



CURSO DE CAPACITACIÓN PARA SUBOFICIALES SERVICIOS HIDROGRÁFICOS BALIZAMIENTO

TFI

Propuesta de un Sistema de Captación y Gestión del Recurso Hídrico para el Faro Punta Delgada

Autor: CISHBA VALENCIA GEORGINA ELIZABETH

Tutor: CF AMAYA AUGUSTO

AÑO 2025

RESUMEN

El presente Trabajo Final Integrador analiza la problemática hídrica del Faro Punta Delgada, ubicado en la Península Valdés, una zona caracterizada por clima árido, vientos intensos, baja precipitación y condiciones de aislamiento que dificultan el acceso a agua dulce. A partir de una revisión bibliográfica, análisis ambiental y estudio de experiencias internacionales en zonas áridas, se identificó que la falta de infraestructura hídrica afecta la habitabilidad del personal y la sostenibilidad operativa del faro. Con base en estos antecedentes, se diseñó y propuso un sistema híbrido de captación de agua atmosférica que integra tecnologías pasivas de recolección de lluvia, niebla y rocío. Los cálculos estimativos demuestran que este sistema puede abastecer una cantidad significativa de agua anual, reduciendo la dependencia logística del transporte terrestre y mejorando la autonomía y seguridad del establecimiento. La propuesta resulta técnica y ambientalmente viable, de bajo costo, fácil mantenimiento y adaptable al contexto costero patagónico, aportando un modelo replicable para otras instalaciones aisladas del país. El estudio concluye que la captación atmosférica constituye una alternativa sostenible y efectiva para garantizar el recurso hídrico en entornos remotos.

Palabras clave:

- Captación hídrica,
- niebla,
- sostenibilidad,
- Faro Punta Delgada,
- abastecimiento autónomo.

INDICE

Resumen	3
Indicé.....	4
Introducción.....	5
CAPÍTULO I - Contextualización, análisis ambiental e hídrico	
1.1. Ubicación geográfica y relevancia estratégica.....	10
1.2. Importancia histórica y operativa del Faro	11
1.3. Variables ambientales del Faro Punta Delgada.....	13
1.4. Problemática del abastecimiento hídrico	16
1.5. Antecedentes internacionales de captación.....	17
1.5.1. Captación de niebla (Fog Harvesting)	18
1.5.2. Captación de rocío	20
1.6. Tecnologías de captación de lluvia	21
1.7. Influencia del viento y la humedad.....	23
1.8. Potencial hídrico atmosférico del faro	25
CAPÍTULO II - Propuesta técnica del sistema híbrido	
2.1. Análisis comparativo de tecnologías	26
2.2. Dimensiones y componentes de los sistemas.....	27
2.3. Limitaciones de sistemas individuales.....	26
2.4. Integración del sistema híbrido.....	28
2.5. Cálculo de rendimiento hídrico.....	29
2.5.1. Aporte de lluvia	29
2.5.2. Aporte de niebla.....	29
2.5.3. Aporte de rocío.....	29
2.5.4. Producción total anual.....	30
2.6. Infraestructura requerida.....	30
2.7. Evaluación operativa y beneficios.....	32
Conclusión.....	34

Referencias 37

Anexos 39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Experiencias internacionales de captación de agua	17
Figura 2. Tabla comparativa anual de almacenamiento (sistemas). .	30
Figura 3. Sistema hídrico integrado (esquema general)	24
Figura 4. Esquema del sistema híbrido instalado en el faro	28
Figura 5. Ubicación geográfica y zona del faro.....	10
Figura 6. Módulo de captación de niebla (representación)	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tecnologías comparadas según rendimiento y costos.....	26
Tabla 2. Producción anual estimada del sistema híbrido	30

INTRODUCCION

El siguiente trabajo de investigación tiene la finalidad de aportar conocimientos teóricos y prácticos aplicables en el Faro Punta Delgada una estructura de valor histórico, estratégico y ambiental incalculable ubicado en el norte de la provincia de Chubut, a 70 kilómetros de la localidad de Puerto Pirámide se localiza en el departamento de Biedma, sobre el Golfo Nuevo, dentro de la Península de Valdés. Su localización geográfica es de 42°45'57" S y 63°38'21"9 W, cuenta con una superficie alrededor de 550.000ha, es una región patagónica con clima árido, ventoso, con temperaturas frescas, períodos de lluvia y constantes brumas/neblina. Durante todo el año se pueden apreciar los lobos y elefantes marinos que habitan en las inmensas playas.

El encargado de elegir el terreno fue el capitán de navío Hortensio Thowaites y el capitán de navío Servando Cardoso, se comenzó a construir en septiembre de 1904 y fue habilitado en el año 1905, bajo la superintendencia de la Sección Hidrografía, Faros y Balizas. La dirección de los trabajos estuvo a cargo del Inspector de Faros Guillermo Cray, conjuntamente con personal auxiliar.

El Faro Punta Delgada es reconocido como Patrimonio Mundial y es Monumento Histórico Nacional (Ley 12.665) por pertenecer al sistema de Faros Centenario (Ley 26.650).

Los Faros desde sus inicios a contado con personal del Servicio de Hidrografía Naval el cual se encarga del mantenimiento y las reparaciones tanto de la infraestructura, el predio y la señal luminosa antiguamente llamados torreros, fareros o guardianes de faro, en la actualidad los Servicios Hidrográfico Balizamiento cumplen con esa función.

El Faro Punta Delgada no es la excepción, en él habitan personal perteneciente a la Armada de la República Argentina, dependiendo del Ministerio de Defensa que trabajan diariamente para que el mismo se conserve y cumpla con su misión principal, el cual es guiar y orientar a las embarcaciones, emitiendo señales luminosas para advertir de peligros para la navegación y proporciona referencia visual diurna y señal luminosa nocturna para que los navegantes transiten con seguridad.

Para cumplir con la función del faro, el personal permanece en el establecimiento y enfrenta variaciones en las condiciones de habitabilidad, tanto por el clima de la región como por la disponibilidad de servicios básicos. Al estar en una zona alejada cabe dar a conocer que no cuentan con suministros de agua potable o dulce ni electricidad por medio de red urbana, los mismos se abastecen cuando ingresan al faro y en cada cambio de guardia. Se abastecen con combustible para los generadores y botellones de agua potable y agua dulce para las rutinas cotidianas tanto de aseo personal doméstico. Los cuales se racionan por permanencias teniendo en cuenta que el acceso al mismo es coordinado por sus caminos son irregulares y están condicionados a su clima.

Por lo tanto, la brecha de conocimiento sobre el contexto histórico y el estado actual del Faro Punta Delgada nos conduce a identificar la principal variable que afecta su habitabilidad y la sostenibilidad operativa es la carencia de infraestructura básica. Al estar situado en una región patagónica históricamente árida, ventosa y alejada de centros urbanos, el faro no cuenta con suministros de agua potable o dulce ni electricidad por línea de red.

Esta ausencia de conexión a la red obliga al personal a depender completamente del abastecimiento logístico externo. El agua, tanto potable para el consumo como dulce para el aseo personal y las rutinas domésticas, debe ser ingresada mediante botellones y relevos coordinados, lo que implica un racionamiento estricto durante las permanencias. Esta dependencia de suministros intermitentes, costosos y sujetos a las condiciones climáticas y al estado de la carretera, genera una vulnerabilidad crítica en la habitabilidad y la continuidad de la misión de la dotación.

A pesar de las condiciones áridas, la región experimenta períodos de lluvia y constantes brumas/neblina. Esta realidad climática presenta una brecha de conocimiento y una oportunidad de ingeniería ambiental. De esta necesidad surge la problemática central de este trabajo de investigación.

En este sentido, la pregunta que guía está investigación ¿Cómo la implementación de sistemas de captación y gestión del recurso hídrico puede mejorar la habitabilidad y la sostenibilidad operativa del Faro Punta Delgada? Para dar respuesta a esta interrogante, el Objetivo General de la presente

investigación es proponer, un sistema de captación y gestión del recurso hídrico,

provenientes de lluvia y brumas/niebla, para mejorar la habitabilidad y la sostenibilidad operativa del Faro Punta Delgada. La investigación se apoya en tres objetivos específicos. El primero es analizar la información hídrica disponible a partir de precipitaciones, bruma y niebla característico de la región patagónica. El segundo es determinar la tecnología más adecuada del sistema hídrico más adecuado para la recolección de agua. En tercer lugar y por último proponer un sistema de captación hídrica que se acomode a las necesidades del personal y a las condiciones climáticas del faro.

En el afán de implementar una solución a la problemática de la investigación el ser humano ha encontrado creativas soluciones para la obtención del agua a lo largo de los siglos. En sentido general, a esta práctica se le ha denominado cosecha del agua o crianza y abarca la captación del agua de lluvia y de la niebla, condensar el vapor, almacenar el agua superficialmente y, en el suelo, captar el agua subterránea y recoger agua de los ríos, entre otras.

La lluvia, al ser un mecanismo natural de limpieza, se puede emplear en una multitud de aplicaciones diarias que no requieren una calidad de potable y para las cuales el agua de lluvia es una alternativa eficaz y adecuada, pudiendo reducir más del 40% del consumo de agua potable en un hogar. La importancia de captarla, almacenarla, y utilizarla para estos fines es de gran relevancia para la mayoría de las poblaciones, sobre todo aquellas que no tienen acceso a ese vital líquido o se encuentra en escasez.

