. A

continuacion en la Figura 12 y Figura 13 se muestran la localizacion de los pozos inyectores para la capa de dispersion 1 y 2.

Figura 12

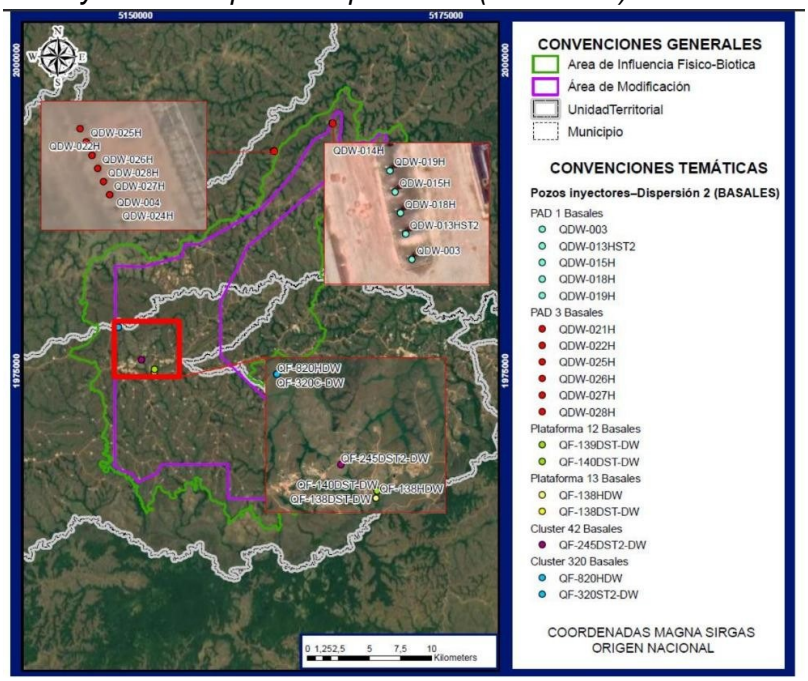
Localización pozos inyectores capa de dispersión 1 (C1-INTC5)



Nota. Tomado de información contenida en el Informe de Cumplimiento Ambiental (ICA) 30, por Frontera Energy, 2025, documento interno.

Figura 13

Localización pozos inyectores capa de dispersión 2 (BASALES)



Nota. Tomado de información contenida en el Informe de Cumplimiento Ambiental (ICA) 30, por Frontera Energy, 2025, documento interno.

Infraestructura asociada al uso doméstico del recurso hídrico

Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP)

El Campamento Base Quifa cuenta con una Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) encargada de tratar el agua proveniente de los pozos de captación subterránea PASUB 2. Primero el agua captada es transportada por un carrotanque hacia el tanque de almacenamiento con capacidad de 20.000 galones. La planta también cuenta con dos tanques de almacenamiento complementarios con la misma capacidad, los cuales permiten regular el suministro y garantizar la continuidad operativa del sistema como se muestra en la Figura 14.

Figura 14

Tanques de almacenamiento - PTAP



Posteriormente, mediante equipos de bombeo el agua es impulsada hacia la planta de tratamiento, donde se desarrolla un proceso fisicoquímico para mejorar la calidad del agua para su uso dentro de las actividades del campamento. Durante el tratamiento se usan sulfato como agente floculante, soda cáustica para la estabilización del pH y cloro como desinfectante. Ver Figura 15.

Figura 15

Químicos usados en PTAP



:La PTAP realiza monitoreos diarios in situ de parámetros como turbiedad, pH, conductividad, cloro residual y color, con el fin de verificar la eficiencia del tratamiento y las condiciones de calidad del agua producida como parte de control operacional.

De acuerdo con la información suministrada por el personal operativo, el proceso de tratamiento no genera lodos en cantidades significativas. Los residuos generados corresponden principalmente a corrientes de agua con alta turbiedad que son recuperadas dentro del sistema por procesos de cloración y retrolavado, favoreciendo el aprovechamiento interno del recurso y la eficiencia operativa de la planta.

Actualmente, la PTAP opera aproximadamente al 70 % de su capacidad de diseño, manejando un caudal cercano a 110 m^3/día, mientras que su capacidad de diseño corresponde aproximadamente a 1 L/s.

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas (PTARD)

El Campamento Quifa también cuenta con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas (PTARD) con el fin de realizar un tratamiento de las aguas residuales generadas por las actividades desarrolladas dentro del campamento. Estas aguas llegan inicialmente a unas cajas conectoras, donde se realiza la separación de las diferentes corrientes generadas, como aguas negras, aguas grises de viviendas y aguas grises procedentes del casino y la lavandería como se muestra en la Figura 16.

Figura 16

Cajas conectoras - PTARD



Posteriormente, estas aguas ingresan al sistema de tratamiento, el cual funciona mediante un proceso biológico de lodos activados con aireación extendida. En este proceso, microorganismos presentes en el sistema degradan la materia orgánica contenida en las aguas residuales, reduciendo así la carga contaminante.

Como complemento al tratamiento biológico, la planta incorpora un sistema de flotación por aire disuelto (DAF), mediante el cual se remueven sólidos suspendidos y partículas presentes en el agua a través de la generación de microburbujas que facilitan la separación de los contaminantes el cual se puede apreciar en la Figura 17.

Figura 17

Sistema de flotación por aire disuelto (DAF)



En cuanto a los productos químicos se usan reactivos como policloruro de aluminio (PAC) como coagulante y polímeros de alta densidad como agentes floculantes. Adicionalmente, la planta dispone de un tanque de igualación que permite regular los caudales de entrada y atender las variaciones asociadas a los periodos de mayor generación de aguas residuales.

La PTARD cuenta con dos líneas de tratamiento operativas, cada una con una capacidad aproximada de 1 L/s, lo que permite manejar un caudal total cercano a 2 L/s. La

Figura 18 muestra los lodos generados durante el proceso, los cuales son retirados periódicamente y transportados hacia Ecoquifa para su secado y posterior manejo.

Figura 18

Lodos dispuestos en Ecoquifa



El funcionamiento de estas plantas de tratamiento representa un componente fundamental para la gestión del recurso hídrico doméstico en el Campo Quifa, permitiendo el tratamiento y disposición final adecuado de las aguas captadas para usos potables y no potables.

METODOLOGÍA

Tipo y enfoque de la investigación

Se realizo una investigación de tipo aplicada, ya que se busca dar respuesta a una necesidad específica del Campo por medio de la formulación de una propuesta conceptual para el aprovechamiento de aguas lluvias como fuente complementaria para usos domésticos e industriales. Asimismo, presenta un **enfoque mixto**, al integrar información cualitativa y

cuantitativa obtenida mediante revisión documental, observaciones en campo y entrevistas al personal operativo, con registros operacionales, datos de precipitación, consumos de agua y estimaciones de oferta hídrica. Esto sirvió de base para el análisis del potencial de aprovechamiento y la aplicación conceptual del modelo Water Pinch para efectuar los cálculos necesarios en el diseño de captación de aguas lluvias.

Recopilación y organización de datos de precipitación

Con el propósito de estimar la oferta potencial de agua lluvia para el Campo Quifa, se realizó la recopilación de información histórica de precipitación a partir de estaciones hidrometeorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Inicialmente se identificaron y evaluaron las estaciones disponibles más cercanas al área de estudio, seleccionándose las estaciones La Esperanza y Puerto Gaitán como las óptimas para el análisis.

Posteriormente, mediante la determinación de la distancia entre cada estación y el Campamento Base Quifa, se estableció que la estación La Esperanza se encuentra aproximadamente a 72,0 km, mientras que la estación Puerto Gaitán se localiza a 76,93 km. Debido a que la diferencia de distancia entre ambas estaciones es de apenas 4,93 km, se procedió a evaluar la disponibilidad y calidad de la información registrada por cada una.

Como resultado, se evidenció que la estación La Esperanza presentaba una disponibilidad limitada y discontinuidad en los registros de precipitación, mientras que la estación Puerto Gaitán contaba con una serie histórica continua de 19 años, correspondiente al periodo 2006–2025. Por lo tanto, la estación Puerto Gaitán fue seleccionada como fuente principal para el análisis de precipitación, ya que ofrece una mayor confiabilidad y completitud de los datos para estimar la oferta potencial de agua lluvia.

Técnicas e instrumentos de recolección de la información

Con el propósito de obtener datos cualitativos y cuantitativos relacionados con el manejo del recurso hídrico en el Campo Quifa se emplearon diferentes técnicas e instrumentos, los cuales permitieron caracterizar la infraestructura existente, analizar el comportamiento del consumo de agua, estimar la oferta de agua lluvia y formular la propuesta conceptual de aprovechamiento las cuales se pueden apreciar en la Tabla 2.

Tabla 2

Técnicas e instrumentos de recolección de la información

Técnica	Instrumento	Información obtenida
Revisión documental	Informes ICA, licencias ambientales, resoluciones, literatura científica, documentos técnicos, información del IDEAM y documentos internos de Frontera Energy.	Información sobre la gestión del recurso hídrico, infraestructura, normatividad, precipitación y antecedentes del proyecto.
Observación directa en campo	Recorridos técnicos, registro fotográfico y bitácoras de campo.	Identificación y caracterización de la infraestructura asociada al abastecimiento, tratamiento, distribución y manejo del recurso hídrico para usos domésticos e industriales.

Entrevistas no estructuradas	Conversaciones con operadores de PTAP, PTARD y personal operativo de Frontera Energy.	Descripción del funcionamiento de los sistemas, procesos operativos, mantenimiento y tratamiento del recurso hídrico.
Revisión de registros operacionales	Base de datos IRIS, registros de captación, consumo de agua, población del campamento y reportes operacionales.	Información para la caracterización de la demanda hídrica y el análisis del comportamiento del consumo de agua.
Recopilación y análisis de información hidrometeorológica	Base de datos de precipitación del IDEAM y hojas de cálculo.	Serie histórica de precipitación utilizada para estimar la oferta potencial de agua lluvia y desarrollar el balance hídrico.

DIAGNÓSTICO DEL MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

DIAGNOSTICO DEL USO DOMÉSTICO DEL RECURSO HIDRICO

Sistema de abastecimiento

se encontró que el Campo Quifa cuenta con dos fuentes de abastecimiento subterráneo PASUB 1 y PASUB 2, lo que le evita depender de un único pozo. Además, existe una sectorización del abastecimiento, ya que ambos pozos atienden usuarios diferentes. PASUB 2 abastece directamente al Campamento Quifa, además de suministrar agua para algunos usos industriales que generalmente son las calderas de Batería 04, pero también puede surtir hacia perforación por bloqueos u otros imprevistos. PASUB 1 capta únicamente para uso doméstico

y abastece zonas como zona 2, zona 3, base militar, Pénjamo. Los caudales han sido suficientes para cubrir la demanda operativa, ya que no se han presentado problemas de desabastecimiento durante el periodo evaluado, sin embargo, el sistema al depender exclusivamente de agua subterránea como fuente de abastecimiento, constituye la principal oportunidad de mejora. A continuación, en la Tabla 3 se muestra con más detalles los usuarios, usos y caudales autorizados para cada pozo.

Tabla 3 *Características de las fuentes de abastecimiento Campo Quifa*

Fuente	Uso	Caudal autorizado	Caudal promedio captado	Principales usuarios
PASUB 1	Doméstico	151,2 m³/día	1,64 L/s 141,696 m³/día	Campamento Petroworks, Zona 2, Zona 3, Policía, Base Militar.
PASUB 2	Doméstico	90.7 m3/día	1,98 L/s 171,072 m³/día	PTAP Campamento Quifa
PASUB 2	Industrial	60.4 m3/día	0,64 L/s 55,296 m³/día	Calderas B4, Equipos de perforación

Nota. Estos caudales fueron obtenidos del Informe de Cumplimiento Ambiental (ICA) 30, por Frontera Energy, 2025, documento interno.

Suministro de agua para uso domestico

Como se mencionó anteriormente, el abastecimiento de agua para uso doméstico del campamento proviene exclusivamente del pozo de captación de agua subterránea PASUB 2, autorizado con los caudales establecidos en el permiso ambiental. La captación es realizada mediante carrotanques operados por la empresa Coltanques, los cuales transportan el agua

hasta la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP), donde inicia el proceso de potabilización previo a su distribución en el campamento.

Cada operación de abastecimiento se encuentra sujeta a un procedimiento de verificación que incluye el registro fotográfico del medidor antes y después de la captación, el diligenciamiento de un formulario digital con información correspondiente a la fecha, hora, volumen captado, empresa responsable y uso del agua, así como la consolidación de estos registros en una base de datos histórica. Adicionalmente, la información es compartida entre las empresas involucradas mediante un canal de comunicación establecido para el seguimiento operativo de las captaciones con el fin de garantizar el control del agua captada y el cumplimiento de los volúmenes autorizados. Este procedimiento permite mantener la trazabilidad de los volúmenes captados, facilitar el seguimiento del cumplimiento de los caudales autorizados y disponer de información confiable para el control operativo del abastecimiento. La Figura 19 muestra el proceso de abastecimiento.

Figura 19

Diagrama de flujo proceso de captación PASUB 2 para uso domestico



Nota. Elaboración propia con apoyo de herramientas de inteligencia artificial.

Distribución del agua potable en el campamento

Una vez finalizado el proceso de tratamiento en la PTAP, el agua es distribuida hacia las diferentes instalaciones del Campamento mediante cuatro líneas independientes, cada una asociada a una unidad compacta de tratamiento. Esta sectorización permite abastecer las diferentes áreas operativas y de servicios del campamento de acuerdo con las necesidades de consumo.

