

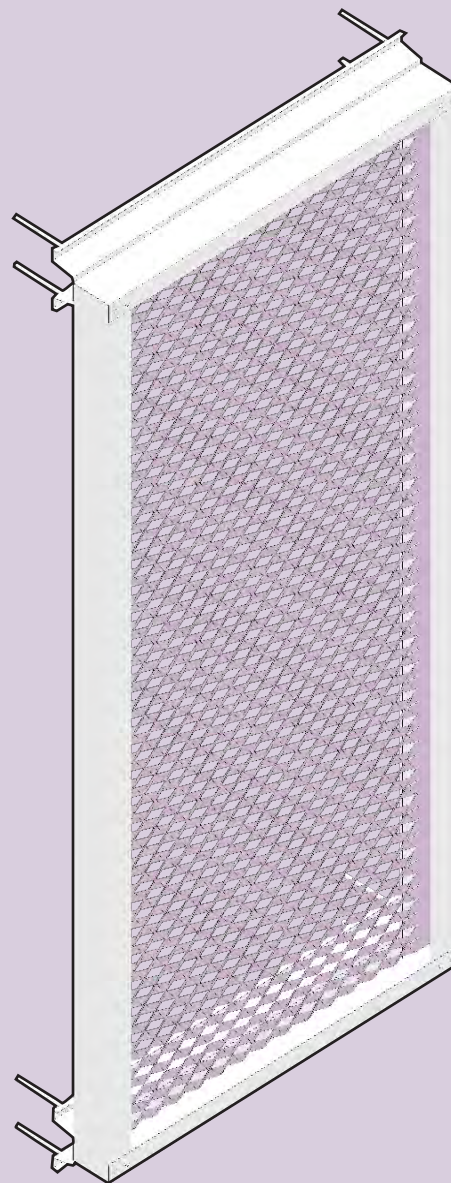


UTFSM - Departamento de Arquitectura
Santiago de Chile, Julio 2026

KIRI-NET



PROTOTIPO DE PANEL PARA ENVOLVENTE
ARQUITECTÓNICA CAPTADOR DE AGUA
ATMOSFÉRICA



Constanza Andrea Menares Puchi



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: KIRI-NET PROTOTIPO DE PANEL PARA ENVOLVENTE ARQUITECTÓNICA CAPTADOR DE AGUA ATMOSFÉRICA

Nombre del candidato(a): Constanza Menares Ruchi

Carrera / Grado: Arquitectura

Campus: San Joaquín Departamento: Arquitectura

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Francisco Javier Quitral Zapata, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a)

del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 04/09/2026

Firma:

Digitally signed by Francisco Quitral
Date: 2026.09.04 17:23:47-04'00'
Foxit PDF Editor Version: 13.1.7

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 04/09/2026

Firma:

Constanza

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, en primer lugar, a mis padres, Chery y Bernabé, por su apoyo incondicional durante cada etapa de este proceso. Gracias por confiar siempre en mí, por impulsarme a superar los desafíos y por brindarme las herramientas y la fortaleza necesarias para llegar hasta aquí.

A mi pareja y compañero de vida, Jesús Parra Maureira. Hace seis años nuestros caminos se cruzaron y, sin duda, ha sido una de las mejores coincidencias de mi vida. Gracias por tu amor, paciencia y compañía incondicional durante este proceso. Gracias por sostenerme en los momentos difíciles, celebrar cada avance y ayudarme a ver las dificultades desde una perspectiva más amable. Tu tranquilidad, alegría y constante apoyo hicieron que este camino fuera mucho más llevadero. Eres mi mejor amigo y mi mejor compañero.

A mi familia, especialmente a mis abuelos Sergio, Yolanda, Juana y Miguel, por su cariño, preocupación y apoyo permanente a lo largo de esta etapa y durante toda mi vida. A mi tía Caro, por abrirme las puertas de su hogar y hacer posible la construcción e instalación del prototipo. Y a toda mi familia Araya, por estar siempre presentes y aportar alegría y buen humor incluso en los momentos más desafiantes.