Como parte de la toma de conciencia ambiental a nivel mundial, se adoptó desde 1997 el protocolo de Kioto, que entró en vigor desde 2005 y promueve la sostenibilidad ambiental (estupiñan y zapata 2010). Aquellos países que se han acogido a este instrumento han tenido en cuenta el agua de lluvia para el mejoramiento o la ejecución de sistemas de suministro a nivel público o privado, agrícola, empresarial o colectivo. Otra experiencia mundial es la “Declaración Conjunta sobre el Aprovechamiento de Agua de Lluvia”, editada el día Mundial del Agua en 2011 por 40 entidades internacionales, en la que se estimula el aprovechamiento de las potencialidades de este recurso (Gnadlinger 2015).

Dado que hay una tendencia mundial a incorporar estos sistemas como vía para el desarrollo sostenible y, a su vez, el Faro Punta Delgada se encuentra en una situación en la que se requiere la generalización de los mismos, es que se

establece como la implementación de este método, mediante la revisión bibliográfica de los casos donde se aprovecha el agua de lluvia como fuente de suministro en distintas épocas (antes y después del siglo XX) y distintos lugares del planeta.

Otra alternativa de abastecimiento de agua es la captación de niebla/ rocío como una posible solución a la situación de desabastecimiento hídrico del Faro Punta Delgada, a falta de lluvias y ausencia de cobertura vegetal en el terreno que actúe como captador natural de agua y favorezca su infiltración en el suelo.

Algunas de estas zonas afectadas por este problema cuentan con una fuente alternativa de agua que no siempre es aprovechada: la niebla; por lo tanto, el desarrollo del mecanismo que mejoren la captación de las pequeñas gotas de agua de conforman la niebla puede resultar de interés para esta región.

El fundamento de la captación de agua de niebla se basa en la condensación de las pequeñas gotas de agua que componen la niebla sobre la superficie de una malla (de polipropileno, generalmente). Estas gotas descienden por la malla y se recogen en una canaleta situada en la parte inferior de la estructura, que conduce el agua hasta un depósito(tanque) y de allí se distribuyen a toda la casa o una pileta central (Céspedes Sandoval, 2003)

Este trabajo pretende contribuir de manera positiva a la gestión, cultivo y recursos hídrico sostenible en el norte de la provincia de Chubut sobre el Golfo Nuevo en el extremo sudoeste del área protegida de la Península de Valdés específicamente en el Faro Punta Delgada lo que beneficiaría al personal que custodian el mismo, durante las estadías de permanencia en una zona sin acceso a la red de agua potable.

El desarrollo del trabajo está basado en análisis documental y bibliográfico de tipo descriptivo con enfoque cualitativo. Desarrollando las triangulaciones convenientes a partir de la utilización de estas dos técnicas, empleando fuentes primarias libros, escritos académicos, documentos y distintos trabajos de investigación nacional y extranjero que se relacionan con la problemática y solución de la sustantividad hídrica, a fin de extraer los aspectos a ser considerados para proponer vías de solución.

La investigación se organiza en dos capítulos principales, cada uno diseñados para cumplir con los objetivos específicos planteados. En el primer capítulo se



analizará y describirá el sistema de captación de agua de lluvia y niebla, evaluando su desempeño y viabilidad en contextos históricos, geográficos y climáticos en la Península de Valdez; y el segundo capítulo se centra en el análisis de tecnologías disponibles y en la propuesta del sistema de captación del recurso hídrico para el Faro Punta Delgada.

Este trabajo de investigación aspira a ser una contribución significativa a la gestión de recursos hídricos en el norte de Chubut, proporcionando una solución de ingeniería sostenible y autónoma para el Faro Punta Delgada, garantizando así una mejora significativa en la habitabilidad y la misión del personal que lo custodia.

CAPÍTULO I: Contextualización, análisis ambiental e Delgada

1.1 Ubicación geográfica y relevancia estratégica

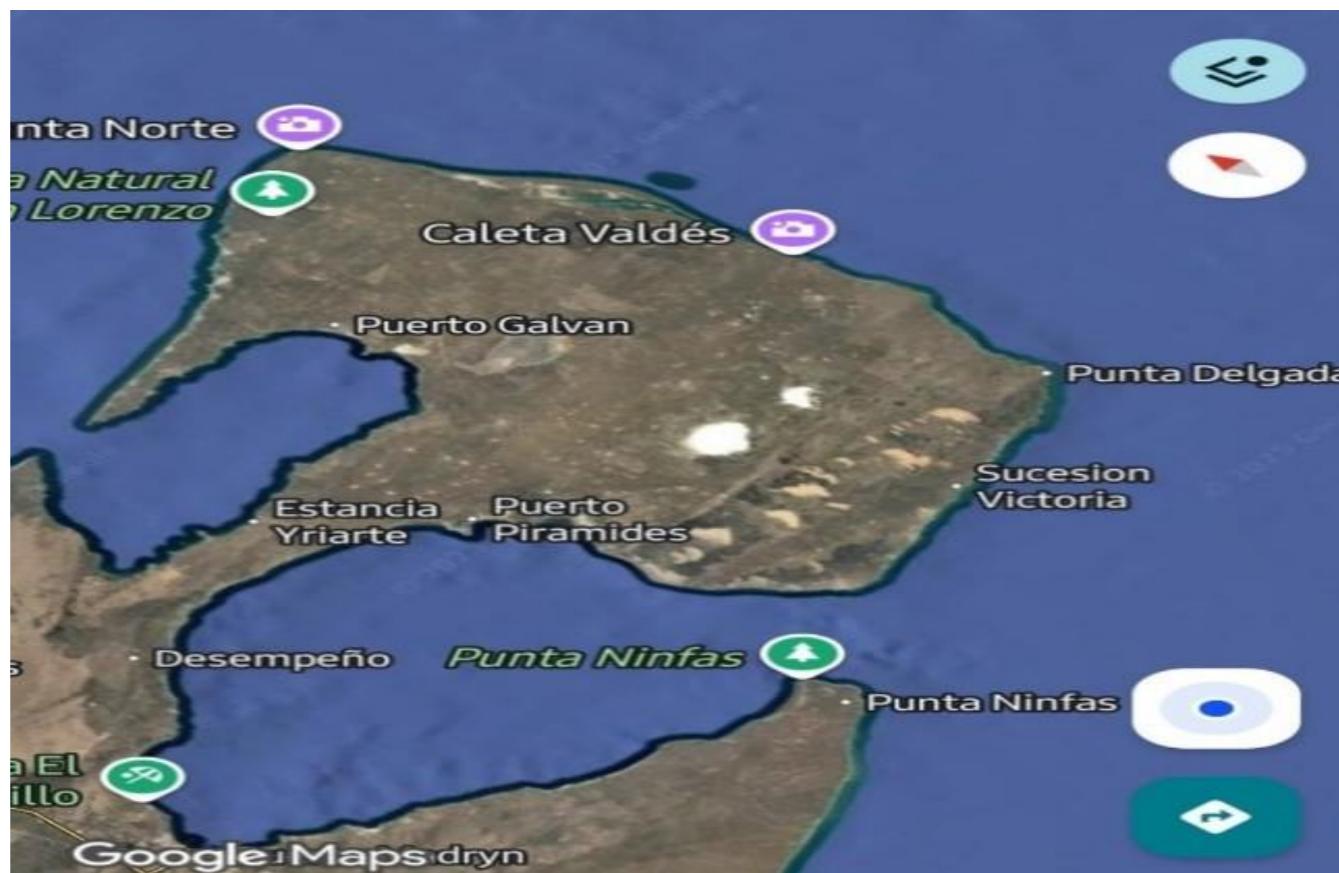
El Faro Punta Delgada se localiza en el extremo sudeste de la Península Valdés, dentro del Departamento Biedma, provincia del Chubut, Argentina. Se sitúa específicamente sobre el borde superior del acantilado que domina el sector costero del Golfo Nuevo, a una altitud aproximada de 60 metros sobre el nivel del mar. Sus coordenadas geográficas aproximadas son 42°46' S y 63°38' O, lo que lo ubica en una región estratégica dentro del Sistema de Señalización Náutica del litoral marítimo patagónico.

La Península Valdés constituye una de las áreas naturales más relevantes del país, declarada Patrimonio Natural de la Humanidad por la UNESCO (1999) debido a su valor ecológico, geográfico y científico. En este contexto, el Faro Punta Delgada cumple una función esencial en la seguridad de la navegación, al servir como punto de referencia lumínica para embarcaciones que transitan la zona, la cual presenta profundidades variables, presencia de restingas y condiciones oceánicas que pueden resultar adversas.

Construido a comienzos del siglo XX siguiendo la expansión del sistema de señalización marítima impulsado por el Estado argentino, el faro posee un rol central no solo en la actividad naval, sino también en el mantenimiento de la integridad territorial, el monitoreo costero y la continuidad operativa de los servicios náuticos en el litoral patagónico. Su operación se encuentra a cargo de personal destinado al lugar, quienes residen en condiciones de aislamiento dadas las características geográficas del Faro Punta Delgada.

1

Podemos ver la posición geográfica del Faro Punta Delgada vista satelital, en la imagen también se aprecia la distancias de los grandes centros urbanos como es el caso de la ciudad de Puerto Madryn.



Nota: Captura satelital, fuente propia GPS, la imagen permite observar el aislamiento geográfico.

El área se caracteriza por un paisaje árido, con bajos niveles de precipitación, vientos persistentes del oeste y escasa cobertura vegetal, condicionado por factores oceánicos, atmosféricos y geográficos que influyen directamente en la disponibilidad hídrica del territorio. Estas condiciones climáticas, sumadas al aislamiento territorial, generan dificultades logísticas para el abastecimiento regular de recursos básicos, entre ellos el agua dulce. La disponibilidad hídrica limitada influye directamente en la calidad de vida del personal asignado y en la sostenibilidad de las actividades operativas del faro. Esta dualidad constituye la base para el análisis ambiental e hídrico desarrollado en el presente capítulo y fundamenta la necesidad de diseñar alternativas sostenibles de abastecimiento de agua.