Caracterización del consumo

A pesar de contar con medición del caudal a la salida de cada una de las cuatro unidades de tratamiento de la PTAP, el sistema no dispone de medidores individuales en las diferentes instalaciones abastecidas. Esta condición impide cuantificar el consumo específico de cada unidad operativa, separar el consumo potable / no potable y limita el cálculo de indicadores como el consumo por persona, consumo por vivienda, el consumo de la lavandería o el consumo asociado a los servicios sanitarios. Como consecuencia, el seguimiento del consumo doméstico se realiza de manera agregada para todo el campamento.

Evaluación del sistema de distribución

Volumen promedio diario

Periodo evaluado: **1 de enero al 30 de junio**

Número de días: **181 días**

Volumen total tratado en la PTAP: $15.722\ m^3$

Promedio diario: $\frac{15.722\ m^3}{181\ dias} = 86.86\ m^3/dia$

Dotación aparente: $\frac{86860\ L/dia}{470\ Personas} = 184.8\ L/persona\ dia$

Este valor constituye una aproximación del consumo global asociado a la operación del campamento y no representa exclusivamente el consumo individual del personal, debido a que el agua distribuida también abastece otros servicios e instalaciones como el casino (no

preparación de alimentos), la lavandería, el Taller JS, las baterías sanitarias, el Centro de Operaciones de Emergencia.

(COE), el riego de zonas verdes y otros consumos ocasionales. En consecuencia, este indicador debe interpretarse como una referencia para el análisis del comportamiento del sistema de abastecimiento y no como una dotación estrictamente per cápita.

Durante el periodo de evaluación también se evidenció la presencia de una fuga visible en una de las tuberías de distribución (ver Figura 20), la cual fue reportada para su respectiva atención. Este hallazgo pone de manifiesto la importancia de fortalecer las estrategias de monitoreo de la red mediante una mayor sectorización de la medición, permitiendo detectar de manera más oportuna posibles pérdidas de agua y mejorar el control operativo del sistema.

Figura 20

Fuga identificada durante el periodo de evaluación.



En la Tabla 4 se presenta el diagnóstico para la distribución del agua potable en el campamento Quifa.

Tabla 4

Diagnóstico de la distribución del agua potable - campamento Quifa

Aspecto evaluado	***Diagnóstico***
Sectorización del sistema	*Adecuada, mediante cuatro líneas independientes de distribución.*
Medición en PTAP	*Adecuada, existe medición del caudal suministrado por cada unidad de tratamiento.*
Medición en usuarios finales	*No existen medidores individuales para cuantificar consumos por instalación.*
Identificación de pérdidas	*Limitada debido a la ausencia de medición sectorizada.*
Seguimiento operativo	*No es posible realizarlo por instalación. Se realiza de forma global para todo el campamento.*

Análisis de trazabilidad del agua en el sistema doméstico

Se realizó un análisis de trazabilidad de los volúmenes registrados desde enero hasta junio del presente año, comparando el agua captada para el Campamento Base Quifa con el volumen tratado posteriormente en la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Inicialmente se identificó que la planta de tratamiento de agua potable no recibe únicamente las aguas generadas por el campamento. Se evidenció que también ingresan aguas residuales provenientes de algunos usuarios abastecidos desde el pozo PASUB 1, entre ellos Pénjamo, PAD 3, Base Militar y Zona 3.

Adicionalmente, se identificó que el efluente tratado por la PTARD no es conducido en su totalidad al humedal artificial (wetland), ya que una fracción es reutilizada para el riego de vías internas del campo Quifa. Por esta razón, para determinar el volumen total tratado fue necesario considerar la suma del agua reportada para descarga al wetland y la destinada al riego de vías.

Posteriormente, del volumen total tratado en la PTARD se descontó el aporte correspondiente a los usuarios abastecidos desde el PASUB 1, con el fin de estimar el volumen atribuible exclusivamente al Campamento Base Quifa.

Durante la revisión de los registros de captación asociados al PASUB 1 se identificaron inconsistencias en la descripción de algunos destinos del agua captada. En varios registros aparecen denominaciones compuestas, tales como *"Base Militar – Pénjamo – Control Vara 1"*, *"Policía Rubiales – Metter – Base Militar"*, *"PAD 1 – PAD 3"* y *"Pénjamo – PONAL"*, se mostraron de manera conjunta sin especificar el volumen destinado a cada instalación. Esta condición impide establecer con precisión la distribución individual de los caudales y limita la consolidación de un balance hídrico completamente trazable para cada usuario abastecido.

En consecuencia, los resultados obtenidos deben interpretarse como una aproximación basada en la mejor información disponible y no como un balance exacto del sistema.

Evaluación de la gestión doméstica del recurso hídrico

Consumo de agua

El análisis de los registros de abastecimiento evidencia un consumo de agua elevado en el campamento, con un volumen promedio de 2.620 m³/mes, equivalente a

aproximadamente 87,3 m³/día. Aunque este valor no puede compararse directamente con el consumo residencial per cápita, si permite dimensionar la magnitud de la demanda frente a referencias nacionales. En Colombia, la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA), establece unas dotaciones netas máximas de 32 m3 al mes. En este sentido, el volumen requerido por el campamento resulta significativamente superior al de un consumo residencial convencional, lo cual se explica por la concentración de múltiples usos y servicios dentro de una misma infraestructura y evidencia la importancia de implementar estrategias de uso eficiente y fuentes complementarias de abastecimiento. Adicionalmente, aunque la captación promedio estimada fue de 87,3 m³/día y que se encuentra por debajo del caudal autorizado de 90,7 m³/día; Esta captación representa aproximadamente el 96,3 % del volumen autorizado, lo que indica que la operación mantiene una alta dependencia de la fuente convencional y dispone de un margen muy reducido frente al límite autorizado. Esta situación refuerza la conveniencia de evaluar alternativas como el aprovechamiento de aguas lluvias para disminuir parcialmente la presión sobre la fuente actual.

Trazabilidad del recurso hídrico

Se obtuvo una diferencia aproximada de 89 m³/mes o 2,96 m³/día entre el volumen de agua ingresado al sistema y el volumen tratado como agua residual. Esta diferencia, aunque en teoría representa una fracción pequeña del volumen manejado del volumen total manejado (3,39 %) y puede asociarse a pérdidas normales del sistema, consumos no contabilizados o incertidumbres en los registros operacionales en la práctica resulta ser una cantidad importante de volumen no caracterizado.

Durante el análisis también se identificaron limitaciones en la consolidación de la información histórica de captación, debido a que algunos registros presentan descripciones

generales de los destinos abastecidos sin especificar claramente el usuario final, dificultando de esta manera la reconstrucción completa del recorrido del agua para determinados sectores. Aunque esta situación no afecta significativamente la operación del sistema, representa una oportunidad para fortalecer la trazabilidad y el control de la información.

Evaluación de la calidad del agua

Los registros de monitoreo operacional de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) evidencian que el agua suministrada al Campamento Base Quifa cumple con los parámetros fisicoquímicos establecidos para su uso, manteniendo condiciones adecuadas de turbiedad, pH, conductividad, cloro residual y color durante el periodo evaluado. Las Tablas 5 y 6 presentan los valores de referencia utilizados para la evaluación, los cuales fueron tomados de los reportes in situ diarios realizados por la empresa TECSAAM la cual es encargada de mantener el funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas potables y residuales del campamento.

Tabla 5

Parámetros de referencia para la evaluación de la calidad del agua tratada en la PTAP

Parámetro	unidad	rango de referencia
		6,5 - 9,0
		≤ 1000
		≤ 2
color	UPC	≤ 15
Conductividad	µS/cm	
turbiedad	NTU	
cloro libre	mg/L	0,3 - 2,0

PH Unidad

Tabla 6

Parámetros de referencia para la evaluación de la calidad del agua tratada en la PTARD

Parámetro	unidad	rango
PH	Unidad	5,0 - 9,0
Conductividad	µS/cm	≤ 1400
turbiedad	NTU	≤ 75
color	UPC	≤ 40
cloro libre	mg/L	0,2 - 1,0
Oxígeno disuelto	mg/L	> 5
Temperatura	Celsius	< 40° C

Nota. Los valores presentados corresponden a los rangos de referencia utilizados por la empresa de Tecnología en Saneamiento Ambiental (TECSAAM) para evaluar los monitoreos in situ de calidad del agua reportados en los Informes mensuales de cumplimiento ambiental (ICA).

De igual manera, los controles realizados durante la práctica para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas (PTARD) se encontró que el efluente tratado cumple con los criterios operacionales y ambientales establecidos para su disposición y posterior aprovechamiento dentro del sistema implementado por el campo. Estos resultados reflejan un adecuado funcionamiento de ambas plantas de tratamiento y evidencian la aplicación de un programa de monitoreo permanente que permite verificar la eficiencia de los procesos.

Fortalezas identificadas

- El abastecimiento de agua para el campamento ha sido suficiente para atender la demanda durante el periodo evaluado, sin registrarse eventos de desabastecimiento.

- La PTAP garantiza el tratamiento del agua captada antes de su distribución, asegurando condiciones adecuadas para el consumo humano.
- La distribución mediante cuatro tanques permite sectorizar el suministro y garantizar la continuidad del servicio.
- El sistema cuenta con monitoreos diarios de calidad del agua tanto en la PTAP como en la PTARD, verificando el cumplimiento de los parámetros establecidos.

Oportunidades de mejora

- Implementar medición individual por las principales unidades consumidoras para conocer el consumo específico de cada instalación.
- Fortalecer la trazabilidad de los registros de captación identificando de manera más precisa los usuarios y volúmenes abastecidos.
- Incorporar indicadores de eficiencia hídrica por dependencia que faciliten el seguimiento del consumo y la identificación de oportunidades de ahorro.
- Evaluar la incorporación de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias para abastecer usos que no requieren agua potable, como riego de zonas verdes, lavado de áreas o actividades operativas compatibles, reduciendo la dependencia del agua subterránea.

Síntesis de la evaluación

Para facilitar la interpretación de los resultados del diagnóstico, los componentes fueron evaluados mediante criterios cualitativos construidos a partir de la información recopilada durante el desarrollo del estudio. La clasificación cualitativa no corresponde a una auditoría ni

a una calificación normativa, sino a una interpretación técnica de las condiciones identificadas durante el diagnóstico. A continuación, en la Tabla 7 se presentan los criterios establecidos.

Tabla 7

Criterios cualitativos utilizados para la evaluación del manejo del recurso hídrico

Clasificación	Criterio de evaluación
Adecuado	El componente cuenta con condiciones operativas e infraestructura suficientes para cumplir su función y no se identificaron situaciones relevantes que afecten su desempeño.
Parcialmente adecuado	El componente cumple su función principal; sin embargo, presenta limitaciones relacionadas con el control, seguimiento, medición o trazabilidad que pueden afectar la optimización del sistema.
Oportunidad de mejora	Se identificó una condición susceptible de optimización que, sin representar necesariamente una falla del sistema, podría fortalecer la eficiencia, sostenibilidad o control del recurso hídrico.

Finalmente, con lo anterior, se realizó la Tabla 8 al obtener la información necesaria para realizar la evaluación del sistema.

Tabla 8

Evaluación del manejo del recurso hídrico para uso doméstico del campo Quifa

Componente evaluado	Situación encontrada	Evaluación	Oportunidades de mejora
Abastecimiento	El suministro proviene exclusivamente del pozo PASUB 2. Los caudales captados han sido suficientes para atender la demanda del campamento sin registrarse eventos de desabastecimiento.	☑ Adecuado	Diversificar la fue el aprovechamie lluvias para dependencia subterránea. nto de aguas reducir la del agua
Tratamiento del agua (PTAP)	La PTAP opera mediante tratamiento fisicoquímico y los monitoreos evidencian cumplimiento de los parámetros de calidad para el agua potable.	☑ Adecuado	programa Mantener el monitoreo y preventivo. de mantenimiento
Distribución interna	El agua se distribuye mediante cuatro unidades compactas de tratamiento que abastecen las diferentes instalaciones del	☑ Adecuado	Instalar medidores en los principales puntos de consumo para mejorar el control por dependencia.

Consumo de agua	campamento. La sectorización garantiza continuidad del servicio . El consumo promedio estimado es de aproximadamente 184,8 L/ persona día, representando un consumo elevado. No obstante, se está incluyendo actividades complementarias como casino, lavandería, COE, Taller JS y otros servicios.	⚠ Parcialmente adecuado	Implementar indicadores específicos por área para identificar oportunidades de ahorro y tener un mejor registro de consumo.
Trazabilidad del recurso	Algunos registros históricos presentan inconsistencias en la identificación de los destinos abastecidos.	⚠Parcialmente adecuado	Estandarizar los registros operacionales y mejorar la identificación de los usuarios abastecidos.
Calidad del agua	Los resultados de monitoreo de la PTAP y la PTARD cumplen con los parámetros establecidos, evidenciando un adecuado funcionamiento de ambos sistemas	☑ Adecuado	Continuar con los monitoreos periódicos y la verificación de los parámetros operacionales.
Gestión integral del sistema	. El sistema garantiza el abastecimiento, tratamiento de agua potable y disposición de las aguas residuales; sin embargo, depende completamente del agua subterránea como fuente de suministro.	⚠Oportunidad de mejora	Evaluar e implementar el aprovechamiento de aguas lluvias para usos compatibles para disminuir la presión sobre la fuente subterránea y mejorar la trazabilidad del recurso hídrico.

En términos generales, la gestión del recurso hídrico para uso doméstico en el Campamento Base Quifa presenta un desempeño adecuado en cuanto al abastecimiento, tratamiento, distribución y control de la calidad del agua. Sin embargo, el diagnóstico evidenció oportunidades para optimizar el seguimiento de los consumos y diversificar las fuentes de abastecimiento. Por lo tanto, el aprovechamiento de aguas lluvias se plantea como una alternativa técnicamente viable para complementar el sistema existente, disminuir la presión sobre el recurso subterráneo y fortalecer la gestión integral del agua dentro del campamento.