A mi profesor guía, Francisco Quitral Zapata, por su orientación, dedicación y compromiso durante todo este proceso. Gracias por motivarme a mejorar constantemente, por desafiarme a profundizar en mis ideas y por generar un espacio de aprendizaje cercano y enriquecedor. Asimismo, agradezco a la profesora Verónica Arcos por sus valiosas observaciones, su apoyo y su constante disposición para contribuir a este trabajo.

Al profesor Pablo Sills, por compartir generosamente sus conocimientos sobre arquitectura, por sus consejos y apoyo durante estos años. A la secretaria Carmencita, por su cariño, disposición y por acompañar con una sonrisa cada etapa de este recorrido.

A mis queridas amigas Kony, Valentina y Paulina, gracias por estar siempre presentes, por su cariño, comprensión y compañía. Valoro profundamente cada conversación y cada instante compartido. Su amistad hizo que este proceso fuera mucho más liviano y significativo.



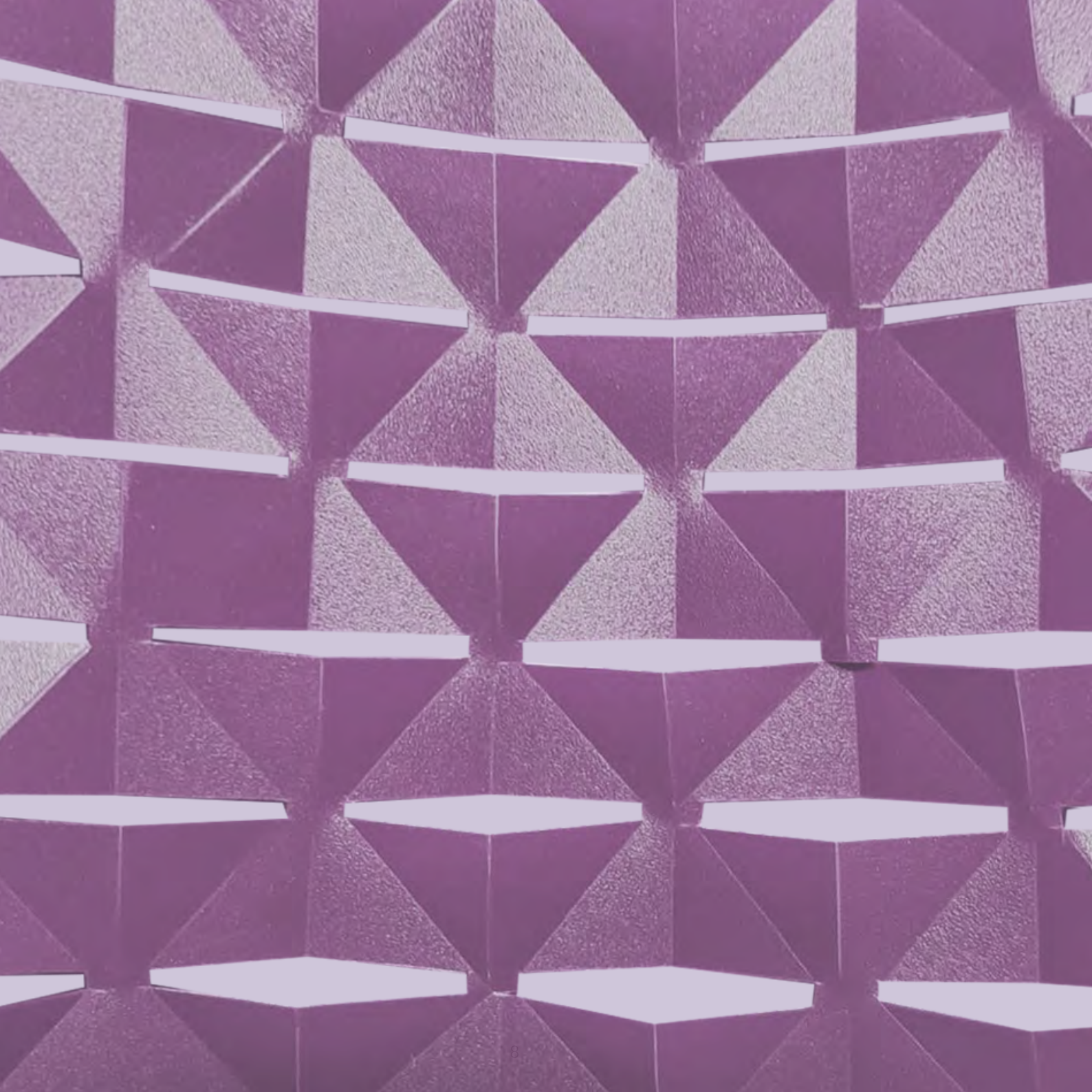
Y finalmente, pero no por ello menos importante, a mis amados compañeros de cuatro patas, Gary y Kuky. Gracias por su compañía incondicional durante todo este proceso, por acompañarme en largas jornadas de trabajo, por permanecer a mi lado durante las desveladas y por regalarme momentos de alegría, calma y cariño cuando más los necesitaba.