1 Características

Las precipitaciones anuales son escasas y altamente irregulares, con valores que oscilan entre 150 y 250 mm por año, concentrándose principalmente en los meses de otoño e invierno. El régimen pluviométrico presenta episodios aislados de gran variabilidad interanual, lo que limita la dependencia de fuentes tradicionales de agua de lluvia. Esta escasez, combinada con la elevada tasa de evapotranspiración propia de ambientes ventosos y de baja humedad, reduce aún más el aporte hídrico efectivo disponible para la zona.

Las temperaturas en Península Valdés muestran un rango que fluctúa entre los 5 °C y 25 °C según la estación, con promedios estivales moderados debido a la influencia marítima del Golfo Nuevo y el Golfo San José. Durante el invierno, las temperaturas descienden abruptamente, acompañadas por heladas frecuentes. Esta amplitud térmica genera condiciones atmosféricas favorables para la formación de nieblas y brumas costeras, fenómenos que funcionan como aportes hídricos potenciales en zonas donde el agua dulce es limitada.

El viento es uno de los elementos climáticos más distintivos del entorno, puesto que predominan vientos fuertes del oeste y sudoeste, con velocidades medias

de 30 a 40 km/h y ráfagas que ocasionalmente superan los 70 km/h. Estas condiciones influyen tanto en los procesos de evaporación y sequedad del ambiente como en el funcionamiento de los sistemas de captación de niebla, ya que la velocidad del viento incrementa la intercepción de microgotas en estructuras colectoras.

La humedad relativa del ambiente varía entre el 70 % y el 85 %, especialmente en sectores costeros expuestos a masas de aire húmedo provenientes del Atlántico, este factor favorece la presencia de nieblas y bancos de bruma marina, fenómenos esenciales para la implementación de tecnologías de captación no convencionales.

El clima seco, ventoso y de baja precipitación de Península Valdés determina un escenario desafiante para el abastecimiento convencional de agua. Sin embargo, la presencia permanente de humedad atmosférica, nieblas y brumas constituye una oportunidad para el desarrollo de tecnologías alternativas de captación hídrica, aspecto que se profundiza en los apartados posteriores.

1.3. Antecedentes teóricos y experimentales sobre la lluvia, niebla y rocío

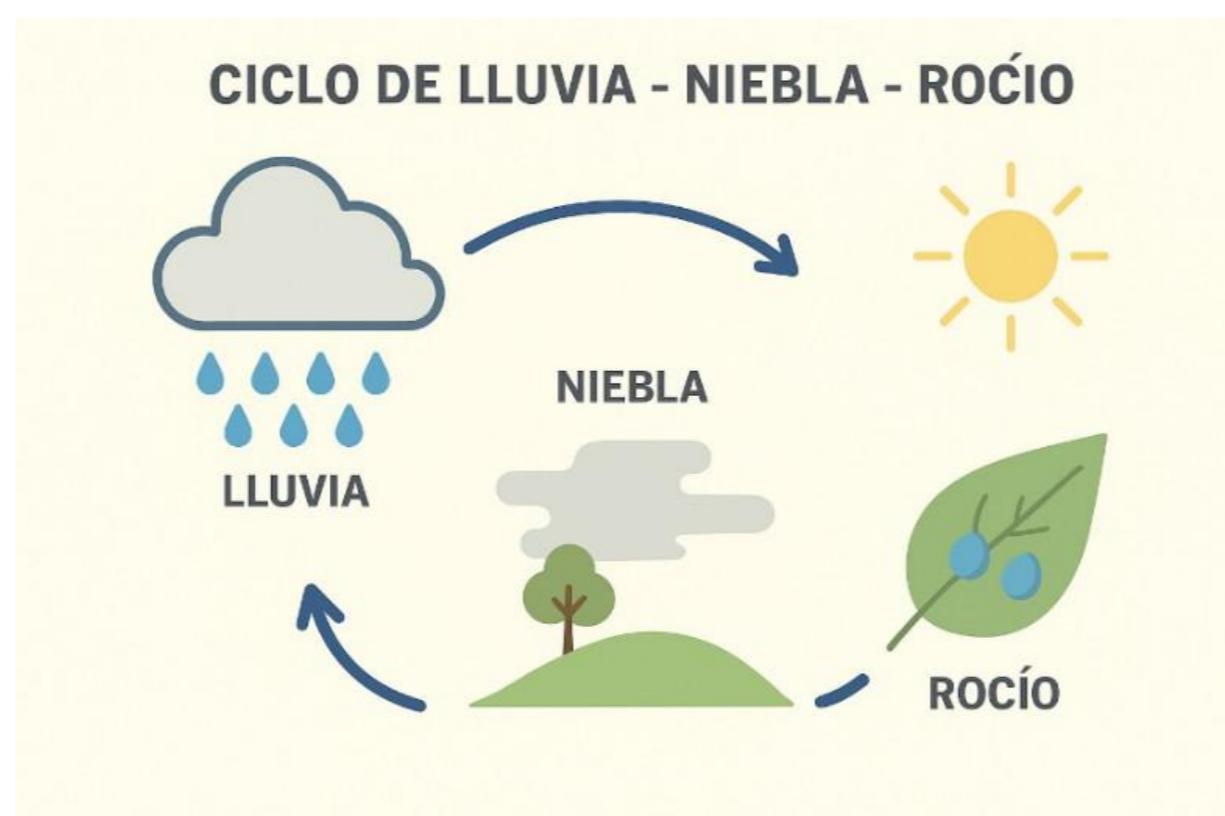
La captación de agua atmosférica es una línea de estudio que ha tomado relevancia ante el incremento de la escasez hídrica a nivel global. Diversas investigaciones destacan que la presión sobre los recursos hídricos tradicionales ha aumentado, y que las tecnologías alternativas como la recolección de niebla y rocío representan soluciones sostenibles especialmente en zonas áridas o semiáridas (Ortiz-Aguas et al., 2024).

1 Captación de lluvia

A nivel internacional, los sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) han demostrado ser una alternativa viable para reducir la demanda sobre fuentes superficiales y subterráneas. La literatura indica que este tipo de sistemas puede cubrir un porcentaje significativo del consumo doméstico no potable superior al 40 % mediante su uso para riego, limpieza, cisternas, lavado y otras aplicaciones (Torres Hugues, 2019).

Asimismo, organismos globales como la Asociación Internacional de Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (IRCSCA) promueven estas tecnologías desde la década de 1980, impulsando métodos sostenibles y de bajo costo para comunidades vulnerables (Gnadlinger, 2015).

Imagen representativa del ciclo hídrico en sus estados.



Nota Elaboración propia con base en información teórica de Ortiz-Aguas et al. (2024).

1.3.2. Captación de agua de niebla

La captación de niebla se ha implementado en distintas regiones del mundo como en Chile, Perú, Bolivia y México con resultados positivos en las zonas donde las precipitaciones son bajas, pero existe una presencia constante de bruma o niebla adveccional. Según estudios, estas tecnologías funcionan de forma sostenible cuando se combinan mallas especializadas, como la Raschel o las mallas PET tejidas que permiten interceptar microgotas presentes en la niebla (Ortiz-Aguas et al., 2024).

Investigaciones en Perú y Bolivia demuestran que esta tecnología es especialmente útil en zonas costeras donde las nieblas se originan cuando masas de aire cálido y húmedo avanzan horizontalmente sobre aguas frías, condensándose al alcanzar el punto de rocío (Zabalketa, 2012).

Este tipo de nieblas también ocurre en sectores de la Patagonia atlántica, donde la combinación de humedad costera, vientos intensos y contrastes térmicos favorecen la formación de neblina estacional, lo cual abre una oportunidad para sistemas de captación en áreas como Punta Delgada.

3



Imagen representativa de la formación de niebla adveccional.

Nota. Elaboración propia a partir de la explicación atmosférica descrita en *Análisis del sistema de Atrapanieblas y rocío* (Ortiz-Aguas et al., 2024).

1.3.3. Captación de agua de rocío

El rocío se ha estudiado como recurso hídrico complementario en zonas áridas con radiación nocturna elevada y humedad nocturna moderada. La literatura señala que su eficiencia depende de factores como la temperatura del sustrato, la radiación neta nocturna, la velocidad del viento y el tipo de condensador (Acosta & Herrera, 2023).

Los condensadores planos inclinados entre 30° y 35° han mostrado mayor rendimiento, y su diseño puede adaptarse a materiales de bajo costo. Se han documentado proyectos capaces de recolectar hasta 500 L diarios, dependiendo de las condiciones ambientales y del tamaño de la superficie condensadora (Acosta & Herrera, 2023).

En el Faro Punta Delgada, donde se registran noches frías, humedad marina y elevadas tasas de evaporación, el comportamiento del rocío adquiere relevancia como complemento a la captación de lluvia y niebla.

1.3.4. Relevancia para el Faro Punta Delgada

Los antecedentes revisados permiten identificar un patrón clave: las tecnologías de captación atmosférica son más efectivas en zonas con combinación de bruma marina, noches despejadas y vientos constantes, condiciones que se encuentran en la Península Valdés según estudios climáticos locales (INTA Trelew; Scian & Mattio, 1980).

La región presenta precipitaciones bajas (≈ 230 mm/año), humedad relativa variable, eventos de niebla ocasionales, altas tasas de evaporación y vientos fuertes que favorecen la humedad oceánica.

Esto comprueba que la combinación de captadores de lluvia, niebla y rocío es pertinente para mejorar la disponibilidad hídrica del faro, especialmente para el abastecimiento del personal y para reducir la dependencia de recursos transportados mediante coordinaciones logísticas.

Esquema representativo de un sistema hídrico integrado (niebla, lluvia y rocío).