DIAGNOSTICO DEL USO INDUSTRIAL DEL RECURSO HIDRICO

Abastecimiento de agua para uso industrial

Como parte de uso del recurso hídrico en el Campo Quifa, una fracción del agua captada en el pozo autorizado PASUB 2 tiene como objetivo complementar actividades

industriales, entre ellas las calderas de la locación Batería 4 y equipos de perforación, siendo este el único punto de captación autorizado por la autoridad ambiental para estas actividades.

Reinyección del agua producida

Es el proceso mediante el cual las aguas de formación extraídas conjuntamente con el crudo son sometidas a un tratamiento previo para mejorar sus características fisicoquímicas antes de ser reincorporadas al yacimiento. La reinyección se realiza mediante una estrategia de dispersión en dos capas geológicas, esta permite distribuir los volúmenes de agua inyectados entre diferentes zonas del yacimiento, evitando así concentraciones excesivas en un mismo sector y favoreciendo una operación ambientalmente controlada. Previo a la reinyección, el agua producida es sometida a procesos de tratamiento orientados a la remoción de sólidos suspendidos, separación de aceites, clarificación, acondicionamiento del fluido, entre otros procesos, con el fin de garantizar condiciones adecuadas para su reincorporación al subsuelo. A continuación, en las Tablas 9 y 10, se presentan los volúmenes totales de agua inyectados durante el 2025 para cada una de las capas de dispersión autorizadas.

Tabla 9

Volúmenes totales inyectados por pozo – Capa de dispersión 1 (C1- INTC5)

POZO	PAD 1 (C1-INTC5)	PAD 3 (C1-INTC5)	CLÚSTER 320 (C1-INTC5)	BATERIA 4 (C1-INTC5)
DW14H	6955308			
DW16H	9191499			
DW17H	0			
DW20H	728433			
DW-04		5754102		
DW-23HST		3576238		
DW-24H		6330023		
QF-DW-25H		3046188		
DW-27H		6999767		
QF-DW-320ST2			5804257	

BT4-DW-001H			16174277	BT4-DW-002H
	11841011			
TOTAL	16.802.890	25.706.318	5.804.257	28.015.288
VOLUMEN TOTAL AGUA INYECTADA (C1-INTC5)			76.328.752	

Nota. Elaboración propia a partir de la información reportada en el Informe de Cumplimiento Ambiental (ICA) 30 de Frontera Energy.

Tabla 10

Volúmenes totales inyectados por pozo – Capa de dispersión 2 (BASALES)

POZO	PAD 1 (BASALES)	PAD 3 (BASALES)	PLATAFORMA 12(BASALES)	PLATAFORMA 13 (BASALES)	CLÚSTER 42 BASALES)	CLÚSTER 320 (BASALES)
DW-3	0					
DW-13HST2	20421075					
DW-15H	16515724					
DW-18H	2792988					
DW-19H	18313373					
DW-21H		17964692				
DW-22H		17329090				
DW-25H		2912708				
DW-26H		15690612				
DW-27H		5306433				
DW-28H		16456024				
QF138DSTDW			0			
QF-138HDW			21518118			
QF139DSTDW				7568015		
QF140DSTDW				9317537		
QF245DST2DW					6151432	

QF-320C-DW						12947507
QF-820HDW						28470657
TOTAL	58.043.160	75.659.559	21.518.118	16.885.552	6.151.432	41.418.164
VOLUMEN TOTAL AGUA INYECTADA (BASALES)					219.675.986	

Nota. Elaboración propia a partir de la información reportada en el Informe de Cumplimiento Ambiental (ICA) 30 de Frontera Energy.

Durante el periodo evaluado se inyectó un volumen total de **296.004.738 m³** de agua producida, distribuidos entre las dos capas de dispersión autorizadas, lo que evidencia que la reinyección constituye el principal destino del agua producida dentro del Campo Quifa sin registrarse excedencias en los caudales máximos permitidos para los PAD de inyección. La estrategia de dispersión entre las dos capas geológicas permitió distribuir los volúmenes de agua producida de manera controlada, favoreciendo el cumplimiento de las condiciones operacionales establecidas en la licencia ambiental.

Esta reinyección ha permito reincorporar grandes volúmenes de agua al yacimiento, disminuyendo la necesidad de disposición final y contribuyendo tanto al manejo ambiental del recurso como al mantenimiento de la presión del reservorio. Esta práctica refleja un manejo eficiente del agua asociada a la producción de hidrocarburos y evidencia la implementación de estrategias orientadas al uso sostenible del recurso dentro de la operación.

Reúso y disposición de aguas residuales industriales para riego en vías

Como parte de la gestión del recurso hídrico en el Campo Quifa, una fracción de las aguas residuales industriales (ARI) generadas durante las actividades de perforación (dewatering) es sometida a tratamiento para su posterior aprovechamiento en el riego de vías

internas del campo. Previo a su disposición, estas aguas son tratadas mediante un sistema de ósmosis inversa, complementado con procesos de remoción de sólidos y acondicionamiento químico mediante la adición de coagulantes y floculantes. Posteriormente, el agua tratada es sometida a monitoreos fisicoquímicos con el fin de verificar el cumplimiento de los parámetros establecidos en la licencia ambiental y en la normativa aplicable antes de ser utilizada para el riego de vías.

De acuerdo con la información reportada en el último Informe de Cumplimiento Ambiental (ICA), los resultados de caracterización evidencian el cumplimiento de los valores máximos permisibles para esta actividad, permitiendo la utilización del agua residual tratada como alternativa para el control de material particulado en vías internas del proyecto como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11

ARD usada para riego en vías por Frontera Energy durante el año 2025

VÍA	MES	CAUDAL PROMEDIO DE ARD (L/s)	CAUDAL AUTORIZADO (L/s)	No. DÍAS RIEGO
Vía y Locación QF-975H	jul-25	1,55	1,8	1
Vía y Locación QF-998H	jul-25	1,62	1,8	1
Vía y Locación QF-976H	jul-25	0,44	1,8	1
PROMEDIO L/S			1,2	

Nota. Elaboración propia a partir de la información reportada en el Informe de Cumplimiento Ambiental (ICA) 30 de Frontera Energy.

La información reportada indica que la operación se mantiene dentro de los límites establecidos por la autoridad ambiental. Asimismo, el aprovechamiento de aguas residuales

industriales tratadas para el control de material particulado representa una estrategia de reúso del recurso hídrico al sustituir el empleo de agua fresca en una actividad operativa donde no se requiere calidad de agua potable. Esta práctica contribuye a optimizar el uso del recurso hídrico y reduce la presión sobre las fuentes de abastecimiento destinadas a otros usos dentro del campo.

Entrega de agua para reúso agrícola (SAARA)

El Campo Quifa también entrega una fracción del agua residual industrial tratada al **Sistema de Aprovechamiento de Agua para el Reúso Agrícola (SAARA)**, localizado en el CPF del Campo Rubiales. En esta instalación, el agua recibe el tratamiento requerido para su posterior entrega a la empresa Promotora Agrícola de los Llanos Sucursal Colombia (PROAGROLLANOS), la cual cuenta con concesión vigente para el reúso de aguas residuales tratadas con fines agrícolas. Durante el periodo comprendido entre julio y diciembre de 2025. En la Tabla 12 se puede apreciar el volumen total de agua entregado a SAARA, el cual fue de **4.713.331,77 m³**, evidenciando la magnitud de esta estrategia de aprovechamiento dentro de la gestión hídrica del Campo Quifa.

Tabla 12

Volúmenes de agua residual entregada a SAARA

MES	VOLUMEN (Bbl)	VOLUMEN (m³)
jul-25	4.794.877	762324,55
ago-25	4.391.565	698203,06
sep-25	4.624.721	735271,91
oct-25	5.062.062	804803,57
nov-25	5.018.783	797922,76
dic-25	5.753.956	914805,92
TOTAL	29.645.964	4713331,77

Nota. Elaboración propia a partir de la información reportada en el Informe de Cumplimiento Ambiental (ICA) 30 de Frontera Energy.

Los volúmenes reportados muestran que la entrega de agua tratada al sistema SAARA constituye una de las principales estrategias de aprovechamiento del recurso hídrico implementadas en el Campo Quifa, promoviendo el reúso del recurso y disminuyendo la presión sobre fuentes de abastecimiento convencionales. Esta práctica se alinea con los principios de gestión integral del recurso hídrico y uso eficiente del agua, al favorecer la reincorporación del recurso a actividades productivas compatibles con su calidad, contribuyendo a la economía circular y al aprovechamiento sostenible del agua dentro del área de influencia del proyecto.

Agua de rechazo

El volumen de agua de rechazo generada en el proceso de tratamiento de agua residual industrial en la planta de ósmosis inversa que no cumple con los criterios para reusó o disposición interna es entregado a terceros autorizados para su tratamiento y disposición final. Este proceso se realiza a través de SERPET JR Y CIA. S.A.S., entidad que cuenta con la Licencia Ambiental para esta actividad.

A continuación, en la Tabla 13 se presenta la cantidad, actividad, mes y empresa que dispuso las ARI generadas por Frontera Energy entre el periodo reportado en el Informe de Cumplimiento Ambiental (30).

Tabla 13

Volumen de ARI de rechazo generada y dispuesta

ACTIVIDAD	MES	VOLUMEN ARI (BLS)	VOLUMEN ARI (m^3)	EMPRESA QUE DISPUSO
Planta Osmosis Inversa QMAX SOLUTIONS COLOMBIA	jul-25	4160	661.30	SERPET JR Y CIA S.A.S.Res No. 200-41-11-1525 del 16/09/2011

	ago-25	1000	158.90
	sep -25	500	79.40
Total		5660	899.60

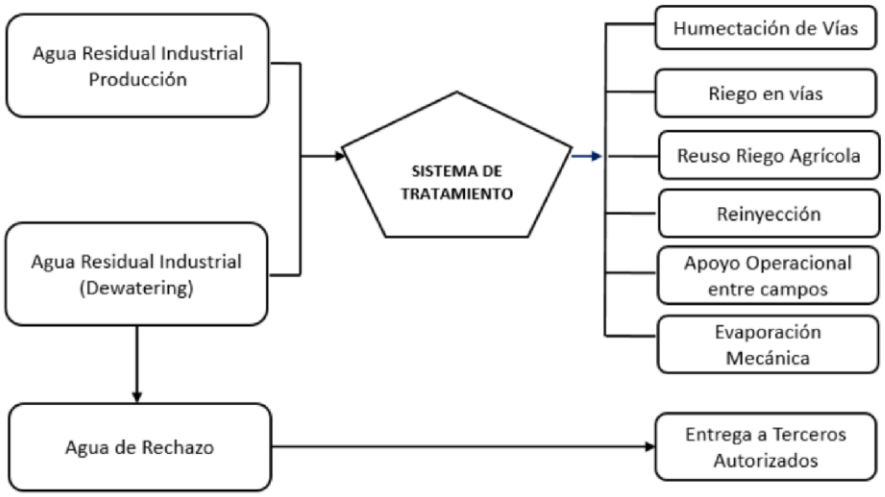
Nota. Elaboración propia a partir de la información reportada en el Informe de Cumplimiento Ambiental (ICA) 30 de Frontera Energy.

Aunque el agua de rechazo representa un flujo residual dentro del sistema de tratamiento industrial, su gestión controlada complementa las demás estrategias implementadas en el campo, como la reinyección, el reúso para riego de vías y la entrega de agua al sistema SAARA.

En la Figura 21 se puede apreciar en conjunto estas acciones, reflejando un enfoque integral del manejo del recurso hídrico, donde únicamente los volúmenes que no pueden ser aprovechados son destinados a disposición externa autorizada.

Figura 21

Esquema general de la gestión del agua industrial en el Campo Quifa.



Nota. Elaboración propia a partir de la información reportada en el Informe de Cumplimiento Ambiental (ICA) 30 de Frontera Energy.

Evaluación de la gestión industrial del recurso hídrico

En términos generales, se evidencia un sistema de gestión consolidado, respaldado por infraestructura especializada y por diferentes alternativas de reutilización del recurso hídrico, contribuyendo a disminuir la demanda de agua de fuentes convencionales y a el cumplimiento de los requerimientos ambientales establecidos para la operación.

Finalmente, en la Tabla 14 se puede evidenciar el resultado de la evaluación del manejo del recurso hídrico para uso industrial en el campo Quifa.

Tabla 14

Evaluación del manejo del recurso hídrico para uso industrial del campo Quifa

Componente evaluado	Estado	Observación
Abastecimiento industrial	☑ Adecuado	Caudal de un único pozo, suficiente y controlado.
Tratamiento del agua producida	☑ Adecuado	Infraestructura especializada para un adecuado tratamiento garantizando el cumplimiento normativo ambiental vigente. (CMA y Batería 4).
Reinyección	☑ Adecuado	Principal estrategia de aprovechamiento del agua producida.
Reúso para riego de vías	☑ Adecuado	Aprovechamiento en actividades compatibles.
Reúso agrícola (SAARA)	☑ Adecuado	Favorece la economía circular del recurso hídrico.

Disposición de agua de rechazo	☑ Adecuado	Entrega a gestor ambiental autorizado cumpliendo con las normas ambientales aplicables.
Dependencia de un único pozo de agua subterránea	⚠ Oportunidad de mejora	Existe potencial para incorporar fuentes alternativas como agua lluvia.

Síntesis de la evaluación

La gestión industrial del recurso hídrico en el Campo Quifa se caracteriza por priorizar el tratamiento, la reutilización y el aprovechamiento del agua producida antes de su disposición final. La reinyección representa la principal estrategia de manejo del recurso, complementada por el reúso en actividades operativas y agrícolas, así como por mecanismos de disposición controlada para los volúmenes que no pueden ser aprovechados.