DEDICATORIA

A mis padres, Chery y Bernabé, quienes me enseñaron que los sueños se construyen con esfuerzo, perseverancia y amor. Todo lo que soy y todo lo que he logrado tiene sus raíces en ustedes.

A mi pareja Jesús, por caminar a mi lado en este proceso, por su amor incondicional y por ser mi apoyo constante en cada paso.

Y, por último, a todas las mujeres en la ciencia y la investigación, que me inspiran cada día a formar parte de ese camino y a seguir creciendo dentro de él.



“Las llamo a ser mujeres plenas, a sufrir por el dolor ajeno, a ser solidarias y sensibles, a enamorarse todos los días, a ser ágiles y livianas como las mariposas y fieras ante las injusticias”

- Gladys Marín

RESUMEN

El presente proyecto de título, desarrollado bajo una modalidad de investigación aplicada (I+D), propone el diseño, fabricación y evaluación de un prototipo de panel constructivo para envolvente arquitectónica capaz de captar agua atmosférica, basado en la incorporación de geometrías kirigami. La investigación se sitúa en el contexto de la escasez hídrica estructural que afecta a zonas rurales de Chile, particularmente en el norte y centro del país, donde la disponibilidad de agua es limitada y las soluciones tradicionales de abastecimiento resultan insuficientes o inestables. En este escenario, la niebla costera se reconoce como un recurso hídrico no convencional con potencial de aprovechamiento.

El proyecto se fundamenta en el estudio de tecnologías de captación por coalescencia y en la exploración de geometrías kirigami como sistema aerodinámico de captación, capaces de mejorar la intercepción, coalescencia y drenaje de microgotas. A partir de la definición de variables geométricas se desarrolla un sistema modular integrado en un panel constructivo. La metodología combina análisis teórico, prototipado físico y validación experimental en condiciones controladas, permitiendo evaluar el desempeño del sistema en términos de eficiencia de captación y conducción de agua. Los resultados evidencian que la incorporación de geometrías kirigami permite mejorar el rendimiento respecto a superficies tradicionales, destacando el rol de la forma en la manipulación del flujo de aire y el drenaje.

Finalmente, el proyecto plantea el potencial de este tipo de dispositivos como sistemas constructivos integrables en arquitectura, contribuyendo al desarrollo de soluciones descentralizadas para la gestión hídrica en contextos de escasez.

This thesis project, developed under an applied research and development (R&D) approach, proposes the design, fabrication, and evaluation of a prototype architectural envelope panel capable of harvesting atmospheric water through the incorporation of kirigami-based geometries. The research addresses the context of structural water scarcity affecting rural areas in northern and central Chile, where water availability is limited and conventional water supply systems are often insufficient or unreliable. In this context, coastal fog is recognized as a non-conventional water resource with significant potential for sustainable use.

The project is based on the study of fog collection technologies using the principle of coalescence and the exploration of kirigami geometries as an aerodynamic water-harvesting system capable of enhancing the interception, coalescence, and drainage of microdroplets. Based on the definition of key geometric parameters, a modular system integrated into a building envelope panel was developed. The methodology combines theoretical research, physical prototyping, and experimental validation under controlled laboratory conditions to evaluate the system's performance in terms of water collection and drainage efficiency. The results demonstrate that incorporating kirigami geometries improves water collection performance compared with conventional collection surfaces, highlighting the influence of geometry on airflow manipulation and water drainage.