Nota. Elaboración conceptual propia basada en estudios de INTA Trelew, Scian &

Mattio (1980) y en el análisis climático de los documentos “Clima zona Chubut” y “Clima Península Valdés”.

El abastecimiento de agua en el Faro Punta Delgada constituye uno de los principales desafíos operativos debido a las características ambientales de la Península Valdés y al aislamiento geográfico del mismo.

Actualmente, el faro no cuenta con fuentes naturales de agua dulce cercanas. Por esta razón, el abastecimiento depende casi exclusivamente del transporte terrestre, un mecanismo que, si bien garantiza la provisión mínima necesaria, se ve constantemente afectado por las condiciones del terreno, las distancias y la logística requerida. Los caminos internos de Península Valdés particularmente los que conducen al sector del Faro Punta Delgada suelen presentar tramos de ripio, arenales inestables y sectores vulnerables a la erosión eólica, lo que dificulta el tránsito de vehículos pesados utilizados para transportar agua.

A nivel operativo, esta dependencia logística genera vulnerabilidad. La provisión de agua se realiza mediante cisternas y botellones deben recorrer más de 70 km desde centros urbanos como Puerto Pirámides o Puerto Madryn. Factores como el clima, los vientos intensos, y la baja visibilidad por niebla pueden interrumpir estas operaciones, ocasionando situaciones de racionamiento temporal para el personal de servicio. Asimismo, la infraestructura de almacenamiento disponible en el faro, compuesta por tanques de reserva con capacidad limitada, obliga a realizar suministros frecuentes para evitar el desabastecimiento.

Desde el punto de vista humano, el déficit hídrico afecta las condiciones de habitabilidad. El agua disponible se destina de manera prioritaria al consumo básico, limitando su uso para actividades secundarias como limpieza general, mantenimiento o riego de sectores perimetrales. Además, el personal debe aplicar protocolos estrictos de ahorro hídrico, lo que demuestra una situación de estrés permanente respecto al recurso.

La proximidad al mar no representa una opción viable debido al alto contenido salino, que vuelve inviable el uso directo sin sistemas de desalinización, los cuales implican costos energéticos que exceden la capacidad operativa del faro. En conjunto, el análisis evidencia que el sistema hídrico actual del Faro Punta Delgada se basa en un modelo dependiente de insumos externos, vulnerable a contingencias climáticas y logísticas. Esta situación justifica la necesidad urgente de incorporar tecnologías alternativas de captación atmosférica como la recolección de lluvia, niebla y rocío que permitan aumentar la autonomía operativa, mejorar la habitabilidad del personal y reducir la carga logística asociada al suministro convencional.

La captación de lluvia, niebla o rocío ha sido estudiada y aplicada en diversos países del mundo, especialmente en regiones áridas, semiáridas y costeras

donde las precipitaciones son escasas y el acceso al agua superficial o subterránea es limitado. La revisión de experiencias internacionales permite comprender el potencial de estas tecnologías y su aplicabilidad en contextos de aislamiento geográfico como el del Faro Punta Delgada.

Figura5.

Representación de las principales experiencias internacionales de captación de agua.



Nota. *Elaboración propia basada en información de Ortiz-Aguas et al. (2024), Zabalketa (2012), Torres Hugues (2019) y Acosta & Herrera (2023).*

1 Experiencias

La recolección de niebla ha sido una de las técnicas más exitosas en regiones donde la bruma costera es recurrente.

Los antecedentes más citados se encuentran en:

Chile - Norte Chico (Región de Coquimbo)

La localidad de Falda Verde y la zona del Parque Nacional Fray Jorge son referentes mundiales en captación de niebla. Allí se instalaron los llamados “Atrapanieblas Tipo Raschel”, con mallas de 35% y 65% de sombra que permitieron recolectar entre 2 y 15 L/m²/día, dependiendo de la intensidad del viento (Ortiz-Aguas et al., 2024). Este modelo chileno se convirtió en estándar internacional por su bajo costo, fácil mantenimiento y alta eficiencia en zonas costeras con niebla adveccional.

En Perú Lomas de Arequipa y zonas alto andinas, los sistemas de atrapanieblas han sido utilizados para el abastecimiento humano, riego de reforestación nativa y recuperación de lomas costeras. Los estudios indican que estructuras de 40 m² pueden producir más de 200 L diarios en campañas de invierno (Zabalketa,

2012).

En Bolivia - Altiplano Sur, el proyecto “Niebla para la Vida” implementó captadores para abastecimiento rural con resultados eficientes en comunidades aisladas. Se registraron rendimientos promedio de 5 a 8 L/m²/día, dependiendo de la exposición y altura del terreno.

La captación de agua de lluvia es la técnica internacional más extendida. Se

1.5.2. Antecedentes en captación de agua de lluvia

utiliza en países desarrollados y en desarrollo, tanto para abastecimiento doméstico como para uso agrícola.

En India, Japón y Corea, son referentes en sistemas de recolección en techos (SCALL). Desde los años 70, estos países integran sistemas domésticos que permiten ahorrar hasta un 40% y 50% del consumo anual de agua potable (Torres Hugues, 2019). En regiones como México, Colombia y Centroamérica la captación de lluvia es política pública en zonas rurales ha surgido resultados en la que un solo sistema de 10.000 L puede abastecer a familias enteras durante la temporada seca.

En Argentina, aunque menos difundida, la captación de lluvia ha sido aplicada en provincias áridas como Mendoza, San Juan, Catamarca y La Rioja en proyectos productivos y educativos. No así en faros o instalaciones costeras aisladas, lo que convierte este proyecto en uno de los primeros antecedentes a nivel nacional.

1.5.3. Antecedentes en captación de rocío (Dew)

El rocío es una fuente hídrica complementaria estudiada principalmente en Israel, Marruecos, Francia y Arabia Saudita. Los dispositivos más utilizados son los condensadores radiativos, cuya eficiencia depende de la diferencia térmica nocturna y la humedad relativa. En condiciones óptimas pueden recolectar entre 0,1 y 0,8 L/m²/noche, siendo útil como aporte adicional (Acosta & Herrera, 2023).

1

Los aportes relevantes internacional permite identificar varios puntos clave aplicables como son las zonas costeras con niebla adveccional que son ideales para la captación de niebla, aunque la Península Valdés no presenta este fenómeno tan continuo como en el Pacífico sudamericano, sus eventos de bruma marina, humedad costera y vientos intensos constituyen condiciones aptas para este sistema de recolección. Asimismo, también establece efectiva la captación de lluvia incluso en zonas áridas con precipitaciones de ~200 mm/año. El faro puede recuperar agua valiosa si se diseñan superficies colectoras amplias, canaletas eficientes y tanques de almacenamiento aptos para la salinidad ambiental. Inclusive el rocío es útil como recurso auxiliar dadas las noches frías y húmedas de la región, los condensadores radiativos pueden funcionar como aporte diario complementario.

Por lo tanto, los antecedentes internacionales confirman que la solución más eficiente es un sistema híbrido.

La combinación lluvia + niebla + rocío es la única estrategia que reduce la

dependencia del transporte terrestre, mejora la autonomía del faro y no requiere infraestructura compleja.

La niebla adveccional constituye uno de los fenómenos atmosféricos más relevantes para la captación de agua en zonas costeras, y su presencia en la Península Valdés representa un recurso hídrico potencial para instalaciones aisladas como el Faro Punta Delgada. Este tipo de niebla se genera cuando una masa de aire cálido y húmedo se desplaza horizontalmente (por advección) sobre una superficie más fría, produciendo condensación en suspensión al alcanzar el punto de rocío (Zabalketa, 2012).

En el caso particular del litoral patagónico, la interacción entre el aire húmedo proveniente del Océano Atlántico y las temperaturas más frías de la superficie terrestre genera episodios de niebla costera, especialmente durante madrugadas y mañanas con condiciones de estabilidad atmosférica. Estos eventos pueden ser breves o persistentes dependiendo de variables como: Temperatura superficial del mar, gradiente térmico aire/tierra, dirección e intensidad del viento, humedad relativa ambiental, condiciones de cielo despejado y radiación nocturna previa.

La humedad marina, combinada con vientos predominantes del este y del sudeste, favorece la entrada de masas de aire saturado hacia el interior costero, lo que incrementa la probabilidad de formación de nieblas adveccionales en sectores elevados como el acantilado donde se ubica el faro. Estas características son especialmente significativas para el análisis técnico de captación hídrica, ya que los sistemas de recolección de niebla como los captadores tipos Raschel o mallas de polipropileno funcionan de manera más eficiente cuando la niebla presenta movimiento horizontal impulsado por el viento.

En otras palabras, no es la presencia estática de neblina lo que garantiza la recolección, sino su desplazamiento constante, que permite que las microgotas choquen contra la malla colectora, se unan y escurran hacia un canal de drenaje. El viento en Punta Delgada, incrementa la tasa de impacto de las microgotas y potencia la eficiencia del sistema, siempre que se utilicen estructuras ancladas y resistentes. Por esta razón, si bien la frecuencia anual de niebla puede ser inferior a otras regiones del continente, cuando los eventos ocurren, lo hacen con condiciones aerodinámicas particularmente adecuadas para su aprovechamiento como recurso hídrico complementario.

Asimismo, la ubicación del faro facilita la interceptación de flujos de niebla en altura, donde la humedad tiende a condensarse de manera más visible y concentrada. Este aspecto geomorfológico aumenta el potencial hídrico disponible, ya que los captadores se benefician de la orientación y pendiente del relieve costero.

1.7. Influencia del viento y la humedad en la disponibilidad

El viento y la humedad atmosférica desempeñan un papel determinante en la dinámica hídrica de Península Valdés y en las posibilidades de captación alternativa en el Faro Punta Delgada. Ambos factores constituyen variables ambientales críticas que condicionan tanto la formación niebla, bruma y rocío como la eficiencia de los sistemas de recolección pasiva basados en intercepción de microgotas.