Por consiguiente, la propuesta de aprovechamiento de aguas lluvias desarrollada en el presente trabajo no busca sustituir las estrategias actualmente implementadas, sino complementarlas mediante la incorporación de una fuente alternativa de abastecimiento que pueda destinarse a usos compatibles, fortaleciendo la gestión integral del recurso hídrico y disminuyendo la dependencia del agua subterránea en aquellos procesos donde sea técnicamente viable.

Fortalezas identificadas

- Gran parte de las necesidades operativas son cubiertas mediante el tratamiento y aprovechamiento del agua producida.

- El Campo Quifa dispone de infraestructura altamente especializada, lo que permite realizar procesos de separación, acondicionamiento y almacenamiento antes de su reutilización o disposición.

- Se implementan estrategias de aprovechamiento del recurso, como el reúso de aguas residuales industriales para riego de vías y la entrega de agua tratada al sistema SAARA para su posterior aprovechamiento agrícola, favoreciendo un uso más eficiente del agua.

- El agua de rechazo generada durante el tratamiento mediante ósmosis inversa garantiza una disposición final acorde con la normatividad vigente.

Oportunidades de mejora

- La operación continúa dependiendo de agua subterránea para algunos procesos industriales específicos, por lo que resulta conveniente evaluar fuentes complementarias de abastecimiento para aquellos usos que no requieren una alta calidad de agua potable.

- Existe la posibilidad de ampliar la diversificación de fuentes mediante la incorporación de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en actividades compatibles, reduciendo progresivamente la presión sobre las fuentes subterráneas.

- El fortalecimiento de indicadores de eficiencia hídrica permitiría realizar un seguimiento más detallado al desempeño de cada una de las estrategias de reúso implementadas en la operación.

- La integración de nuevas alternativas de aprovechamiento debe considerar las condiciones operativas existentes y aprovechar la infraestructura ya instalada, favoreciendo una implementación gradual y técnicamente viable.

Análisis de datos de precipitación

Para el análisis de los resultados, como se mencionó en la metodología finalmente se escogió la estación Puerto Gaitan con código 35120010 y coordenadas (-72.078712, 4.306025) ya que poseía la mayor cantidad de datos y era la más cercana al campamento. Posteriormente se realizó un Excel con los datos de precipitación anual y mensual. En la Figura 22 se puede observar la ubicación de la estación y del campamento Quifa.

Figura 22

Ubicación estación meteorológica Puerto Gaitan y el campamento Quifa



Nota. *Tomado de imágenes satelitales de Google Earth. agosto 2026.*

La Tabla 15 y la Figura 23 presentan una recopilación de los datos pluviométricos obtenidos de la estación Puerto Gaitan siendo esta la que presenta mayor rango de datos. Estos registros abarcan un período de 19 años, desde 2006 hasta 2025, con mediciones mensuales de precipitación expresadas en milímetros. Cada dato está asociado a su respectiva estación meteorológica de origen, permitiendo una trazabilidad precisa de la información. En esta tabla se ven las tendencias pluviométricas durante 19 años, constituyendo una base sólida para analizar y proponer el sistema de aprovechamiento de aguas lluvias del presente estudio.

Tabla 15

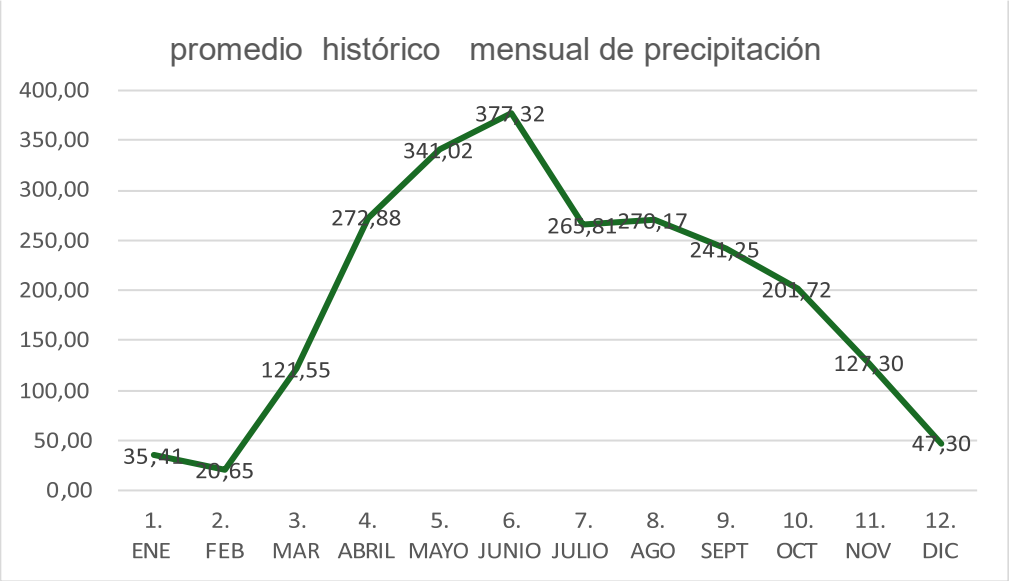
Precipitaciones históricas mensuales (2006-2025)

AÑO/MES	1. ENE (mm)	2. FEB (mm)	3. MAR (mm)	4. ABRIL (mm)	5. MAY (mm)	6. JUN (mm)	7. JUL (mm)	8. AGO (mm)	9. SEPT (mm)	10. OCT (mm)	11. NOV (mm)	12. DIC (mm)	PROM ANUAL (mm)
2006	51	0	158	180	418	263	257	335	183	342	136	15	194.83
2007	0	9	194	195	478	459	199	212	240	121	117	26	187.50
2008	0	5	3	271	411	396	243	343	264	97	126.8	20	181.65
2009	100.1	30.4	103.3	108.7	338.7	525	325.7	375.2	444	246	156.3	22	231.28
2010	0	44	214	270	288	258	294	409	93	207	224	68	197.42
2011	20	0	76	346	400	372	263	276	418	93	104	131	208.25
2012	0	57	173	196	357	525	403	196	196	369	66	38	214.67
2013	0	4	94.5	217.4	532.5	312.2	201.8	282	239.4	209.8	55.4	41.5	182.54
2014	0	11.3	33.1	350.5	349.1	428.1	393.7	253.2	365.6	403	127	80	232.88
2015	65	4	50	266	187	331	353	217	161	130	307	55	177.17
2016	0	3	99	434	147	542	189	176	243	274	128	67	191.83
2017	9	7	178	224	171	98	146	225	292	111	95	23	131.58
2018	40	0	210	377	346	420.5	260	211	150	143	26	30	184.46
2019	0	0	46	273	345	572	331	379	214	218.5	139.5	43.5	213.46
2020	55.5	2.9	55	291	354	290	246	129	234	208	139	63	172.28
2021	80	0	154	248	471	378	301	241	300	199	35	1	200.67
2022	0	36	126	391	372	349	310	284	260	163	218	0	209.08
2023	60	0	85	240	287	286	174	363	119	163	34	170	165.08
2024	0	182	239	272	263	393	205	103	135	188	175	52	183.92

2025	148	5 203.83	140	307	305	366	221	394	274	149	137	0	
PROM MES (mm)	35,41	21	121,55	272,88	341	377,32	265,81	270,17	241,25	201,72	127,3	47,3	2.322

Figura 23

Grafica promedio histórico de precipitación mensual



Nota. Elaboración propia a partir de datos pluviométricos de la estación Puerto Gaitán, obtenidos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Durante el periodo comprendido entre 2006 y 2025, la mayor precipitación mensual registrada correspondió a julio de 2019, con un valor de 572 mm. En contraste, la menor

precipitación registrada fue de 0 mm, valor que se presentó en diferentes meses y años del periodo analizado.

Al observar el patrón estacional reflejado en la gráfica, se aprecia que hay meses con niveles de precipitación significativamente más altos que otros. Los picos de lluvia se concentran principalmente entre los meses 4 a 9 (abril-septiembre). Estos serían los períodos en los que el sistema de captación debe estar preparado para manejar los mayores volúmenes de agua lluvia.

Por el contrario, los meses más secos son enero, febrero y diciembre, donde la precipitación promedio puede llegar a descender por debajo de los 50 mm.

Lo anterior indica que el sistema deberá contar con la capacidad de almacenamiento suficiente para aprovechar eficientemente el agua captada durante los períodos lluviosos y poder utilizarla en los meses con menos precipitación.

Finalmente, al considerar el promedio anual de precipitaciones, que ronda los 2.322 mm, se puede tener una estimación general de la disponibilidad a lo largo del año.

Balance hídrico

Para la elaboración del balance hídrico del campamento, se identificaron las entradas, la distribución y los principales puntos de consumo de agua dentro del sistema. Se analizaron los volúmenes de agua captados desde PASUB2, su ingreso al sistema de tratamiento de agua potable (PTAP) y su posterior distribución hacia las diferentes áreas del campamento. A partir de esta información, se realizó la comparación entre los volúmenes de entrada y los volúmenes distribuidos, permitiendo identificar posibles diferencias y establecer el comportamiento general del recurso hídrico dentro del campamento durante el periodo evaluado.

Volumen de agua captada de PASUB 2

En la Tabla 16 se muestra el volumen de captación realizado desde PASUB 2 para uso doméstico, por su parte la Tabla 17 muestra el volumen captado para uso industrial mes a mes durante el periodo de estudio.

Tabla 16

Entradas de agua al campamento Quifa

Mayo	2.684
Junio	2.500
Total	15.722
Promedio	2.620

Mes	**Total Entrada PTAP campamento (m3)**
Enero	2.647
Febrero	2.498
Marzo	2.788
Abril	2.605
mensual	

Tabla 17

Entradas de agua a Batería 04

Mes	**Total Entrada Batería 04 - Calderas (m3)**
Enero	1.440
Febrero	835
Marzo	953

Abril	940
Mayo	778
Junio	852
Total	5.798
Promedio mensual	966

Entre enero y junio se registró un volumen acumulado de 15.722 m³ de agua destinada al abastecimiento del Campamento, con un promedio mensual de 2.620 m³. El mayor volumen se presentó en marzo, con 2.788 m³, mientras que el menor correspondió a febrero, con 2.498 m³.

Estos volúmenes corresponden al abastecimiento global del campamento y no representan exclusivamente el consumo directo de la población, debido a que incluyen los diferentes usos asociados a las instalaciones y actividades operativas, entre ellos servicios sanitarios, casino, lavandería, riego, COE, Taller JS y otros consumos.

En el caso de Batería 04 se registró un volumen acumulado de 5798 m³ de agua captada para las calderas. Con un promedio mensual de 966 m³. El mayor volumen fue de 1.440 m³ en el mes de enero y el menor fue de 835 m³ en febrero. Lo que evidencia una variación moderada en el volumen de abastecimiento durante el periodo analizado para ambos casos.

Salidas

En la Tabla 18 se muestran los datos correspondientes a el agua proveniente de PASUB 1, el ARD dispuesta en el sistema Wetland, la reportada para riego en vías y el total de agua tratada por la Planta.

Tabla 18

Salidas del recurso hídrico del campamento Quifa

Mes	**Agua a Wetland (m3)**	**Agua pasub 1 (m3)**	**Riego de vías (m3)**	**Total salida PTARD (m3)**
Enero	1802	558	1246	3048
Febrero	2252	799	1140	3392
Marzo	2455	1228	1215	3670
Abril	2765	1098	885	3650
Mayo	3806	1207	196	4002
Junio	2916	1202	604	3520
Total	15996	6092	5286	21282
Promedio mensual	2666,000	1015,3	881	3547,0

El agua de PASUB 1 entra a la PTARD como un aporte adicional y posteriormente sale hacia Wetland o riego de vías. Por tanto, ya está incluida dentro del agua residual tratada que sale. Es decir, dentro de esos 21.281 m³ hay 6.092 m³ asociados al aporte de PASUB 1.

Uso del Recurso Hídrico del campamento Base Quifa

A continuación, en la Tabla 19 se presentan las principales unidades consumidoras del recurso hídrico identificadas en el campamento Quifa.

Tabla 19

Principales unidades consumidoras del campamento Quifa

Unidad o actividad	**Tipo de uso**	**Observación**
Casas	Doméstico	Consumo identificado de agua potable asociado a duchas, lavamanos y baños de las casas.

Baños	Doméstico	Asociados a diferentes instalaciones alrededor del campamento
Casino	Doméstico/servicios	Preparación de alimentos y actividades asociadas
Lavandería	Servicios	Consumo diario de agua potable
COE	Operacional/emergencias	Consumo variable
Taller JS	Operacional	Consumo variable
Otros puntos	Diversos	Lavamanos, grifos y lavaderos instalados alrededor del campamento para riego de plantas, lavado de traperos, entre otros. (Dificultan la sectorización)

Balance de volúmenes entre el abastecimiento y el agua residual atribuibles al campamento

En la Tabla 20 se muestran los datos volumétricos del total de agua que trató la PTARD, el aporte proveniente de PASUB 1, el volumen total de agua residual atribuible al campamento y la diferencia de volúmenes entre la PTAP y la PTARD.