Finally, this research demonstrates the potential of this type of system as an architectural building component, contributing to the development of decentralized water management strategies for rural housing in regions affected by water scarcity.

GLOSARIO

APR (Agua potable rural): Sistema comunitario de abastecimiento de agua destinado a localidades rurales sin conexión a redes sanitarias urbanas.

Área efectiva de captación: Superficie expuesta que participa directamente en la interceptación de microgotas de agua

Coalescencia: Proceso mediante el cual pequeñas gotas de agua se unen formando gotas de mayor tamaño.

Decreto de escasez hídrica: Instrumento legal emitido por la Dirección General de Agua (DGA) para enfrentar situaciones excepcionales de déficit hídrico

Estrés hídrico: Situación en la que la demanda de agua supera la disponibilidad del recurso.

Eficiencia de captación: Indicador que expresa la cantidad de agua recolectada por unidad de superficie y tiempo de exposición, utilizado para comparar el desempeño de diferentes sistemas de captación.

Geometría kirigami: Configuración espacial obtenida mediante cortes y pliegues en una lámina plana, capaz de generar estructuras tridimensionales.

Sistema Pasivo: Sistema que opera sin requerir energía eléctrica.

TRL 4: Nivel de madurez tecnológica correspondiente a la validación funcional de componentes en condiciones de laboratorio

Vórtice: Movimiento circular del aire que puede modificar la trayectoria de las microgotas y favorecer su captura

Autonomía hídrica: Capacidad de una vivienda o sistema para generar y gestionar parte de sus propios recursos hídricos sin depender completamente de fuentes externas.

Fog Harvesting : Término utilizado para describir la captación de agua proveniente de la niebla mediante sistemas pasivos.

Captación asistida por aerodinámica : Estrategia de recolección de agua que utiliza modificaciones del flujo de aire para aumentar la intercepción de microgotas.

SFC (Standard Fog Collector): Colector estándar de niebla utilizado internacionalmente como método de referencia para medir y comparar el potencial de captación de agua atmosférica en un sitio determinado.

CONTENIDO

01

INTRODUCCIÓN

1.1 PROBLEMA A ABORDAR.....	16
1.2 DISTRIBUCIÓN TERRITORIAL DE LA ESCASEZ HÍDRICA	20
1.3 JUSTIFICACIÓN Y OPORTUNIDAD	23
1.4 POTENCIAL HÍDRICO DE LA CAPTACIÓN ATMOSFÉRICA	26
1.5 DEMANDA HÍDRICA DE LA VIVIENDA RURAL.....	29
1.6 OBJETIVOS.....	34
1.7 HIPÓTESIS DEL PROYECTO	37
1.8 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	39

02

CAMPO DE APLICACIÓN Y DIAGNÓSTICO TERRITORIAL

2.1 CAMPO DE APLICACIÓN	42
2.2 CONDICIONES PARA LA CAPTACIÓN.....	44
2.3 CARACTERIZACIÓN TERRITORIAL DEL RECURSO	48

03

METODOLOGÍA

3.1 PLAN DE TRABAJO.....	52
3.2 CARTA GANTT	54
3.3 ETAPAS OPERATIVAS.....	56
3.4 SOFTWARES Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS	57

04

ESTADO DEL ARTE

4.1 TIPOLOGÍAS DE CAPTACIÓN ATMOSFÉRICA	60
4.2 CAPTACIÓN ATMOSFÉRICA POR COALESCENCIA	61
4.3 TECNOLOGÍAS ATRAPANIEBLAS.....	62
4.4 COMPARACIÓN DE EFICIENCIA.....	68
4.5 TIPOLOGÍAS KIRIGAMI PARA CAPTACIÓN ATMOSFÉRICA	70