La región se caracteriza por la presencia de vientos persistentes e intensos, predominantemente del sector oeste-sudoeste, con velocidades medias que oscilan entre los 30 y 40 km/h, aunque en determinadas épocas pueden registrarse ráfagas superiores a los 70 km/h. Este comportamiento, típico de la estepa patagónica, incrementa la tasa de evaporación y favorece la aridez general del ambiente (Clima zona Chubut, s.f.). Sin embargo, desde la perspectiva de la captación atmosférica, este mismo viento constituye un factor positivo, pues permite que las masas de niebla costera se desplacen horizontalmente y aumenten la eficiencia de los captadores, dado que las microgotas impactan con mayor energía sobre las superficies colectoras.

La humedad relativa es otro componente decisivo. En Punta Delgada, los valores se encuentran generalmente entre el 70 % y el 85 %, especialmente en horas nocturnas y durante la madrugada, cuando el descenso brusco de temperatura favorece la condensación del vapor de agua.

De acuerdo con Ortiz-Aguas et al. (2024), la presencia de niebla depende tanto de la humedad ambiental como de la estabilidad térmica del aire, lo que coincide con las características climáticas del sector costero patagónico. Además, la proximidad al océano modula la humedad y actúa como fuente primaria de vapor, lo que incrementa la probabilidad de brumas marinas. Cuando las masas de aire húmedo avanzan sobre la superficie terrestre más fría, se generan condiciones propicias para la condensación horizontal, que puede ser aprovechada mediante mallas colectoras como las utilizadas en Chile, Perú y Bolivia.

El viento, al acelerar el desplazamiento de las microgotas, aumenta significativamente la productividad potencial de estos sistemas, lo que refuerza la pertinencia de su aplicación en el faro. Por otro lado, la interacción entre

viento, humedad y topografía también influye en la formación de rocío. Las noches despejadas con marcada pérdida de radiación favorecen el enfriamiento de las superficies y permiten la condensación directa de agua en forma de microgotas, especialmente en superficies inclinadas y con alta masividad térmica.

La disponibilidad de rocío, si bien modesta en comparación con la niebla o la lluvia, constituye una fuente complementaria valiosa en ambientes de baja disponibilidad hídrica (Acosta & Herrera, 2023).

Entre los vientos intensos, humedad relativa elevada, influencia oceánica y condiciones térmicas particulares convierte al Faro Punta Delgada en un entorno con potencial significativo para la captación atmosférica.

1.8. Potencial hídrico atmosférico del Faro Punta

El potencial hídrico atmosférico del Faro Punta Delgada depende de la capacidad del ambiente costero para generar y sostener fenómenos de condensación y transporte de humedad tales como lluvia, niebla y rocío. Este potencial no suele ser considerado en los modelos tradicionales de abastecimiento, pero ha demostrado ser una alternativa viable en zonas costeras áridas de distintas partes del mundo, como Chile, Perú y Marruecos (Zabalketa, 2012). En el caso específico de la Península Valdés, la presencia constante de bruma marina y eventos de niebla adveccional constituye una fuente hídrica de interés. Aunque su frecuencia es moderada, permiten una adecuada eficiencia en sistemas de captación pasiva mediante mallas colectoras. Según estudios aplicados en zonas similares, las tasas de recolección pueden oscilar entre 2 y 10 L/m²/día dependiendo de la intensidad del viento y la saturación del aire (Ortiz-Aguas et al., 2024).

A su vez, la precipitación anual de la región, aunque baja, constituye un aporte complementario si se implementan superficies colectoras adecuadas, canalizaciones y techos diseñados para maximizar el escurrimiento.

En regiones áridas del mundo, sistemas de captación de lluvia correctamente dimensionados permiten almacenar reservas suficientes para cubrir consumos domésticos o institucionales durante meses, incluso con precipitaciones similares a las de Península Valdés (Torres Hugues, 2019).

El rocío, aunque menos voluminoso, también representa un recurso hídrico

aprovechable en Punta Delgada. Las noches frías, la alta humedad relativa y la pérdida de radiación favorecen la condensación de microgotas sobre superficies horizontales o inclinadas.

Desde el punto de vista energético, la captación atmosférica presenta una ventaja adicional ya que, no requiere energía eléctrica ni infraestructura compleja puesto que, se trata de tecnologías pasivas que funcionan únicamente gracias a las condiciones ambientales ya presentes en el lugar. Esto es particularmente relevante en instalaciones aisladas como el Faro Punta Delgada, donde el suministro energético es limitado y la logística de abastecimiento es costosa. Además, la ubicación geográfica estratégica del faro permite un contacto constante con masas de aire saturado y brumas ascendentes, lo que aumenta la probabilidad de condensación y la velocidad de impacto de las microgotas en los sistemas de captación.

CAPÍTULO II: Propuesta técnica del sistema de captación y su aplicabilidad.

2.1. Introducción al diseño del sistema y criterios

El diseño de un sistema de captación hídrica para el Faro Punta Delgada requiere una evaluación integral de las condiciones climáticas, ambientales, geográficas y operativas del sitio. Debido al aislamiento propio de la Península Valdés y a la baja disponibilidad de fuentes convencionales de agua dulce, la implementación de tecnologías alternativas que aprovechen los recursos atmosféricos constituye una estrategia viable y ambientalmente sostenible para mejorar la autonomía del faro y reducir su dependencia del transporte terrestre.

Considera la disponibilidad real del recurso hídrico en Faro Punta Delgada, evaluando las precipitaciones anuales bajas pero aprovechables, los episodios estacionales de niebla adveccional, la alta humedad relativa en zona costera, la presencia de rocío en noches frías y despejadas y los vientos intensos que aumentan la eficiencia de los captadores de niebla.

Este criterio se basa en estudios climáticos que indican que, si bien la región es árida, posee las condiciones necesarias para operar con tecnologías de captación pasivas.

2.1.2. Criterio técnico - operativo

Evalúa la factibilidad de instalación, mantenimiento y operación del sistema en un contexto aislado, considerando la disponibilidad limitada de personal, la exposición extrema al viento, la necesidad de materiales resistentes a la corrosión marina, la facilidad de limpieza, reparación y anclaje y la compatibilidad con la infraestructura existente del faro.

Dado que el faro depende de abastecimientos externos, se priorizan tecnologías

2.1.3. Criterio logístico

que reduzcan la frecuencia de transporte de agua, impliquen bajo costo energético, no dependan de redes eléctricas complejas, puedan montarse con herramientas básicas, permitan ampliaciones futuras sin grandes intervenciones.

2.1.4. Criterio económico

Establece una relación de costo y beneficio donde se compara materiales requeridos como la vida útil estimada, el rendimiento esperado ($L/m^2/día$), el costo de mantenimiento y el ahorro en transporte de agua. La implementación de sistemas de captación atmosférica a diferencia de los sistemas de desalinización o perforación de pozo presenta costos iniciales moderados y muy bajos costos de operación.

2.1.5. Criterio de sostenibilidad

La propuesta debe garantizar una protección ambiental, la reducción del impacto ecológico, la disminución de la huella de carbono asociada al transporte, el respeto por la fauna y flora típica de Península Valdés y la mínima intervención del entorno natural. El enfoque se enmarca en principios de sostenibilidad y economía circular, utilizando tecnologías pasivas y energéticamente eficientes.

Tecnologías disponibles la

La captación de agua en ambientes áridos o con disponibilidad limitada puede realizarse mediante diversas tecnologías pasivas y de bajo costo. Estas tecnologías se basan en la recolección directa de agua atmosférica en sus distintas formas: lluvia, niebla y rocío. En este apartado se describen los principales sistemas utilizados a nivel internacional, su funcionamiento y su aplicabilidad potencial al contexto del Faro Punta Delgada.

2.2.1. Captación de agua de lluvia

La captación de agua de lluvia es una de las técnicas más antiguas y extendidas en el mundo. Se fundamenta en recoger el agua precipitada sobre superficies adecuadas y almacenarla en tanques o cisternas para su uso posterior. Los componentes principales del sistema son: La superficie colectora (Techo, cubierta o estructura diseñada para maximizar el escurrimiento), las Canaletas y bajadas (Conducen el agua hacia el sistema de almacenamiento), el Filtro previo / trampa de hojas (evita ingreso de sólidos), la cisterna o tanque (almacenamiento protegido de la radiación solar) y el sistema de desinfección opcional (Cloración, UV o filtros).

Sus ventajas es que posee un funcionamiento autónomo, es de alta eficiencia incluso en climas semiáridos, su Costo inicial es bajo y es de fácil mantenimiento. Sin embargo, posee ciertas limitaciones como la dependencia directa de eventos de lluvia, requiere superficies amplias para maximizar el volumen captado y es necesario mantenimiento frecuente para evitar corrosión en zonas de alta salinidad.

Cabe destacar, que la precipitación anual de ~200 mm puede ser aprovechada mediante techos metálicos, colectores inclinados o estructuras adicionales. El aporte anual estimado será calculado en el punto 2.5.

2.2.2. Captación de agua de niebla (Fog Harvesting)

El viento impulsa las microgotas contra la malla. Las gotas se adhieren, se agrupan y escurren hacia una canaleta inferior, que dirige el agua a un tanque de almacenamiento. Los componentes del sistema son: La Malla colectora (1 o 2 capas), los Postes de anclaje, los tensores y cables de acero, las canaletas colectoras y el tanque de almacenamiento.

Las variables que determinan la eficiencia del sistema es la velocidad del viento, la orientación respecto a la dirección dominante, la densidad de la malla (Raschel 35-65 %), la distancia entre hilos, la altura sobre el nivel del suelo y la humedad relativa.