Tabla 20

Diferencia de entradas y salidas del recurso hídrico para el campamento Quifa

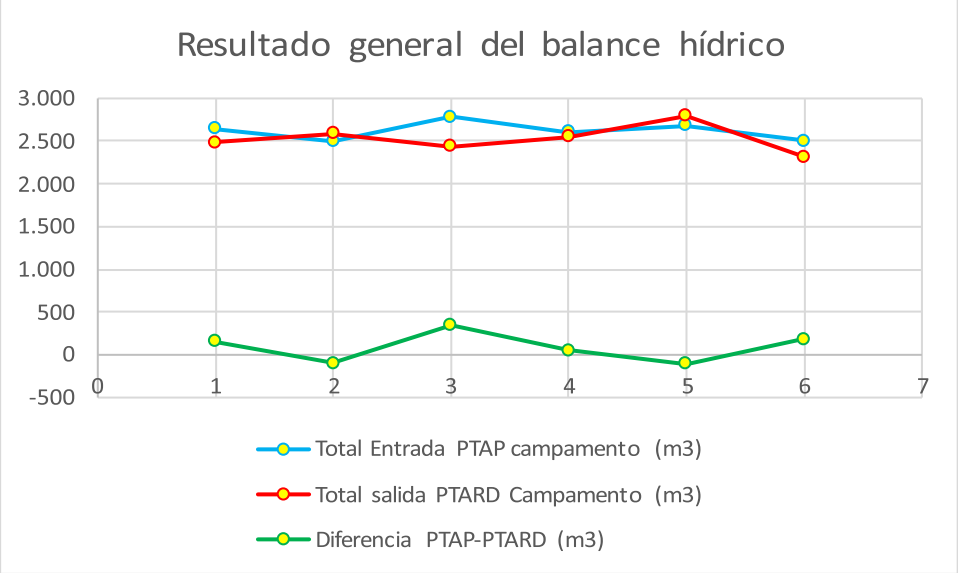
Mes	**Total Entrada PTAP campamento (m3)**	**PASUB 1 (m3)**	**Total salida PTARD (m3)**	**Total salida PTARD Campamento (m3)**	**Diferencia PTAP-PTARD (m3)**
Enero	2.647	558	3048	2.490	157
Febrero	2.498	799	3392	2.593	-95
Marzo	2.788	1.228	3670	2.442	346
Abril	2.605	1.098	3650	2.552	53
Mayo	2.684	1.207	4001	2.794	-110

Junio	2.500	1.202	3520	2.318	182
Total	15.722	6.092	21281	15.189	533
Promedio mensual	2.620	1.015	3546,8	2.532	89

Con base en estos datos se realizó la Figura 24 la cual presenta el resultado general del balance hídrico, comparando el agua de entrada al campamento con el agua de salida atribuible al campamento y la diferencia de volúmenes de agua.

Figura 24

Diferencia de entrada y salida de agua en el campamento Quifa



Los valores positivos indican que ingresaron más m³ de agua al sistema de los que fueron registrados posteriormente como salida atribuible al campamento.

No necesariamente significa que se hayan perdido. Puede estar asociado a: Consumo en preparación de alimentos, consumo humano, lavandería, riego, evaporación, agua retenida

temporalmente, consumos no medidos, fugas, diferencias de medición, otros usos operacionales e incertidumbre de los instrumentos.

Los valores negativos indican que se registraron más m³ de agua de salida que de entrada a la PTAP. Esto indica es que existe una diferencia en la correspondencia entre los registros de entrada y salida.

Puede deberse a: Aportes de otras fuentes, diferencias temporales entre las mediciones, agua almacenada previamente, errores o incertidumbre de medición o flujos que no fueron contabilizados en el mismo periodo.

Con los resultados obtenidos podemos calcular lo siguiente:

Agua residual Campamento = Salida total PTARD − Aporte PASUB1

Agua residual Campamento = 21.281 m³ − 6.092 m³ = **15.189 m³** Por

lo tanto, durante enero-junio:

Entrada al Campamento: 15.722 m³

Salida atribuible al Campamento: 15.189 m³

El promedio mensual de la salida atribuible: ≈ 2.532 m3/mes

Diferencia promedio: = 88,83 ≈ 89 m3/mes

Por lo tanto, la relación entre el agua residual retornada y el agua suministrada es:

$$\frac{15189}{15722}\, x\, 100 = 96.6\,\%$$

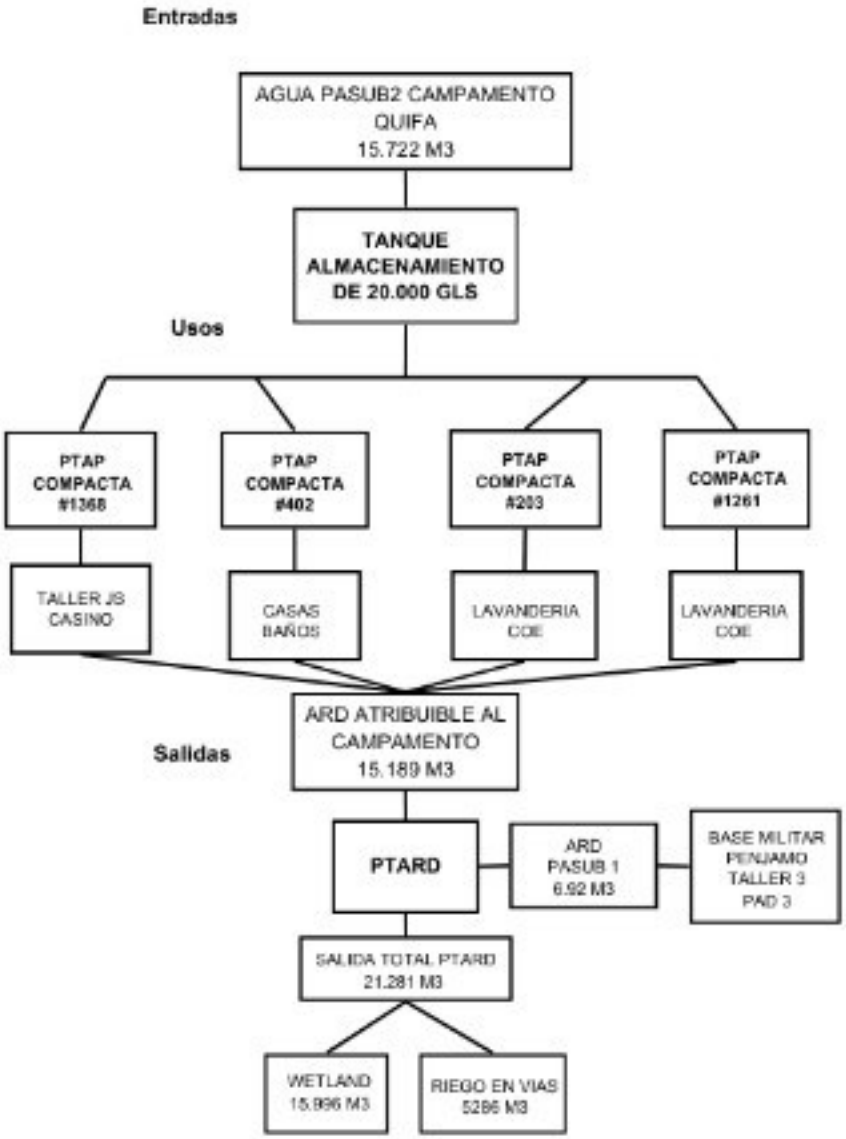
Es decir, aproximadamente el 96.6 % del volumen suministrado al campamento aparece posteriormente como agua residual atribuible al mismo, según los registros

analizados. El 3.4 % del volumen aproximado restante pudo ser debido a los factores mencionados anteriormente.

Finalmente, con la información compilada se realizó la Figura 25 en donde se aprecia el flujo general que tiene el recurso hídrico en el campamento Quifa desde su captación hasta su disposición final, incluido los aportes de PASUB 1 y mostrando los volúmenes generados en cada proceso.

Figura 25

Diagrama de flujo del recurso hídrico en el campamento Quifa



Cumplimiento normativo de captación

Adicionalmente en la Tabla 21 se evaluó el cumplimiento de captación autorizado por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA durante el periodo evaluado.

Tabla 21

Verificación del volumen captado frente al caudal autorizado para uso domestico

Indicador	Resultado
Periodo evaluado	Enero–junio
Días evaluados	181 días
Caudal máximo autorizado	90,7 m³/día
Volumen máximo autorizado para el periodo	16.416,7 m³
Volumen total captado	15.722 m³
Captación promedio	86,86 m³/día
Diferencia frente al límite	3,84 m³/día
Porcentaje de utilización del caudal autorizado	95,77 %
Resultado de la comparación acumulada	**Dentro del límite autorizado**

Resultado general del balance

A continuación, la Tabla 22 presenta de manera general el resultado del balance hídrico obtenido para el campamento Quifa.

Tabla 22

Resultado general del balance hídrico

Indicador	Resultado
Entrada acumulada a PTAP	**15.722 m³**
Salida total PTARD	**21.281 m³**
Aporte PASUB 1	**6.092 m³**
Salida PTARD atribuible al campamento	**15.189 m³**
Diferencia del balance	**533 m³**
Promedio mensual de entrada	**2.620 m³/mes**
Promedio mensual de salida atribuible	**2.532 m³/mes**
Diferencia promedio	**89 m³/mes**

Oferta potencial de aprovechamiento de agua lluvia

Precipitación

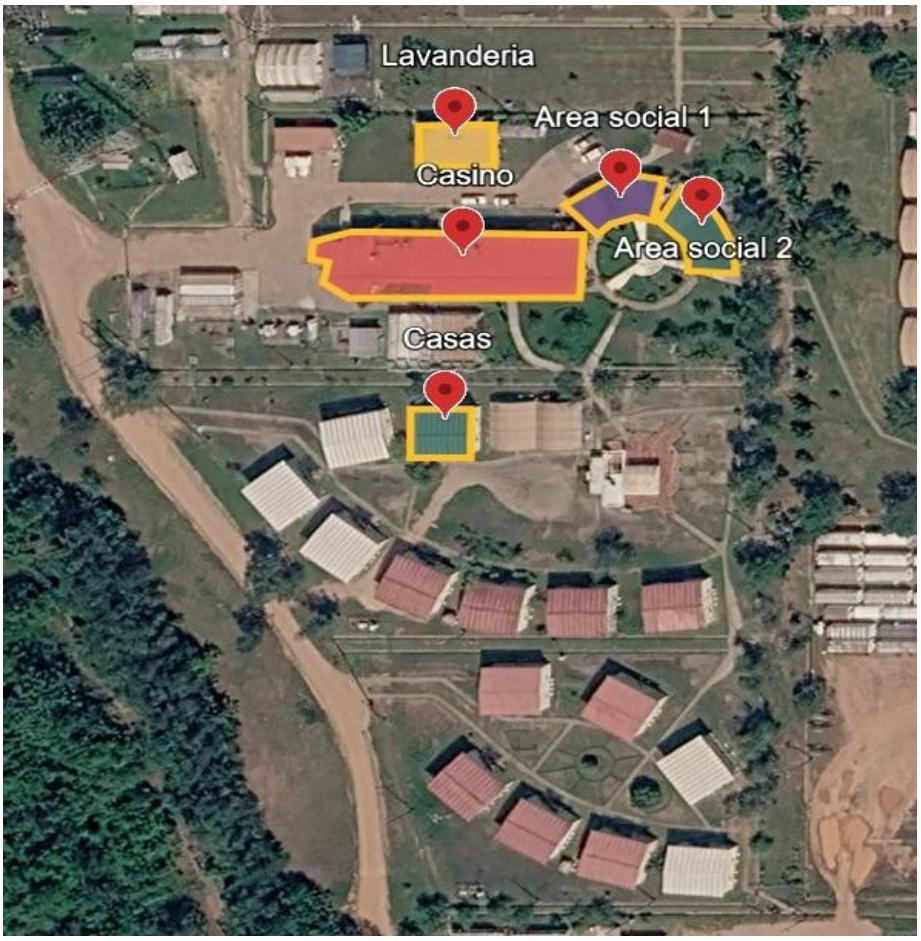
Como se indicó anteriormente en el análisis de datos de precipitación, se obtuvo una precipitación anual promedio de 2322.58 mm

Superficies potenciales de captación

En la Figura 26 se puede apreciar el área de las superficies potenciales para la captación de agua lluvia que se encuentran en el campamento.

Figura 26

Vista aérea de las superficies potenciales de captación



Nota. *Tomado de imágenes satelitales de Google Earth, agosto 2026.*

Con base en las áreas generadas por Google Earth se realizó la Tabla 23 para las superficies potenciales de captación.

Tabla 23

Superficies potenciales de captación

Superficie	Área (m²)	Uso actual

Cubiertas de viviendas	167,47 X(16CASAS)	Habitacional
Casino	940,84	Alimentación
Lavandería	176,84	Servicios
Sede social 1	193,63	Operacional
Sala social 2	213,86	Operacional

Dado que las casas tienen las mismas dimensiones se multiplica el valor obtenido de la casa de referencia por las 15 casas con superficies aprovechables para la captación del agua lluvia.

Realizando la suma de las respectivas superficies se obtuvo un total de área potencial de captación de 4.037,22 m2

Oferta potencial mensual

Para hallar la oferta potencial de captación del agua lluvia se multiplico la precipitación histórica promedio para cada mes, el área potencial total de captación y el coeficiente de escorrentía. Los resultados se evidencian en la Tabla 24.

Tabla 24

Oferta potencial mensual de aprovechamiento de agua lluvia

Mes	**Precipitación promedio (mm)**	**Área (m²)**	**C = 0,90**	**Oferta potencial de captación (m³)**
Enero	35,41	4.037,22	0,9	128,662164
Febrero	20,648	4.037,22	0,9	75,0244667
Marzo	121,55	4.037,22	0,9	441,651682

Abril	272,88	4.037,22	0,9	991,508934
Mayo	341	4.037,22	0,9	1239,02282
Junio	377,32	4.037,22	0,9	1370,99147
Julio	265,81	4.037,22	0,9	965,820103
Agosto	270,17	4.037,22	0,9	981,662155
Septiembre	241,25	4.037,22	0,9	876,581393
Octubre	201,72	4.037,22	0,9	732,949217
Noviembre	127,3	4.037,22	0,9	462,544295
Diciembre	47,3	4.037,22	0,9	171,864455
Total anual	2322,358	4.037,22	0,9	8438,28315

Se obtuvo que la precipitación anual de **2.322,358 mm** genera una oferta potencial anual de aproximadamente **8.438,28 m³**.