05

DISEÑO DEL PATRÓN KIRIGAMI

5.1 FUNCIONAMIENTO AERODINÁMICO DEL KIRIGAMI VOLUMÉTRICO	94
5.2 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DEL PATRÓN KIRIGAMI	96
5.3 CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DEL PATRÓN KIRIGAMI	98
5.4 FACTIBILIDAD CONSTRUCTIVA DEL PATRÓN GEOMÉTRICO	99
5.5. CONCLUSIONES DE LA FACTIBILIDAD CONSTRUCTIVA.....	103

DESARROLLO DE PROTOTIPOS

06

6.1 INTEGRACIÓN DEL PATRÓN KIRIGAMI EN EL PROTOTIPO.....	106
6.2 CRITERIOS DE DISEÑO	107
6.3 DESARROLLO DEL PROTOTIPO 1	108
6.4 DESARROLLO DEL PROTOTIPO 2	130

EVALUACIÓN Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

07

7.1 ESTRATEGIA DE VALIDACIÓN TRL 4.....	148
7.2 ENSAYO PRELIMINAR EXPLORATORIO.....	149
7.3 PROTOCOLO EXPERIMENTAL.....	152
7.4 ENSAYO PILOTO.....	158
7.5 ENSAYO COMPARATIVO CONTROLADO.....	160

CONCLUSIONES Y PROYECCIONES

08

8.1 VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN.....	196
8.2 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LOS PROTOTIPOS.....	197
8.3 FACTIBILIDAD CONSTRUCTIVA.....	200
8.4 PROYECCIONES.....	202

09

BIBLIOGRAFÍA	
--------------	--

10

ANEXOS	
--------	--

01

***CAPÍTULO
UNO***

INTRODUCCIÓN

1.1 PROBLEMA A ABORDAR

1.2 DISTRIBUCIÓN TERRITORIAL DE LA ESCASEZ HÍDRICA

1.3 JUSTIFICACIÓN Y OPORTUNIDAD

1.4 POTENCIAL HÍDRICO DE LA CAPTACIÓN ATMOSFÉRICA

1.5 DEMANDA HÍDRICA DE LA VIVIENDA RURAL

1.6 OBJETIVOS

1.7 HIPÓTESIS DEL PROYECTO

1.8 ALCANCES Y LIMITACIONES

01 INTRODUCCIÓN

1.1 PROBLEMA A ABORDAR

ESCASEZ HÍDRICA RURAL Y VULNERABILIDAD HABITACIONAL

La escasez hídrica en zonas rurales de Chile constituye un problema estructural que afecta de manera directa la habitabilidad y las condiciones básicas de desarrollo de sus comunidades. Este fenómeno se manifiesta principalmente en la intermitencia o ausencia total de redes de agua potable capaces de abastecer las necesidades esenciales de los hogares. Según los informes de la Dirección General de Aguas (DGA), la reducción sostenida de precipitaciones y la disminución de caudales superficiales y subterráneos durante las últimas décadas ha llevado a gran parte del país a una condición de estrés hídrico persistente, especialmente en sectores alejados de centros urbanos.

Esta condición no solo reduce la disponibilidad del recurso, sino que también modifica la forma en que las comunidades rurales deben abastecerse, aumentando su dependencia de sistemas alternativos de suministro.

Como resultado, muchas comunidades dependen de mecanismos de emergencia, principalmente camiones aljibe o sistemas APR sometidos a tensión operativa; estos métodos implican costos elevados, baja estabilidad del suministro y una reducida capacidad de gestión local, dificultando la planificación comunitaria y acentuando la vulnerabilidad habitacional. Las limitaciones de estos sistemas trascienden el ámbito operativo y repercuten directamente en la calidad de vida de las personas.

Este escenario impacta al consumo humano, la higiene, la seguridad alimentaria, la salud y la capacidad de sostener actividades productivas básicas.

Tal como advierte el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), la prolongación de sequías y la variabilidad climática proyectan un futuro en el que la disponibilidad de agua será aún más limitada, especialmente en regiones donde la vivienda rural ya se encuentra en desventaja. En consecuencia, la gestión hídrica en estos territorios ha pasado a operar bajo condiciones de emergencia permanente, configurando un ciclo de dependencia y precarización.



Imagen 1. Fotografía intervenida en base a imagen de reportaje "Escasez hídrica: la vida de las comunidades rurales sin agua", Tiempo Real – Periodismo UdeC (2021).