Las ventajas es que puede recolectar entre 2 y 10 L/m²/día, posee bajo costo y alta durabilidad y no requiere energía eléctrica, sus limitaciones dependen de la presencia de niebla en movimiento (no estática) y Necesita anclajes fuertes por vientos intensos. Por la ubicación geográfica en donde se encuentra el Faro

Punta Delgada un sitio apto para instalar captadores de niebla orientados hacia el este/sudeste, de cara al océano.

El rocío es agua condensada directamente sobre superficies expuestas durante la noche cuando la temperatura cae por debajo del punto de rocío.

Los condensadores radiativos emiten calor hacia el cielo nocturno, logrando temperaturas más bajas que el aire circundante. Esto provoca la condensación del vapor de agua en forma de gotas que escurren hacia un depósito. Las

superficies utilizadas son polietileno blanco, PVC, chapas metálicas pintadas, vidrio tratado, polímeros especiales con alta emisividad. Permite recolectar agua incluso sin precipitación y son ideal en noches frías y húmedas son dos de sus ventajas.

Por otra parte, también posee limitaciones como que depende del cielo despejado, su rendimiento es menor ($0,1-0,8 \text{ L/m}^2/\text{noche}$) y no reemplaza otras fuentes. Dadas las bajas temperaturas nocturnas y la humedad relativa elevada, el faro presenta condiciones favorables para incorporar condensadores inclinados en combinación con captadores de niebla.

2.2.4. Comparación técnica de las tecnologías disponibles.

Tabla 1.

TECNOLOGÍA	RENDIMIENTO APROXIMADO	DEPENDENCIA CLIMÁTICA	COSTO	TIEMPO	FIABILIDAD
LLUVIA	150-230 mm/año	Alta	Bajo	Bajo	Muy Alta
NIEBLA	2-10 L/m ² /día	Media-alta	Bajo	Medio	Muy Alta
ROCÍO	0,1-0,8 L/m ² /noche	Media	Muy bajo	Bajo	Alta (complementaria)

Comparación técnica de sistemas de captación hídrica aplicables al Faro Punta Delgada.

Nota. *Elaboración propia basada en Ortiz-Aguas et al. (2024), Zabalketa (2012) y Acosta & Herrera (2023).*

la adecuada

La selección del sistema de captación hídrica para el Faro Punta Delgada debe basarse en una evaluación integral de las condiciones climáticas, ambientales, logísticas y operativas del sitio. Tras revisar las tecnologías disponibles con lluvia, niebla y rocío, los antecedentes internacionales y las particularidades del entorno patagónico, se concluye que la alternativa más adecuada para el abastecimiento hídrico del Faro Punta Delgada es la implementación de un sistema híbrido, capaz de aprovechar simultáneamente múltiples fuentes atmosféricas.

Los datos presentados en el Capítulo 1 demuestran que la precipitación anual es

Fundamentación
baja, pero aprovechable, con valores entre 150 y 230 mm/año. La Península

Valdés presenta episodios estacionales de niebla adveccional, ideales para mallas colectoras (Ortiz-Aguas et al., 2024). La humedad relativa de 70% a 85 % favorece a la captación de rocío, los vientos intensos de 30 a 40 km/h aumentan la eficiencia de los sistemas de niebla. Estas condiciones permiten una intercepción pasiva constante y complementaria.

2.3.2. Limitaciones de sistemas individuales

Captación de lluvia → insuficiente sola

Con 200 mm/año, se requiere una superficie colectora enorme para cubrir la demanda anual. Aun así, es imprescindible como aporte estacional.

Captación de niebla → altamente productiva pero intermitente

La niebla adveccional no es diaria en Península Valdés, pero sus eventos tienen alto rendimiento (2-10 L/m²/día). Es ideal como aporte principal, pero insuficiente sola.

Captación de rocío → complementaria, jamás principal

Produce volúmenes pequeños, pero útiles en noches claras de invierno. Por sí sola, no satisface la demanda. En definitiva un sistema único NO satisface las necesidades de continuidad operativa del faro.

El análisis comparativo demuestra que combinar estos tres sistemas permite

2.3.3. Ventajas del sistema híbrido

maximizar el rendimiento anual, reducir la vulnerabilidad climática (si un fenómeno no ocurre, otro sí), aumentar la autonomía hídrica, reducir costos operativos (toda la tecnología es pasiva no usa electricidad) y se adapta al ambiente costero patagónico.

Cada recurso atmosférico opera en momentos distintos:

- Lluvia en otoño, invierno y primavera.
- Niebla en mañanas costeras y días húmedos.
- Rocío en noches frías con cielo despejado

Justificación

El faro opera en un contexto de aislamiento geográfico extremo, es decir, el acceso por ruta es de 70 a 80 km desde Puerto Pirámides, la logística depende del estado del río, el viento y la visibilidad, los costos de transporte aumentan constantemente y la capacidad de almacenamiento del faro es limitada.

Al implementar un sistema híbrido permitiría garantizar una reserva anual estable, reduciría la dependencia de camiones (lo que disminuye costos, contingencias y riesgos) y mejoraría la habitabilidad del personal.

y

Tras evaluar las condiciones ambientales de Punta Delgada, los rendimientos potenciales y las limitaciones logísticas, se establece que:

El sistema más eficiente, económico y sostenible para el Faro Punta Delgada es un sistema híbrido de captación de lluvia + niebla + rocío.

Este sistema será desarrollado técnicamente en el apartado 2.4, donde se presentan: materiales, dimensiones, orientación, anclajes, esquema general y funcionamiento integrado.

2.4. Propuesta técnica del sistema híbrido de captación

El sistema propuesto integra tres tecnologías pasivas de recolección atmosférica captación de lluvia, captación de niebla y captación de rocío en una estructura modular adaptada a las condiciones climáticas y topográficas del Faro Punta Delgada. Esta integración permite maximizar el aprovechamiento del recurso hídrico en todas las estaciones del año y reducir de manera significativa la dependencia del abastecimiento externo por transporte terrestre.

El sistema híbrido se organiza en tres módulos funcionales: Modulo A (Captain de lluvia), Módulo B (Captación de niebla) y Módulo C (Captación de rocío). Todos los módulos descargan el agua recolectada en un colector principal, que conduce el recurso hacia un tanque de almacenamiento protegido contra radiación, salinidad y evaporación.

Este módulo utiliza las superficies existentes del faro (techos metálicos) y, de

2.4.1. Módulo A: Sistema de captación de agua de ser necesario, se complementa con una estructura colectora adicional.

Elementos principales:

- Superficie colectora: Techo metálico del faro + panel colector inclinado opcional (10-15°).
- Canaletas laterales: De PVC resistente a rayos UV o aluminio anticorrosivo.
- Filtro de primera escorrentía (first-flush): Reduce sólidos y partículas de polvo.
- Tuberías de bajada: Conectadas al tanque principal.
- Tanque de almacenamiento: De 1.000 a 3.000 L, según disponibilidad del faro.
 - La dimensión sugerida para un área colectora mínima recomendada es de 20 a 40 m² y su rendimiento estimado anual es 200 mm X 20 m² = 4.000 L/año (mínimo garantizado).

El aprovechar una infraestructura existente que es de bajo costo de implementación y posee un aporte estable cada año son ventajas principales.

Este es el módulo de mayor rendimiento para el faro, debido a la presencia recurrente de humedad oceánica, vientos de 30 a 40 km/h, el acantilado orientado al este/sudeste y la dinámica de niebla adveccional descrita en 1.6.

Los Componentes del sistema son:

- Malla Raschel 35/65%, doble capa.
- Postes metálicos galvanizados de 3/4 m de altura.
- Anclajes anti tormenta con cables de acero.
- Canaleta inferior de PVC reforzado.
- Manguera de drenaje hacia el tanque.
- Base de hormigón de baja profundidad (solo para estabilidad).

Las dimensiones recomendadas es una superficie colectora de 2 m X 4 m (8 m²), una altura de borde superior: 3, 5 m y poseer la dirección dominante del viento hacia la costa E/SE.

El Rendimiento estimado es 2 a 10 L/m²/día, dependiendo de la intensidad de la niebla El faro está ubicado sobre un acantilado elevado, condición óptima para interceptar flujos horizontales de micro gotas.

2.4.3. Módulo C: Sistema de captación de rocío

El rocío se recolecta mediante superficies inclinadas radiactivas, que se enfrian durante la noche y condensan el vapor de agua, es decir, agrega agua en noches sin niebla y en meses fríos.

Los Componentes del sistema son: una superficie de polietileno blanco o polímero radiactivo, la estructura inclinada 30°/35°, Canaleta de baja sección y soportes anti viento. Se recomienda ubicarlo en un sector lateral no expuesto a salpicaduras marinas y a una distancia mínima de 2 m del captador de niebla. Su rendimiento es de 0,1/0,8 L/m²/noche con un panel de 2 m² (0,2 a 1,6 L/noche).

El sistema híbrido descarga todos los módulos hacia un colector central

funcionamiento

compuesto por: tubería principal, válvula anti retorno, filtro grueso, tanque principal cerrado.

Las Ventajas del funcionamiento integrado es la recolección continua: lluvia + niebla + rocío, reducción del transporte externo de agua, autonomía anual, menor costo operativo y mayor seguridad para el personal.

Esquema de un sistema integrado híbrido situado en el Faro Punta Delgada.



Nota. Fuente propia (2025).

2.5. Cálculo aproximado del volumen de agua esperado

El rendimiento hídrico del sistema híbrido se estima a partir de la contribución de cada uno de sus módulos, si bien el clima de la Península Valdés presenta variabilidad interanual, es posible establecer valores promedio que permiten proyectar una producción hídrica anual conservadora y realista.