Los resultados muestran una variabilidad estacional de la oferta de agua lluvia evidenciando que la disponibilidad de agua lluvia no es constante y que cualquier sistema de aprovechamiento deberá considerar la variabilidad temporal de la precipitación y la capacidad de almacenamiento.

Este volumen representa el potencial teórico de captación bajo las condiciones de precipitación consideradas y no corresponde necesariamente al volumen efectivamente disponible para consumo, debido a que posteriormente deben considerarse factores como las pérdidas iniciales por lavado de las superficies, eficiencia de conducción, capacidad de almacenamiento y las características del uso final.

Entrada promedio a la PTAP: 2.620 m3/mes

Oferta anual de agua lluvia disponible para captación: 8.428,28 m3/año

Aplicación del modelo Water Pinch en la gestión del recurso hídrico

Fuentes hídricas disponibles

En la Tabla 25 se muestran las fuentes hídricas disponibles identificadas para el campo Quifa

Tabla 25

Fuentes hídricas disponibles

Fuente	**Tipo**	**Uso actual**	**Función**
PASUB 1	Subterránea	Doméstico	Fuente convencional
PASUB 2	Subterránea	Doméstico e industrial	Fuente convencional
Agua lluvia	Pluvial	Sin aprovechamiento sistemático	**Fuente alternativa**

Identificación de unidades consumidoras

Se identificaron las unidades consumidoras del recurso hídrico para uso doméstico e industrial como se aprecia en la Tabla 26

Tabla 26

Unidades consumidoras campo Quifa

Identificación de unidades consumidoras	
Domestico	•Casas. •Baños. •Casino. •Lavandería. •Taller JS.

	•COE. •Riego. •Otros consumos ocasionales.
Industrial	•Calderas batería 04. •Perforación

Caracterización de la oferta y demanda hídrica

En la Tabla 27 se presenta la caracterización de la oferta y demanda hídrica con los datos obtenidos anteriormente.

Tabla 27

Oferta vs demanda hídrica

OFERTA HIDRICA		DEMANDA HIDRICA	
Parámetro	**Valor**	**Parámetro**	**Valor**
Área potencial de captación	4.037,22 m²	DOMESTICO	2.620 m3/mes (Incluido consumos potables y no potables)
Coeficiente de escorrentía	0,9	INDUSTRIAL	1.040,7 m3/mes (966 m3/mes Calderas)
Precipitación anual promedio	2.322,358 mm		
Oferta potencial anual	**8.438,28 m³/año**		

Clasificación de los requerimientos de tratamiento

En la Tabla 28 se identificaron los requerimientos de tratamiento para cada unidad receptora y la fuente alternativa con potencial de acoplamiento. A pesar de que se presentan

consumos potables y no potables no es posible realizar una separación de los mismos debido a la sectorización establecida en el campamento y la ausencia de medidores para cada unidad como se mencionó anteriormente.

Tabla 28

Requerimientos de tratamiento para cada unidad receptora

Unidad receptora	Tratamiento requerido	Fuente alternativa potencial
Casas	Agua tratada	Agua lluvia → PTAP
Sanitarios	No potable	Agua lluvia
Riego	No potable	Agua lluvia
Limpieza	No potable	Agua lluvia
Lavandería	Agua tratada	Agua lluvia → PTAP
Calderas Batería 04	Según requerimiento operacional	Agua lluvia → BATERÍA 4 →CALDERAS

Debido a la ausencia de medición individualizada, estas demandas no fueron cuantificadas dentro del balance Water Pinch, pero se reconocen como potenciales puntos de sustitución.

Identificación de oportunidades de sustitución

A partir de la caracterización de las fuentes de abastecimiento, las unidades consumidoras, la oferta potencial de agua lluvia y las demandas identificadas, se elaboró la

Tabla 29 en la que se establecieron tres escenarios potenciales de acoplamiento o sustitución. Estos corresponden a: (1) incorporación del agua lluvia al sistema de tratamiento para abastecimiento doméstico, (2) utilización de agua lluvia en usos domésticos no potables y (3) integración parcial del agua lluvia aprovechable con el agua subterránea captada para las calderas de Batería 04.

Tabla 29

Identificación de usos, demandas y escenarios potenciales de acoplamiento o sustitución mediante la integración de agua lluvia

Fuente actual	Uso	Unidad consumidora	Escenario	Sistema actual	Oferta actual autorizada	Fuente alternativa	Oferta potencial lluvia	Demanda caracterizada	Compatibilidad preliminar	Calidad requerida
PASUB 2	Doméstico potable	Casas	1	PASUB 2 → PTAP → consumo doméstico	33.105,5 m³/año.	Agua lluvia → PTAP → consumo doméstico	8.438,28 m³/año	2.620 m³/mes	Potencialmente sí, previa integración al tratamiento	Potable
		Casino	1	PASUB 2 → PTAP → casino	33.105,5 m³/año.	Agua lluvia → PTAP → casino	8.438,28 m³/año			Potable
		Lavandería	1	PASUB 2 → PTAP → lavandería	33.105,5 m³/año.	Agua lluvia → almacenamiento → lavandería	8.438,28 m³/año			Potable
	Doméstico no potable	Baños	2	PASUB 2 → PTAP → usos no potables	33.105,5 m³/año.	Agua lluvia → almacenamiento → baños	8.438,28 m³/año	2.620 m³/mes	Potencialmente sí	No potable

	Otros usos	2	PASUB 2 → PTAP → Otros usos	33.105,5 m³/año.	Agua lluvia → almacenamiento → Otros usos	8.438,28 m³/año				No potable
	Taller JS / COE	2	PASUB 2 → PTAP → servicios	33.105,5 m³/año.	Agua lluvia → almacenamiento → servicios	8.438,28 m³/año				Según uso
Industrial	Calderas Batería 04	3	PASUB 2 → uso industrial → Calderas	22.046 m³/año.	Agua lluvia → Calderas Batería 04	8.438,28 m³/año	966 m³/mes	Sí, previa integración al tratamiento		Según especificación operacional

Definición de corrientes de oferta y demanda

Para la aplicación de la metodología Water Pinch, fue necesario identificar y definir las corrientes de oferta y demanda que intervienen en el sistema de aprovechamiento. Estas corrientes permiten establecer las fuentes de agua disponibles y los puntos o unidades que requieren el recurso, sirviendo de base para el análisis de las oportunidades de reutilización y aprovechamiento.

En la Tabla 30 se presentan las corrientes de oferta y demanda identificadas, junto con las principales características consideradas para la aplicación de la metodología Water Pinch.

Tabla 30

Corrientes de oferta y demanda utilizadas en la aplicación del Water Pinch.

Código	Tipo	Fuente / demanda	Unidad consumidora	Uso	Periodo	Volumen caracterizado	Calidad requerida	Escenario	Observación
O1	Oferta alternativa	Agua lluvia	Superficies de captación	Fuente alternativa	Mensual/ anual	**8.438,28 m³/año**	Por determinar según destino	Todos	Oferta potencial calculada con 4.037,22 m² y C=0,90

F1			PTAP		Anual			1	
	Fuente convencional	PASUB 2		Doméstico		**33.105,5 m³/año autorizados**	Potable después de tratamiento		Corresponde al volumen autorizado
D1	Demanda	Campamento	Casas, casino y demás usos	Doméstico	Mensual	**2.620 m³/mes**	Potable/no potable	1	Demanda global; no separada por uso
D2	Demanda	Campamento	Baños, riego, lavandería, taller JS, COE	Doméstico no potable	Mensual	**Incluido en la demanda 1 (D1)**	No potable	2	No existen medidores independientes
F2	Fuente convencional	PASUB 2	Uso industrial	Industrial	Anual	**22.046 m³/año autorizados**	Según requerimiento operacional	3	Volumen autorizado
D3	Demanda	Uso industrial	Calderas Batería 04	Industrial	Ene-Jul	**7.285 m³**	Según requerimiento operacional	3	Demanda real registrada
D3-P	Demanda promedio	Uso industrial	Calderas Batería 04	Industrial	Mensual	**1.040,7 m³/mes**	Según requerimiento operacional	3	Promedio enero-julio

Balance mensual e indicadores de cobertura y sustitución potencial

A partir de la relación entre la oferta potencial mensual de agua lluvia y la demanda doméstica estimada, se calcularon los indicadores de cobertura, sustitución potencial y balance mensual. Los resultados se presentan en la Tabla 31 y 32 respectivamente.

Tabla 31

Indicadores de cobertura y sustitución potencial – escenario doméstico

Mes	**Oferta agua lluvia**	**Escenario do**						
	m³/mes	**Sustitución acumulada (m³)**	Demanda global (m³)	Potencial sustitución (m³)	Cobertura mensual (%)	Balance (m³)	**Exceden te (m³)**	**Déficit (m³)**
Enero	128,662164	128,662164	2.620,00	128,66	4,91	-2.491,34	0	2.491,34
Febrero	75,0244667	203,686631	2.620,00	75,02	2,86	-2.544,98	0	2.544,98
Marzo	441,651682	645,338313	2.620,00	441,65	16,86	-2.178,35	0	2.178,35
Abril	991,508934	1.636,85	2.620,00	991,51	37,84	-1.628,49	0	1.628,49
Mayo	1239,02282	2.875,87	2.620,00	1.239,02	47,29	-1.380,98	0	1.380,98
Junio	1370,99147	4.246,86	2.620,00	1.370,99	52,33	-1.249,01	0	1.249,01
Julio	965,820103	5.212,68	2.620,00	965,82	36,86	-1.654,18	0	1.654,18
Agosto	981,662155	6.194,34	2.620,00	981,66	37,47	-1.638,34	0	1.638,34
Septiembre	876,581393	7.070,93	2.620,00	876,58	33,46	-1.743,42	0	1.743,42
Octubre	732,949217	7.803,87	2.620,00	732,95	27,98	-1.887,05	0	1.887,05
Noviembre	462,544295	8.266,42	2.620,00	462,54	17,65	-2.157,46	0	2.157,46
Diciembre	171,864455	8.438,28	2.620,00	171,86	6,56	-2.448,14	0	2.448,14
Total	**8.438,28**	**52.723,79**	**31.440,00**	**8.438,28**	26,84	**-23.001,72**	**0**	**23.001,72**

Nota. La cobertura mensual corresponde a la relación entre la oferta potencial mensual de agua lluvia y la demanda doméstica estimada. La sustitución acumulada representa el volumen acumulado de demanda que podría ser cubierto mediante el aprovechamiento de agua lluvia. Los valores de excedente y déficit corresponden a la diferencia mensual entre la oferta potencial y la demanda estimada. Elaboración propia.

Tabla 32

Indicadores de cobertura y sustitución potencial – escenario industrial

Mes	**Oferta agua lluvia**	Escenario industrial	–	lderas Batería 04				
	m³/mes	**Sustitución acumulada (m³)**	Demanda (m³)	Potencial sustitución (m³)	Cobertura mensual (%)	Balance (m³)	Excedente (m³)	Déficit (m³)
Enero	128,6621642	128,662164	966	128,66	13,31906461	-837,3378358	0	837,3378358
Febrero	75,0244667	203,686631	966	75,02	7,76650794	-890,975533	0	890,9755333

						3		
Marzo	441,6516819	645,338313	966	441,65	45,71963581	-524,3483181	0	524,3483181
Abril	991,5089342	1.636,85	966	966,00	100	25,50893424	25,50893424	0
Mayo	1239,022818	2.875,87	966	966,00	100	273,022818	273,022818	0
Junio	1370,991465	4.246,86	966	966,00	100	404,9914654	404,9914654	0
Julio	965,8201034	5.212,68	966	965,82	99,98137716	-0,17989662	0	0,17989662
Agosto	981,6621547	6.194,34	966	966,00	100	15,66215466	15,66215466	
Septiembre	876,5813925	7.070,93	966	876,58	90,74341537	-89,4186075	0	89,4186075
Octubre	732,9492166	7.803,87	966	732,95	75,8746601	-233,0507834	0	233,0507834
Noviembre	462,5442954	8.266,42	966	462,54	47,88243224	-503,4557046	0	503,4557046
Diciembre	171,8644554	8.438,28	966	171,86	17,79135149	-794,1355446	0	794,1355446
Total	**8438,283148**	**52.723,79**	11592	8.438,28	72,79402302	-3153,716852	719,1853723	3867,6

Nota. La cobertura mensual corresponde a la relación entre la oferta potencial mensual de agua lluvia y la demanda industrial estimada. La sustitución acumulada representa el volumen acumulado de demanda que podría ser cubierto mediante el aprovechamiento de agua lluvia. Los valores de excedente y déficit corresponden a la diferencia mensual entre la oferta potencial y la demanda estimada. Elaboración propia.

Selección del escenario de mayor potencial

Con el fin de comparar las condiciones de aprovechamiento de agua lluvia en los escenarios doméstico e industrial, se consolidaron los principales indicadores de

demanda, cobertura potencial, requerimientos operativos y balance acumulado. Los resultados se presentan en la Tabla 33.

Tabla 33

Comparación de indicadores para los escenarios doméstico e industrial de aprovechamiento de agua lluvia

Indicador	Doméstico	Industrial
Demanda anual de referencia	31.440,00 m³	11.592,00 m³
Cobertura anual	26,84%	72.80%
Requiere tratamiento	Sí, si entra a PTAP	Si, en batería 04
Medición independiente	Limitada	Disponible
Déficit acumulado	23.001,72 m³	3.153,71 m³
Excedente acumulado	0 m³	719,18 m³

Nota. La demanda anual de referencia corresponde a la estimación obtenida a partir de los registros operativos disponibles. La cobertura anual representa la proporción de la demanda que podría ser atendida mediante la oferta potencial de agua lluvia. Los valores de déficit y excedente acumulado corresponden al balance entre la oferta potencial y la demanda de cada escenario. Elaboración propia.