Fig. 2 Imagen intervenida en base a: CIPER Chile (2017). "El negocio de la sequía: el puñado de empresas de camiones aljibe que se reparte \$92 mil millones"

CONDICIONES DE ABASTECIMIENTO RURAL

El abastecimiento de agua potable en los territorios rurales continúa presentando importantes brechas respecto de las zonas urbanas. La baja cobertura de infraestructura, la dispersión territorial y la dependencia de sistemas de abastecimiento alternativos generan condiciones de vulnerabilidad que afectan la continuidad y confiabilidad del suministro. En este contexto, el acceso al agua deja de depender únicamente de la disponibilidad del recurso, estando condicionado además por factores operativos, económicos y territoriales.

La persistencia de estas brechas se refleja en el uso continuo de mecanismos de abastecimiento de emergencia. De acuerdo con el Rural Brief del Banco Mundial (2021), el suministro mediante camiones aljibe continúa siendo ampliamente utilizado en distintas regiones del país, especialmente en territorios afectados por déficit hídrico prolongado, donde esta modalidad ha pasado de constituir una respuesta temporal a formar parte del funcionamiento habitual de numerosos sistemas de abastecimiento.

Proporción de viviendas rurales que reciben agua por camión aljibe según regiones, 2017

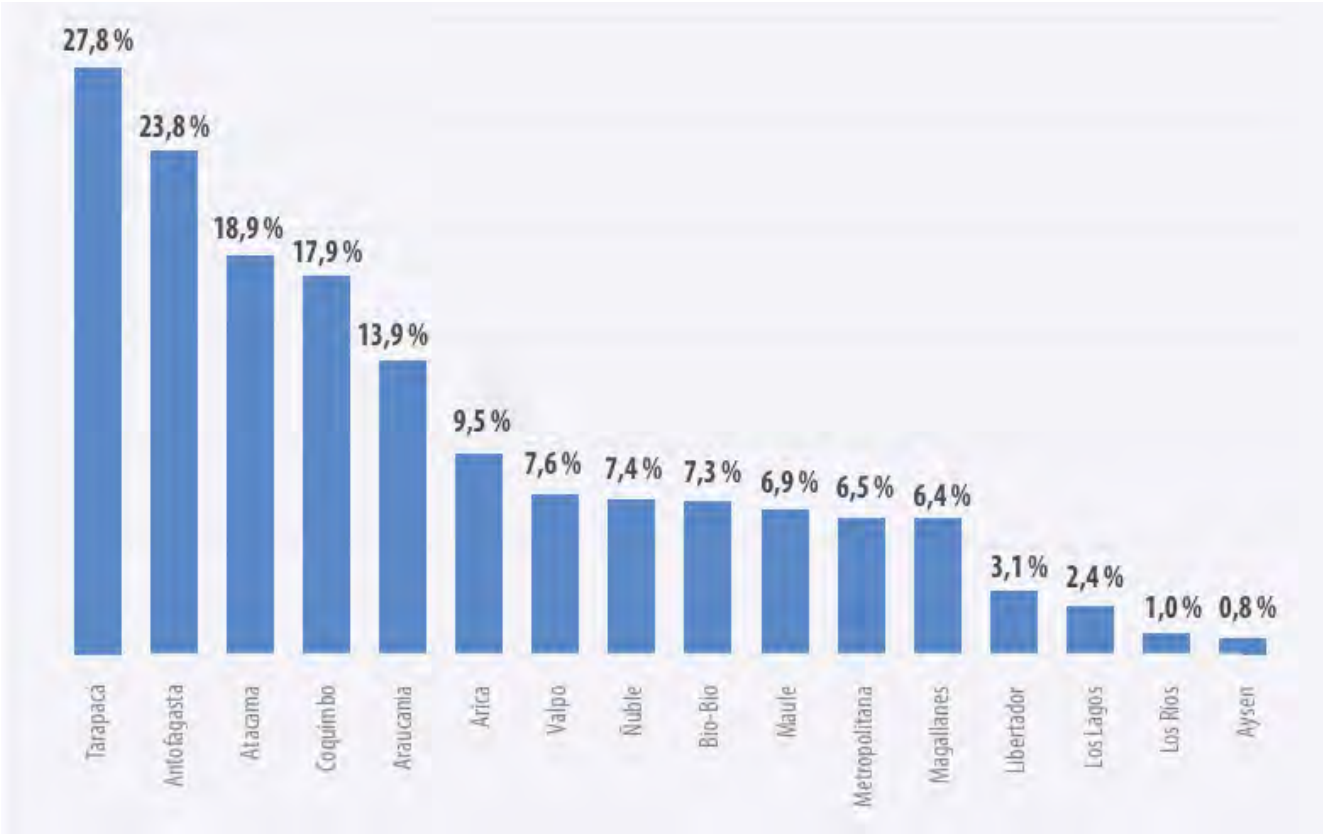


Gráfico 1
Fuente: Rural Brief, 2021 - en base a información de CAsEN 2017

El Gráfico 1 evidencia que la dependencia del abastecimiento mediante camiones aljibe no se distribuye de manera homogénea en el territorio nacional. Las mayores proporciones se concentran en las regiones del norte, destacando Tarapacá (27,8 %), Antofagasta (23,8 %), Atacama (18,9 %) y Coquimbo (17,9 %), coincidiendo con zonas que presentan una mayor recurrencia de déficit hídrico. En contraste, regiones del sur como Aysén y Los Ríos registran porcentajes considerablemente menores. Esta distribución confirma que el abastecimiento de emergencia ha dejado de ser un fenómeno puntual para transformarse en un componente habitual del suministro de agua en diversos territorios rurales.