Para este cálculo se utilizaron los datos climáticos presentados en el capítulo anterior y parámetros validados a nivel internacional para sistemas pasivos.

2.5.1. Cálculo del volumen captado por lluvia

Se utiliza la fórmula estándar:

Volumen captado = Precipitación anual (m) × Área colectora (m^2) × Coeficiente de escurrimiento (0,8)

Suponiendo:

- Precipitación anual promedio: 200 mm = 0,20 m
- Área colectora total (techo + panel inclinado): 30 m^2
- Coeficiente de escurrimiento: 0,8 (metal / polímero)
- Volumen anual = $0,20 \times 30 \times 0,8 = 4,8 \text{ m}^3 = 4.800 \text{ litros/año}$
- Aporte estimado: 4.800 L/año

Los captadores de niebla (malla Raschel) pueden producir entre 2 y 10 L/ m^2 /día, según viento, humedad y densidad de microgotas. Tomamos un valor conservador: 4 L/ m^2 /día; Área de la malla: 8 m^2 ; Días útiles de niebla: 90 días/año (valor conservador basado en nieblas costeras estacionales).

Volumen anual = $4 \times 8 \times 90 = 2.880 \text{ litros/año}$

Aporte estimado: 2.880 L/año (en años con mayor frecuencia de niebla puede superar 5.000-6.000 L/año).

2.5.3. Cálculo del volumen captado por rocío

El rocío aporta volúmenes menores, pero constantes en noches frías y húmedas.

Valores internacionales de referencia:

0,1-0,8 L/m²/noche, dependiendo de la superficie radiactivas.; superficie estimada: 2 m²; valor conservador: 0,2 L/m²/noche; noches utilizables: 150 noches/año.

Volumen anual = $0,2 \times 2 \times 150 = 60$ litros/año

Aporte estimado: 60 L/año

2.5.4. Producción hídrica total del sistema híbrido

Tabla 2.

Tabla comparativa anual de almacenamiento de agua de la localidad Península de Valdés de los registros de lluvia, niebla y rocío de cada sistema

FUENTES	LITROS/AÑOS	PRODUCCIÓN TOTAL
LLUVIA	4.800L	
NIEBLA	2.880 L	7.740 L/AÑOS
ROCIO	60	

Nota. Valores estimados anual por la autora con datos utilizados en el capítulo 2

Con condiciones óptimas (más niebla + mejor área colectora), el sistema puede superar los 10.000 L/año.

Este volumen permite reducir significativamente la dependencia del transporte terrestre Con un tanque de 2.000L/3.000 L, el faro podría mantener una reserva estable.

La producción es autónoma, pasiva y continua a lo largo del año, Si se ampliara el sistema (malla de 16 m² + panel de lluvia de 40 m²), la producción podría duplicarse fácilmente.

Infraestructura

la implementación

La infraestructura requerida para implementar el sistema híbrido de captación de lluvia, niebla y rocío debe ser resistente a la corrosión marina, de bajo mantenimiento y adaptable al contexto ambiental del Faro Punta Delgada.

A continuación se describen los componentes principales para cada módulo y la estructura general del sistema.

El sistema de captación de lluvia se compone de estructuras que permiten la recolección eficiente del agua precipitada sobre superficies existentes o añadidas.

a) Superficies colectora: El material recomendado es chapa galvanizada; chapa

pre pintada color blanco o gris o polímero termoestable de alta durabilidad. Las dimensiones sugeridas son 20 a 40 m² según espacio disponible y la pendiente ideal: 10°/15° para maximizar el escurrimiento.

- b) Canaletas y bajadas: su material es PVC de alta densidad o aluminio anticorrosivo con el diámetro mínimo de 75 mm y con una unión sellada con silicona neutra.
- c) Filtro de primera escorrentía: evita que ingresen hojas, sedimentos y contaminantes. Se recomienda un sistema tipo "first flush" de 50-75 mm con tapón de purga inferior.
- d) Tubería hacia tanque: de PVC presión clase 10 o superior con un diámetro de 50 ms.

2.6.2. Infraestructura del módulo de captación de

Este módulo requiere estructuras reforzadas debido a los fuertes vientos del sector.

- a) Malla colectora Raschel: Raschel 35-65%, doble capa, color negro para mayor resistencia UV y costuras reforzadas con hilo poliéster.
- b) Posters de soporte: Caños galvanizados de 2" / 2,5", altura: 3/4 m y empotrados en bases de hormigón.
- c) Bases de hormigón: Profundidad: 0, 60-0, 80 m, dimensión mínima: 40 × 40 cm y utilizar mezcla H17 para resistencia salina.
- d) Tensores y sujetaciones: cables de acero galvanizado 3/16", tensores tipo "torniquete" y anclajes laterales fijados al suelo con estacas tipo "omega".
- e) Canaleta de recolección: PVC reforzado de 110 mm, inclinación mínima de 2% y la conexión a manguera de 1" hacia tanque.

Infraestructura

El sistema de rocío requiere menos estructura, pero debe instalarse en un sitio protegido del viento excesivo.

- a) Superficie radiactiva: material recomendado polietileno blanco, polímero de enfriamiento radiactivos, chapa pintada blanco mate Área sugerida: 2-4 m².
- b) Soporte: Estructura inclinada 30°- 35°, tubos galvanizados de 1", o madera tratada, anclaje con estacas y cable acerado.
- c) Canaleta pequeña: Sección de 50 mm, conexión a colector principal.

y

Todos los módulos descargan hacia un único conducto.

- a) Tubería principal: PVC 50 - 75 mm, unión en "Y" o "T" para integrar los módulos.
- b) Filtro grueso: Malla de 1 mm y cajón desmontable para limpieza mensual.
- c) Válvula antirretorno: Evita retrocesos hacia la malla de niebla.

2.6.5. Tanque de almacenamiento

El sistema requiere un tanque principal protegido de la radiación solar y la salinidad. Las Características recomendadas son: Capacidad: 1.000 a 3.000 L, material polietileno tricapa, apto para agua potable, color negro o azul para evitar crecimiento de algas, tapa hermética y respiradero con

2.6.6. Protección y seguridad del sistema

malla anti insectos y aislación perimetral con muretes o estructura metálica.

Dado que el faro se encuentra expuesto a vientos extremos, es necesaria una infraestructura de protección específica con anclajes reforzados en todos los postes, fijación anti-desgarro en las mallas, lonas anti-UV sobre superficies sensibles, señalización para evitar interferencias con fauna (aves) y separación mínima de 20 m del borde del acantilado.

2.7. Evaluación operativa y beneficios para el Faro

La implementación del sistema híbrido de captación hídrica integrado por la recolección de lluvia, niebla y rocío representa una solución técnica eficiente y sostenible para mejorar el abastecimiento de agua en el Faro Punta Delgada. La evaluación operativa del sistema permite verificar su viabilidad, estimar su rendimiento real y determinar su contribución a las condiciones de habitabilidad del personal destacado en el faro.

Esta evaluación se realiza considerando los criterios climáticos, logísticos y ambientales desarrollados en el Capítulo 1, así como los parámetros constructivos y de funcionamiento establecidos en el Capítulo 2.

Funcionamiento

El sistema opera de manera pasiva, sin requerimiento de energía externa, y su funcionamiento se basa en la interacción natural de los tres módulos:

a) Captación de lluvia: Operativa durante eventos de precipitación,

la superficie colectora conduce el agua hacia el sistema de filtrado y al tanque y su aporte es estacional pero seguro.

b) Captación de niebla: Funciona en condiciones de viento moderado a fuerte, humedad relativa elevada y con la presencia de niebla adveccional o estratos bajos. Constituye la principal fuente de agua durante buena parte del año, especialmente en invierno y primavera.

c) Captación de rocío: Actúa en noches despejadas y frías mediante condensación radiactiva. Si bien su aporte es menor, suma litros útiles en estaciones secas.

d) Tanque y conducción: Todos los módulos descargan el recurso hacia un tanque único, lo que simplifica el control, reduce las pérdidas y facilita la medición del rendimiento.

La operación general requiere únicamente de inspección visual semanal, limpieza mensual de filtros y tensión de cables cada 60-90 días.

2.7.2. Viabilidad logística y mantenimiento

El sistema está diseñado para minimizar la carga de trabajo del personal del faro, que opera en condiciones de aislamiento puesto que no requiere maquinaria pesada para su instalación, los repuestos son de bajo costo y fácil reposición, los componentes son modulares, livianos y reemplazables y el mantenimiento es mínimo y puede realizarse con herramientas básicas.

La Frecuencia de mantenimiento recomendada son la revisión de los tensores cada 30-45 días, la limpieza de filtro de primera escorrentía mensual, la limpieza de canaletas trimestral y la verificación del tanque mensual.

El sistema está pensado para operar con mínimos recursos humanos, adaptados a la rutina del personal del faro.

2.7.4. Beneficios para la habitabilidad del personal

El abastecimiento hídrico es un factor crítico para el bienestar físico y psicológico del personal del faro. El sistema propuesto contribuye a que el faro Punta Delgada deje de depender exclusivamente del transporte terrestre, que es costoso e inestable, la disponibilidad continua de agua todos los días del año desde alguna de sus fuentes.

Mejoras de las condiciones sanitarias y la seguridad ante emergencias meteorológica permitiendo disponer reservas ante temporales, nevadas o cortes de ruta. El sistema puede ampliarse fácilmente como más metros de malla de niebla, mayor superficie colectora de lluvia y más paneles de rocío sin necesidad de alterar la infraestructura existente del faro.

El sistema híbrido demuestra ser técnicamente viable, ambientalmente sostenible, económicamente accesible y logísticamente adecuado para las condiciones específicas del Faro Punta Delgada. Su diseño, basado en criterios de eficiencia climática y resistencia estructural, asegura un suministro continuo de agua que mejora de forma significativa la habitabilidad y autonomía del establecimiento.