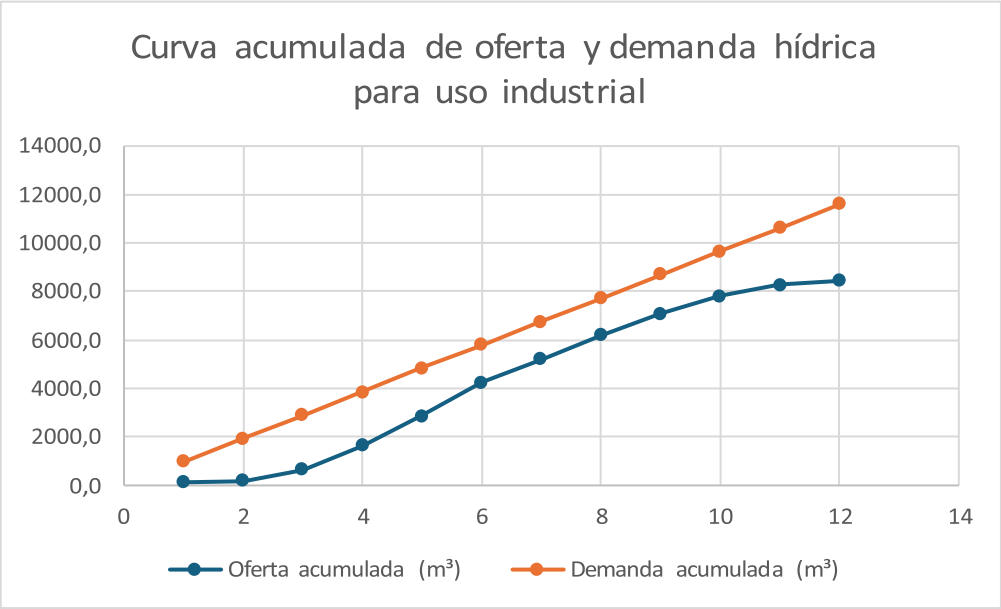
Los resultados evidencian que el escenario industrial presenta las condiciones más favorables para el aprovechamiento de agua lluvia. Este escenario presenta una cobertura anual potencial del 72,80 %, un menor déficit acumulado y la disponibilidad de medición independiente para el seguimiento del volumen utilizado superior a los resultados obtenidos para el escenario doméstico. Estas condiciones permitieron priorizar el aprovechamiento de agua lluvia para el abastecimiento de las actividades asociadas a Batería 04.

Curva acumulada de oferta y demanda hídrica

A continuación, se presenta la Figura 27 donde se puede apreciar la curva acumulada de oferta y demanda hídrica.

Figura 27

Curva acumulada de oferta y demanda hídrica uso industrial



Nota. La oferta acumulada corresponde al volumen potencial acumulado de agua lluvia y la demanda acumulada corresponde al requerimiento hídrico acumulado para el escenario industrial. Elaboración propia.

Punto Pinch

No hay una intersección entre las dos curvas. La oferta acumulada permanece por debajo de la demanda acumulada durante todo el año. La aplicación del análisis acumulativo evidencia que la oferta potencial de agua lluvia no alcanza a cubrir la demanda industrial acumulada. La máxima brecha acumulada se presenta al finalizar diciembre, con un balance acumulado de 3.153,72 m³. No obstante, el análisis mensual identifica excedentes temporales,

por lo que la viabilidad del aprovechamiento depende de la capacidad de almacenamiento y de la posibilidad de transferir temporalmente dichos excedentes hacia los periodos con mayor déficit.

PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS

Modelo empresarial para la gestión del aprovechamiento de aguas lluvias

La implementación del sistema de aprovechamiento se propone bajo un modelo de gestión integrado a la estructura actual del Campo Quifa, con el fin de evitar la creación de nuevos cargos, unidades administrativas u operacionales. La gestión del sistema se distribuirá entre los actores que actualmente participan en la operación, mantenimiento, gestión ambiental, abastecimiento y control del recurso hídrico como se muestra en la Tabla 34

Tabla 34

Modelo empresarial sugerido para el sistema de aprovechamiento

Función	Responsable propuesto	Responsabilidades dentro del sistema
Operación y mantenimiento	**TECSAAM**	Operación y mantenimiento de los componentes asociados al sistema de captación y almacenamiento que sean incorporados a la infraestructura existente. Limpieza de canales, bajantes, elementos de captación y tanque de almacenamiento. Reporte de novedades y fallas.
Gestión ambiental	**Supervisores ambientales – Campo Quifa**	Seguimiento ambiental del sistema, control de los volúmenes captados y utilizados, verificación de registros, seguimiento a indicadores de aprovechamiento y coordinación de acciones de mejora.
Operación de Batería 04	**Frontera Energy – Supervisores Batería 04**	Definición y seguimiento de los requerimientos de abastecimiento de las calderas, coordinación de la recepción del agua en Batería 04 y seguimiento al consumo del recurso.
Transporte	**Coltanques - Empresa contratista de carrotanques actualmente vinculada**	Cargue del agua almacenada, transporte hasta Batería 04 y descarga en el tanque existente, utilizando el esquema operativo actualmente establecido para el abastecimiento.

Sistema de gestión y seguimiento	**Supervisores ambientales – Campo Quifa**		Consolidación de información, seguimiento de indicadores, comparación entre agua lluvia aprovechada y agua convencional sustituida, generación de reportes y evaluación del desempeño del sistema.

Evaluación de las condiciones para la implementación

Compatibilidad con el sistema actual

Actualmente, el agua destinada al uso industrial es captada desde el PASUB 2 mediante un carrotanque, utilizando una conexión por manguera dispuesta en el punto de captación. Posteriormente, el vehículo realiza el traslado hasta Batería 04, donde el agua es descargada.

La evaluación de compatibilidad evidencia que esta alternativa puede integrarse al esquema operativo existente sin requerir modificaciones sustanciales en el proceso de abastecimiento como se muestra en la Tabla 35.

Tabla 35

Comparación entre el esquema operativo actual y el esquema operativo propuesto

Paso	Esquema Actual: PASUB 2	Esquema Propuesto: Agua Lluvia
1	Contratista llega a PASUB 2	Contratista llega a Punto de Agua Lluvia
2	Contratista reporta datos antes de iniciar la captación	Contratista reporta datos antes de iniciar la captación
3	Contratista capta de PASUB 2	Contratista capta de Agua Lluvia
4	Contratista reporta datos de captación	Contratista reporta datos de captación
5	Contratista transporta a Batería 04	Contratista transporta a Batería 04
6	Contratista descarga en Batería 04	Contratista descarga en Batería 04
7	Contratista viaja a PASUB 2 *(reinicio de ciclo)*	Contratista viaja a Punto de Agua Lluvia *(reinicio de ciclo)*

Bajo el escenario propuesto, el esquema de transporte y entrega podría mantenerse. La principal modificación consistiría en incorporar una fuente alternativa de abastecimiento para el carrotanque, de manera que parte del volumen actualmente captado desde el PASUB 2 sea sustituido por agua lluvia previamente recolectada y almacenada.

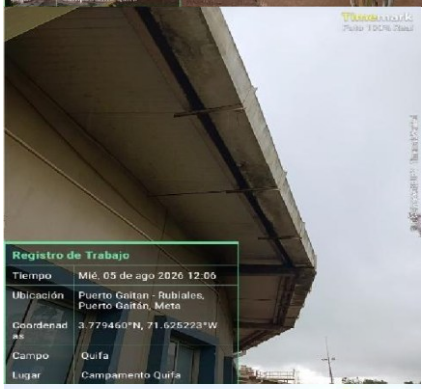
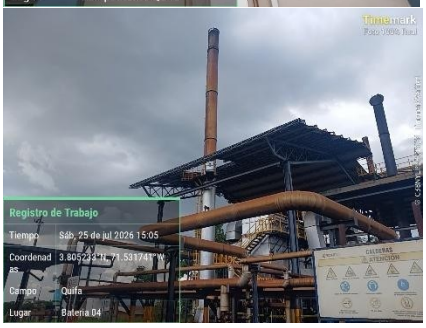
Esta configuración presenta una ventaja operativa, debido a que el mismo carrotanque y el mismo recorrido utilizado actualmente podrían ser empleados para transportar el agua lluvia hacia Batería 04, evitando la necesidad de construir una nueva red de conducción entre el sistema de aprovechamiento y las calderas.

En cuanto a la infraestructura actual, las cubiertas correspondientes a las viviendas, que se encuentran agrupadas, podrían conformar un conjunto de captación, mientras que las superficies correspondientes al casino, lavandería y sedes sociales presentan una distribución independiente y requerirían evaluar su integración mediante conducciones hacia el mismo sistema o, alternativamente, hacia puntos de almacenamiento complementarios tal como se muestra en la Tabla 36.

Tabla 36

Infraestructura susceptible a integración

Elemento	Función actual	Posible integración	Evidencia

Cubiertas	Superficie de captación	Captación de agua lluvia	
Canales	Recolección de agua escorrentía	Conducción del agua captada	
Bajantes	Descarga de canales	Conducción hacia almacenamiento	
Punto de abastecimiento agua lluvia	Entrega de agua a Batería 04	Recepción del las calderas	

La integración propuesta no modifica el destino final del recurso ni el procedimiento de abastecimiento de las calderas, sino que introduce una fuente complementaria de agua. Por tanto, el sistema convencional de abastecimiento desde PASUB 2 podría mantenerse como respaldo durante los periodos en los que la disponibilidad de agua lluvia sea insuficiente.

En consecuencia, se considera que el escenario de aprovechamiento de agua lluvia para Batería 04 presenta una compatibilidad operativa favorable con el sistema actual, principalmente debido a que aprovecha procedimientos de transporte existentes y concentra las menores modificaciones operacionales en las etapas de captación, conducción y almacenamiento del agua lluvia.

Requerimientos técnicos

Captación

Aprovechamiento de las cubiertas identificadas, cuya superficie total evaluada es de **4.037,22 m²**.

Conducción

Integración de canales y bajantes existentes, complementándolos donde sea necesario para conducir el agua hacia el punto de almacenamiento.

Almacenamiento

Instalación de uno o más tanques destinados exclusivamente al almacenamiento temporal del agua lluvia con una capacidad capaz de aprovechar los excedentes registrados, considerando la disponibilidad de espacio y las condiciones operativas del abastecimiento.

El tanque deberá: permanecer cerrado o protegido para evitar el ingreso

de contaminantes;

contar con sistema de rebose;

disponer de un punto de drenaje para limpieza;

permitir inspección y mantenimiento;

contar con acceso seguro;

estar instalado sobre una superficie estable;

disponer de conexiones compatibles con el sistema de cargue del carrotanque.

La capacidad definitiva deberá determinarse en la etapa de diseño detallado.

Volumen de almacenamiento potencial

El volumen máximo de excedente temporal identificado que potencialmente podría ser almacenado para trasladarlo a meses posteriores es de 719,18 m³ obtenido de los excedentes registrados. Este valor corresponde con la capacidad teórica máxima de almacenamiento.

Simulación del tanque de almacenamiento

Se realizo una simulación mostrada en la Tabla 37 con el fin de observar el comportamiento del tanque de almacenamiento partiendo de los siguientes supuestos.

Demanda industrial constante: **966 m³/mes**.

Oferta mensual de agua lluvia: la calculada a partir de la precipitación y las cubiertas.

Volumen inicial del tanque en enero: **0 m³**. El agua lluvia disponible se almacena cuando la oferta supera la demanda.

El volumen almacenado se utiliza en los meses posteriores cuando la oferta mensual es inferior a la demanda. No se consideran pérdidas por evaporación, fugas, limpieza del tanque o reboses.

La simulación representa un balance teórico preliminar, no un dimensionamiento hidráulico definitivo.

Tabla 37

Simulación mensual del almacenamiento de agua lluvia para el escenario industrial

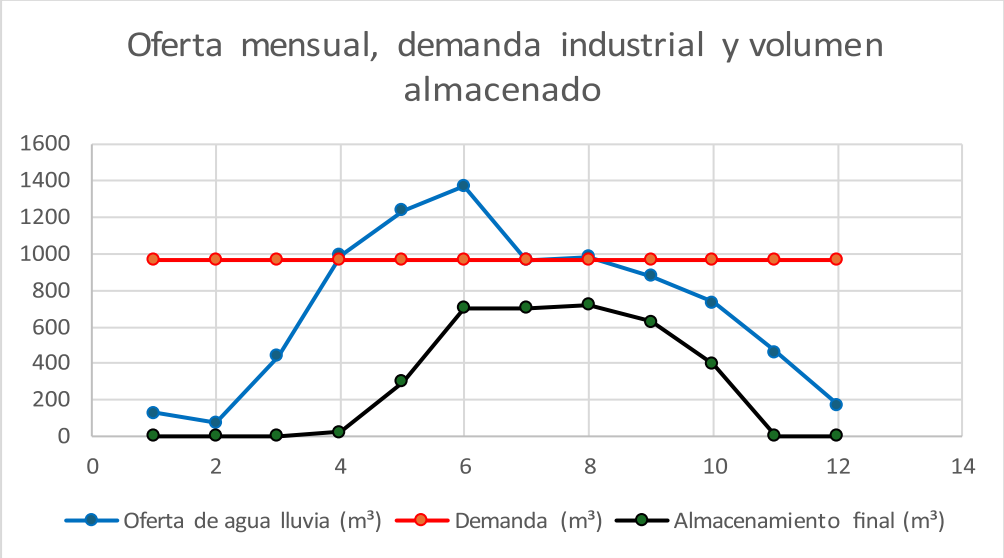
Mes	Oferta de agua lluvia (m³)	Almacenamiento inicial (m³)	Agua disponible (m³)	Demanda (m³)	Déficit (m³)	Almacenamiento final (m³)
Enero	128,66	0	128,66	966	837,34	0
Febrero	75,02	0	75,02	966	890,98	0
Marzo	441,65	0	441,65	966	524,35	0
Abril	991,51	0	991,51	966	0	25,51
Mayo	1.239,02	25,51	1.264,53	966	0	298,53
Junio	1.370,99	298,53	1.669,52	966	0	703,52
Julio	965,82	703,52	1.669,34	966	0	703,34
Agosto	981,66	703,34	1.685,01	966	0	**719,01**
Septiembre	876,58	719,01	1.595,59	966	0	629,59
Octubre	732,95	629,59	1.362,54	966	0	396,54
Noviembre	462,54	396,54	859,08	966	106,92	0
Diciembre	171,86	0	171,86	966	794,14	0

Nota. Simulación realizada con base en una demanda industrial constante de 966 m³/mes y la oferta potencial mensual de agua lluvia estimada para el presente estudio. No se consideran pérdidas por evaporación, fugas, reboses ni otros consumos operacionales.