Los antecedentes observados en la distribución territorial del abastecimiento mediante camiones aljibe coinciden con diversos estudios recientes sobre la situación del abastecimiento rural en Chile. Según la Universidad de Chile (2020), el 47,2 % de las viviendas rurales no cuenta con conexión formal a la red pública de agua potable, mientras que los Sistemas de Servicios Sanitarios Rurales (SSR), presentan limitaciones operativas y administrativas que afectan la continuidad, calidad y cantidad del suministro en numerosas localidades.

A esta realidad se suma que, de acuerdo con el Consejo de Políticas de Infraestructura (CPI, 2020), aproximadamente 1,7 millones de personas dependen de estos sistemas para acceder al agua potable, evidenciando el rol fundamental que cumplen en el abastecimiento del país. Sin embargo, como señala el Banco Mundial (2021), en numerosas localidades rurales el suministro mediante camiones aljibe continúa utilizándose como un mecanismo permanente de abastecimiento, reflejando que las fuentes convencionales aún resultan insuficientes para responder de manera estable a las necesidades hídricas de estos territorios.

En conjunto, estos antecedentes evidencian que el principal desafío del abastecimiento rural no radica únicamente en la disponibilidad física del recurso hídrico, sino también en la capacidad de garantizar un suministro continuo, seguro y territorialmente adaptado. La coexistencia de limitaciones en la infraestructura, la dependencia de los Sistemas de Servicios Sanitarios Rurales y el uso recurrente de camiones aljibe como mecanismo de emergencia reflejan una condición de vulnerabilidad persistente. Este escenario hace necesario explorar estrategias complementarias que fortalezcan la autonomía hídrica de las viviendas rurales y reduzcan la dependencia de sistemas externos.

1.2 DISTRIBUCIÓN TERRITORIAL DE LA ESCASEZ HÍDRICA

La problemática descrita anteriormente no se distribuye de manera homogénea en el territorio nacional. La persistencia del déficit hídrico puede observarse mediante los decretos de escasez emitidos por la Dirección General de Aguas (DGA).