CONCLUSIÓN

El presente Trabajo Final Integrador permitió abordar de manera sistemática, rigurosa y multidimensional la problemática del abastecimiento hídrico en el Faro Punta Delgada. A partir de un enfoque descriptivo, analítico y sustentado en fuentes bibliográficas especializadas, se construyó un diagnóstico preciso sobre las limitaciones estructurales, las particularidades climáticas de la Península Valdés y las condiciones operativas que enfrenta el personal destinado a este enclave estratégico. El estudio demostró que la carencia del suministro básico, particularmente agua dulce, constituye la principal restricción para la habitabilidad y sostenibilidad del faro, generando un escenario de dependencia logística que compromete tanto la eficacia operativa como el bienestar cotidiano de sus ocupantes.

El análisis ambiental realizado evidenció que el faro se encuentra inserto en un entorno caracterizado por un clima árido, escasa precipitación anual, elevada evapotranspiración, fuertes vientos y humedad relativa fluctuante. Estas condiciones, si bien limitan la disponibilidad de fuentes convencionales de agua, al mismo tiempo ofrecen un marco propicio para la captación pasiva de recursos atmosféricos como lluvia, niebla y rocío. En este sentido, la investigación destacó la necesidad de transitar desde un modelo de abastecimiento exclusivamente dependiente del transporte terrestre hacia uno basado en tecnologías sostenibles, autónomas y acordes con las limitaciones geográficas del lugar.

La revisión de antecedentes internacionales y regionales permitió situar la problemática del faro en una perspectiva global, mostrando que la captación atmosférica no es una tecnología experimental, sino un método consolidado que ha demostrado eficiencia en múltiples regiones áridas del mundo. Países como Chile,

Perú, Bolivia, Marruecos, Israel e India han implementado sistemas de captación de niebla, lluvia y rocío con resultados exitosos, logrando abastecer comunidades rurales, proyectos de reforestación y asentamientos aislados. La comparación de estos casos permitió identificar patrones comunes en zonas donde la humedad adveccional, la bruma costera y la variación térmica nocturna constituyen una fuente hídrica latente que puede ser transformada en recurso disponible mediante estructuras de baja energía y fácil mantenimiento.

En tal sentido, el trabajo no solo documentó los potenciales hídricos de la Península Valdés, sino que además integró dichos datos en un marco teórico que vincula la ingeniería ambiental, la gestión hídrica sostenible y la adaptación tecnológica para zonas aisladas. El aporte conceptual más significativo se centra en el reconocimiento del “potencial hídrico atmosférico” como categoría analítica válida para la planificación de infraestructuras autónomas en territorios remotos. Esta categoría permitió comprender que, aun en contextos de estrés hídrico, la atmósfera puede desempeñar un papel activo como fuente de captación cuando se aplican las tecnologías adecuadas.

A partir de la contextualización climática y de los antecedentes revisados, el trabajo

concluyó que la opción más eficiente, sostenible y técnicamente viable para el Faro Punta Delgada es la implementación de un sistema híbrido de captación hídrica, integrado por tres módulos complementarios: captación de lluvia, captación de niebla y captación de rocío. Este enfoque sistémico se justificó por la necesidad de diversificar las fuentes de aporte hídrico, reducir la vulnerabilidad ante la variabilidad meteorológica y maximizar el rendimiento anual mediante un funcionamiento continuo que no depende de una única condición climática.

El diseño técnico del sistema híbrido demostró que las tres tecnologías pueden operar de manera articulada, sin requerimiento de energía eléctrica y con un mantenimiento mínimo. El módulo de captación de lluvia aprovecha infraestructura existente del faro, mientras que el módulo de niebla constituye la principal fuente de aporte debido a la presencia recurrente de bruma marina impulsada por vientos intensos. El módulo de rocío, aunque de aporte menor, suma un caudal útil en noches frías y despejadas, reforzando la continuidad operativa del sistema. La integración de los tres módulos en un colector central optimiza la eficiencia del almacenamiento y simplifica la administración del recurso.

Los cálculos estimativos realizados permitieron concluir que el sistema híbrido podría generar un volumen anual aproximado de entre 7.000 y 10.000 litros, cifra que puede duplicarse mediante ampliaciones estructurales moderadas. Desde un punto de vista operativo, esta producción representa una mejora sustancial frente al modelo actual de abastecimiento, caracterizado por dependencias logísticas frecuentes, costos elevados, interrupciones por eventos climáticos y riesgos derivados del transporte por caminos de ripio. En consecuencia, el sistema propuesto no solo incrementa la autonomía hídrica del faro, sino que también reduce significativamente la exposición a contingencias operativas.

Desde el punto de vista humano y social, la implementación del sistema híbrido constituye un avance concreto en la mejora de la habitabilidad del personal destinado al faro. La disponibilidad estable de agua repercute directamente en el bienestar psicológico, sanitario y laboral de quienes cumplen funciones allí. Además, la propuesta contribuye a fortalecer la capacidad de respuesta del faro frente a emergencias meteorológicas que puedan impedir temporalmente el acceso por vía terrestre. En un contexto donde el personal permanece aislado por períodos prolongados, contar con un recurso hídrico autónomo no solo es una mejora operativa, sino también un refuerzo a la seguridad y a la salud general de la dotación.

A nivel ambiental, el sistema destaca por su carácter pasivo y por la reducción significativa de la huella ecológica. Al disminuir la frecuencia de transporte terrestre actividad que involucra consumo de combustibles fósiles y deterioro del ecosistema, el sistema promueve un enfoque sostenible alineado con políticas internacionales de mitigación del cambio climático y con los principios de la conservación ambiental establecidos para la Península Valdés, área protegida de alto valor ecológico. De esta forma, la propuesta se integra plenamente con la responsabilidad ambiental que implica operar en un sitio declarado Patrimonio

Natural de la Humanidad por la UNESCO.

Desde una perspectiva metodológica, el trabajo permitió demostrar que la triangulación entre análisis climático, revisión bibliográfica y evaluación técnica constituye una herramienta eficaz para la toma de decisiones en infraestructuras aisladas. Esta metodología puede ser replicada en otros faros del litoral argentino que enfrentan problemáticas similares, como Punta Norte, Isla de los Estados, Cabo Blanco o Clamoreó. Asimismo, la investigación abre nuevas líneas para futuros estudios orientados a optimizar materiales, expandir superficies colectoras, evaluar el comportamiento hídrico interanual y adaptar tecnologías de mayor rendimiento basadas en desarrollos recientes de ingeniería atmosférica.

En síntesis, la investigación desarrollada permite afirmar de manera concluyente que la implementación de un sistema híbrido de captación hídrica constituye una solución técnica sólida, sostenible, pertinente y adaptada a las necesidades reales del Faro Punta Delgada. El sistema no solo responde eficazmente a la pregunta de investigación originalmente planteada, sino que además contribuye al fortalecimiento operativo del faro, mejora la calidad de vida del personal, reduce los riesgos asociados al modelo actual de abastecimiento y posiciona al faro como un caso pionero en la aplicación de tecnologías de captación atmosférica en instalaciones costeras argentinas.

Finalmente, este trabajo aspira a trascender el marco del TFI, constituyendo un aporte concreto al diseño de estrategias de gestión hídrica para zonas aisladas y promoviendo un enfoque innovador basado en el aprovechamiento responsable de los recursos atmosféricos disponibles. La propuesta se enmarca en un paradigma contemporáneo de sostenibilidad que reconoce que el acceso al agua, aun en territorios con limitaciones severas, puede alcanzarse mediante soluciones creativas, eficientes y ambientalmente respetuosas. El faro Punta Delgada, con la implementación de este sistema híbrido, tiene la posibilidad de convertirse en un modelo de referencia nacional para infraestructuras autosuficientes en contextos remotos.

BIBLIOGRAFÍA.

- Acosta, J., & Herrera, M. (2023). Metodología para el uso de captadores de rocío: Una aproximación a una solución sostenible para el recurso hídrico en Maicao, La Guajira. Universidad de La Guajira.
- Bejarano, P.(s.f.). Monografía técnica sobre sistemas alternativos de abastecimiento hídrico.
- Citación de Fuentes Bibliográficas. (2025). Presentación de normas APA 7^a edición [Archivo PowerPoint].
 - Dialnet.(2021). Análisis del sistema de atrapanieblas y rocío por medio de unidades experimentales. <https://dialnet.unirioja.es>
 - Google Maps.(2025). Mapa satelital del Faro Punta Delgada, Península Valdés. <https://www.google.com/maps>
 - Guía de campo Península Valdés. (2018). Guía de campo ambiental y climática para la región de Península Valdés (JNGF XII).
 - Historia climática patagónica. (2019). Reseña histórica de lluvia antes y ahora en la región patagónica.
 - Ministerio de Ambiente de Chubut. (2020). Clima de la zona de Chubut.
 - Ministerio de Ambiente de Chubut. (2020). Clima de la Península de Valdés.
 - M., García, R., & Yupanqui, T. (2024). Captación de agua de niebla para reforestación en Perú y Bolivia. Universidad Agraria La Molina.
 - Tesis Nancy.(2017). Sistemas de captación de niebla aplicados en áreas costeras de Chile.
 - Torres Hugues, J.(2019). Uso de sistemas de captación de lluvia en zonas áridas: Estudio comparativo en Latinoamérica. Editorial Académica del Pacífico.
 - Tutorial APA 2020. (2020). Guía oficial de citación APA, 7^a edición.
 - Zabalketa.(2012). *Sistemas de captación de niebla en contextos rurales de alta aridez*. Centro de Estudios Hídricos del Área Andina