La Figura 28 muestra el comportamiento temporal de la oferta potencial de agua lluvia en comparación con la demanda industrial mensual de referencia y el volumen acumulado en el sistema de almacenamiento.

Figura 28

Comportamiento mensual de la oferta de agua lluvia, la demanda industrial y el volumen almacenado.



El volumen almacenado aumenta progresivamente entre abril y agosto, alcanzando su valor máximo aproximado de 719 m³, lo cual representa el mayor volumen acumulado durante la simulación. Posteriormente, en noviembre, el agua disponible ya no es suficiente para satisfacer la demanda mensual, por lo que el almacenamiento se agota y vuelve a presentarse un déficit.

La simulación evidencia que el almacenamiento podría aprovechar los excedentes generados y trasladar parcialmente su disponibilidad hacia períodos de sequía. Sin embargo, la capacidad de almacenamiento por sí sola no permite eliminar completamente la dependencia de la fuente convencional durante todo el año, especialmente durante los períodos de menor precipitación.

Cargue y transporte

El agua almacenada podría ser retirada mediante el mismo esquema de carrotanque utilizado actualmente para el abastecimiento de las calderas de Batería 04. Esto significa que no necesariamente se necesita construir una nueva red hasta las calderas. Permitiendo mantener de manera general el mismo sistema actual.

Uso final

El carrotanque transportaría el agua almacenada hasta Batería 04 para su uso final en las calderas de la instalación.

Limitantes

En la Tabla 38 se presentan las limitantes encontradas:

Tabla 38

Limitantes del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias

Limitantes técnicas	• Necesidad de adecuar las cubiertas, canales y bajantes para garantizar la conducción del agua hacia el almacenamiento. • Necesidad de instalar un sistema de almacenamiento adecuado. • Necesidad de establecer un punto de cargue para el carrotanque. • Necesidad de verificar la compatibilidad del agua almacenada con las condiciones operativas de las calderas.
Limitantes operativas	• La disponibilidad de agua lluvia depende de la precipitación. • El abastecimiento no será continuo durante todo el año. • El sistema requerirá coordinar actividades de captación, almacenamiento y transporte. • Será necesario mantener un esquema de abastecimiento convencional como respaldo.

Limitantes de infraestructura	• Disponibilidad limitada de espacio para almacenamiento. • Necesidad de verificar las condiciones estructurales y físicas de canales y bajantes. • Necesidad de adecuar el punto de cargue del carrotanque.
Limitantes de medición y control	Aunque la captación de PASUB 2 para uso industrial cuenta con registros, será necesario implementar mecanismos de medición del volumen de agua lluvia captado, almacenado y entregado a Batería 04 para garantizar la trazabilidad de la sustitución del recurso convencional.
Limitantes climáticas	• Variabilidad mensual de la precipitación. • Existencia de periodos de baja precipitación. • La oferta potencial anual no alcanza para cubrir la totalidad de la demanda industrial.

Implicaciones

- **Ambientales:** La reducción de la captación de agua subterránea, el aprovechamiento de la precipitación y una menor dependencia de fuentes convencionales;
- **Operativas:** Requiere infraestructura de almacenamiento, mantiene el carrotanque y su recorrido actual, exige controlar el volumen captado y conserva el PASUB 2 como fuente de respaldo.
- **Económicas:** Puede generar una reducción significativa en el volumen de agua convencional captada para uso industrial, aunque implica una inversión inicial en sistemas de captación, conducción y almacenamiento, además de costos asociados a su operación y mantenimiento.

Recomendaciones técnicas para la implementación

Adecuación de las superficies de captación

- Verificar el estado de las cubiertas seleccionadas.
- Revisar canales y bajantes existentes.
- Realizar limpieza previa a la puesta en funcionamiento.
- Reparar posibles fisuras, obstrucciones o puntos de fuga.
- Evitar el ingreso de hojas, sedimentos y residuos al sistema.

Control de sólidos y primeras aguas

Se recomienda incorporar elementos de retención de sólidos y, cuando las condiciones del sistema lo requieran, un mecanismo que permita separar o descartar el primer volumen de escorrentía después de periodos secos. Esto para reducir el ingreso de material particulado, hojas y otros contaminantes acumulados sobre las superficies de captación.

Cargue del carrotanque

Se recomienda establecer un punto específico de cargue del carrotanque que permita realizar la operación de manera segura y controlada.

Este punto deberá contar, preferiblemente, con:

- Conexión adecuada para la manguera del carrotanque;
- Válvula de control;
- Sistema de medición de volumen;
- Identificación del punto de cargue;
- Condiciones que eviten derrames durante la operación.

Control y medición

Uno de los aspectos prioritarios para la implementación es garantizar la trazabilidad del agua lluvia, en la Tabla 39 se muestran los ítems mínimos que se recomienda registrar:

Tabla 39

Ítems mínimos de control y medición sugeridos para el sistema de aprovechamiento de aguas lluvias

Item	Registro
Fecha de captación	Fecha
Volumen captado	m³
Volumen almacenado	m³
Volumen cargado al carrotanque	m³
Fecha de transporte	Fecha
Volumen entregado a Batería 04	m³
Volumen de agua convencional sustituido	m³
Observaciones	Novedades

Mantenimiento

Se recomienda establecer un programa periódico de:

- limpieza de cubiertas;
- limpieza de canales y bajantes;
- inspección de conexiones;
- revisión del tanque;

- retiro de sedimentos;
- inspección de válvulas y mangueras;
- verificación del punto de cargue;
- revisión de posibles fugas.

La frecuencia deberá definirse de acuerdo con las condiciones de operación y acumulación de sedimentos observadas durante el funcionamiento.

Las dimensiones, capacidades, diámetros, equipos y demás especificaciones de diseño deberán determinarse durante la etapa de ingeniería de detalle, a partir de las condiciones reales de las superficies de captación, distancias, desniveles, demanda operativa y capacidad de almacenamiento requerida.

CONCLUSIONES

La ausencia de medición individualizada en las unidades de consumo limita la sectorización adecuada del sistema y por lo tanto la determinación precisa de la demanda por tipo de consumo.

El análisis de la trazabilidad del agua entre las plantas de tratamiento de aguas potables y residuales domesticas evidenció diferencias entre los volúmenes de entrada y salida durante los meses evaluados. Este resultado demuestra la necesidad de fortalecer la sectorización y trazabilidad de los flujos para mejorar la precisión de futuros balances hídricos.

La evaluación de la calidad del agua indicó que los procesos de tratamiento implementados permiten mantener las condiciones requeridas para los usos correspondientes y el cumplimiento de los parámetros aplicables.

El diagnóstico del uso industrial permitió identificar diferentes estrategias de manejo del recurso, estas prácticas constituyen una base favorable para la incorporación de nuevas estrategias de aprovechamiento.

se estimó una oferta potencial anual de agua lluvia de **8.438,28 m³**.

El aprovechamiento para usos industriales en las calderas de Batería 04 representa la alternativa más favorable. Para una demanda industrial de referencia de aproximadamente **11.592 m³/año**, la oferta potencial de agua lluvia podría representar teóricamente hasta un **72,79 % de sustitución anual** del agua convencional (bajo condiciones ideales de captación y aprovechamiento).

El agua lluvia debe considerarse como una **fuente complementaria** y no como un reemplazo total del abastecimiento convencional desde PASUB 2.

La información disponible fue suficiente para establecer que el escenario industrial presentaba mejores condiciones de compatibilidad y mayor potencial de sustitución.

La alternativa priorizada presenta condiciones favorables de integración con el sistema actual.

En términos generales, existe una oportunidad técnica y operativa para incorporar el aprovechamiento de aguas lluvias dentro de la gestión del recurso hídrico del Campo Quifa.

Su implementación contribuiría a diversificar las fuentes de abastecimiento y reducir parcialmente la dependencia del agua subterránea.

RECOMENDACIONES

Realizar una etapa de ingeniería de detalle antes de la implementación del sistema, en la cual se definan las dimensiones y especificaciones del tanque de almacenamiento, conducciones, conexiones, puntos de cargue y demás componentes requeridos.

Implementar un sistema de medición y registro del agua lluvia captada, almacenada, transportada y utilizada, con el propósito de garantizar la trazabilidad del recurso y cuantificar el volumen real de agua convencional sustituida.

Fortalecer la sectorización de la medición en el Campamento Base Quifa, especialmente en las unidades consumidoras de mayor importancia, con el fin de diferenciar los consumos domésticos, no potables y operativos. Esto permitirá desarrollar balances hídricos más precisos e identificar oportunidades adicionales de ahorro y sustitución.

Mejorar la trazabilidad de las corrientes que ingresan y salen de la PTARD, diferenciando claramente los aportes provenientes del Campamento Base Quifa, PASUB 1 y otras instalaciones, así como los diferentes destinos finales del agua tratada.

Verificar previamente las condiciones físicas y estructurales de las cubiertas, canales y bajantes seleccionados para determinar las adecuaciones necesarias y garantizar una captación eficiente del agua lluvia.

Incorporar sistemas de retención de sólidos y manejo de primeras aguas, según las condiciones definitivas de las superficies de captación y los requerimientos operativos establecidos para el agua destinada.

Mantener el abastecimiento desde PASUB 2 como fuente de respaldo, debido a que la oferta potencial de agua lluvia no permite cubrir la totalidad de la demanda industrial durante todos los periodos del año.

Establecer un programa periódico de operación, inspección y mantenimiento para las cubiertas, canales, bajantes, sistemas de retención de sólidos, tanque de almacenamiento y punto de cargue.

implementar un procedimiento operativo específico para el cargue del carrotanque con agua lluvia, incluyendo identificación del origen del recurso, registro del volumen transportado, destino final y reporte de novedades.

Realizar una evaluación económica durante la siguiente fase del proyecto, incorporando costos de adecuación, almacenamiento, operación, mantenimiento y transporte, así como los posibles ahorros asociados a la reducción de la captación de agua convencional.

Una vez implementado el sistema, desarrollar un periodo piloto de seguimiento que permita comparar la oferta potencial estimada con los volúmenes realmente captados y aprovechados, ajustando posteriormente la operación y la capacidad de almacenamiento según los resultados obtenidos.

Referencias

Frontera Energy. (2026). Registros operacionales – Informes de Cumplimiento

Ambiental (ICA) plataforma IRIS [Base de datos interna no publicada].

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2023, 25 de agosto). Resolución No. 1885 de 2023, por la cual se modifica la Resolución 2035 del 15 de octubre de 2010, modificada por la Resolución 987 de 2011 y la Resolución 261 de 2013. Consulta de la Resolución 1885 de 2023

Beltrán Linares, M. P. (2026). Diagnóstico de oportunidades para el reúso de aguas lluvia en usos no potables mediante la metodología Water Pinch en la Empresa Licores de Cundinamarca [Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Repositorio institucional

López Mejía, R. A., & Bain Loayza, J. C. (2025). Metodología para calcular volúmenes de aprovechamiento de aguas lluvias como respuesta a la variabilidad climática en Bogotá [Tesis de maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Repositorio institucional

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2021, 9 de diciembre). Resolución 0799 de 2021, por la cual se modifica la Resolución 0330 de 2017. Resolución 0799 de 2021

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2026). Datos históricos de precipitación de la estación Puerto Gaitán, periodo 2006–2025 [Conjunto de datos].

Organización Panamericana de la Salud. (2004). Guía de diseño para captación del agua de lluvia. SSWM. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/OPS%202004.%20Guia%20de%20dise%C3%B1o%20para%20captaci%C3%B3n%20del%20agua%20de%20lluvia.pdf

Sarmiento Ávila, A. S., & Ávila Padua, A. C. (2021). Propuesta para el diseño del sistema de captación y tratamiento de aguas lluvias para el Colegio Bauhaus de la Montaña [Trabajo de grado, Universidad de La Salle]. Repositorio Institucional de la Universidad de La Salle. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=2950&context=ing_ambiental_sanitaria

Universidad Europea. (2024, 18 de abril). ¿Qué es la sostenibilidad ambiental? Universidad Europea Colombia. https://colombia.universidadeuropea.com/blog/sostenibilidadambiental/

Rojas Salazar, M. (2016). Diseño e implementación de un sistema de captación y aprovechamiento de aguas lluvias (SCALL) como alternativa de ahorro y uso sostenible de agua potable a nivel residencial en la ciudad de Bogotá [Trabajo de especialización, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio Institucional de la Universidad Industrial de Santander. Repositorio institucional

Urueña González, M. A., & Ardila Barreto, P. A. (2019). Propuesta y evaluación de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sede Bosa Porvenir, como alternativa para el ahorro de agua potable [Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Repositorio institucional

Correa Sastoque, A. H. (2014). Diseño de un sistema de captación y aprovechamiento de aguas lluvias como alternativa de ahorro de agua potable en la Universidad Libre de Colombia, sede Bosque Popular, bloque P y cafetería [Trabajo de grado, Universidad Libre]. CORE. https://core.ac.uk/download/pdf/198450269.pdf