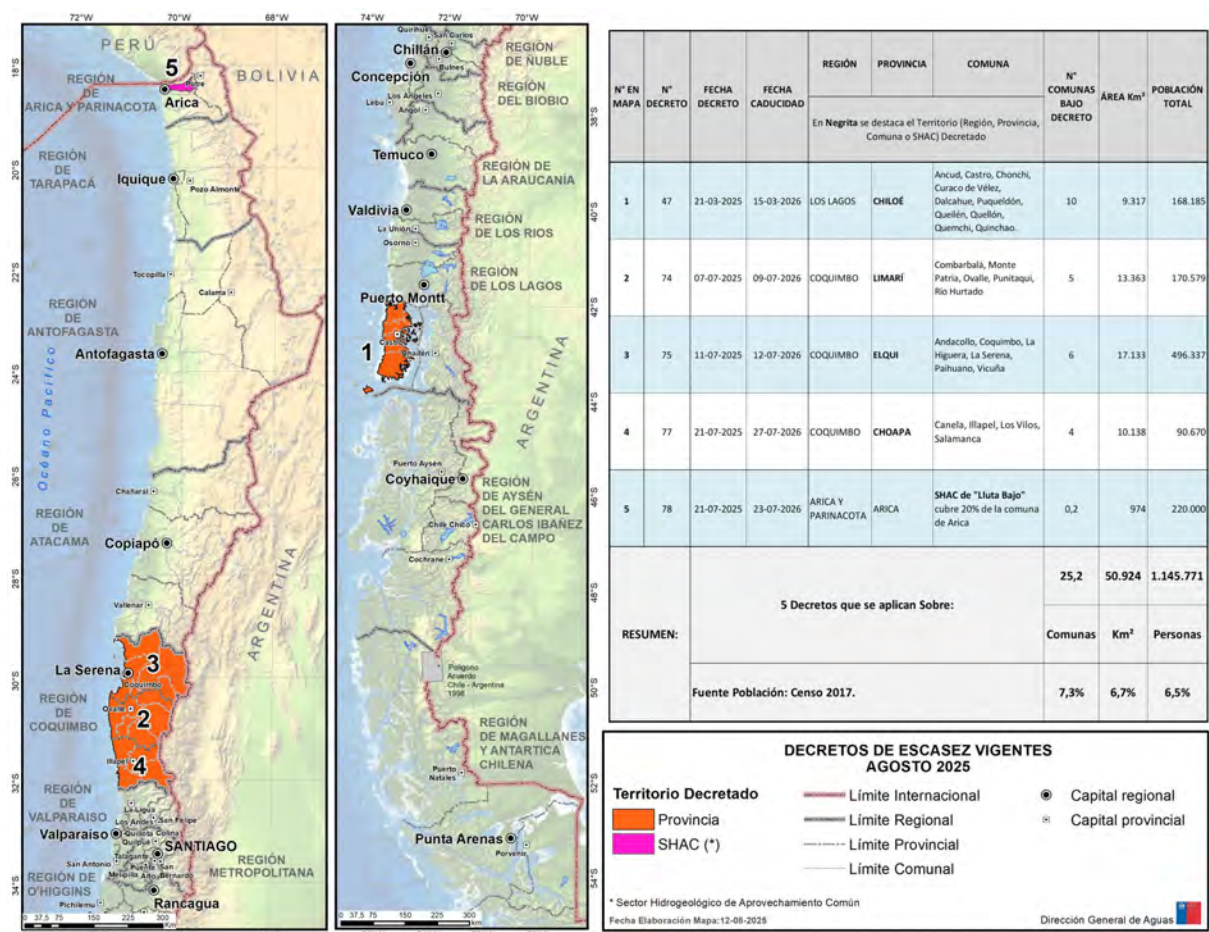


Fig. 3 Imagen intervenida en base a mapa de Comunas y territorios bajo decreto de escasez hídrica vigentes al 12 de agosto de 2025. Fuente: Dirección General de Aguas (DGA).

El mapa de decretos vigentes elaborado por la Dirección General de Aguas (DGA, 2025) evidencia que la escasez hídrica continúa afectando extensos territorios del país. Entre las áreas decretadas destacan las provincias de Elqui, Limarí y Choapa en la Región de Coquimbo, además de sectores en Arica y la provincia de Chiloé, reflejando la persistencia del déficit hídrico en comunidades rurales distribuidas tanto en el norte como en el sur de Chile.

PERSISTENCIA DEL DÉFICIT HÍDRICO EN CHILE

Además de identificar los territorios afectados, resulta pertinente analizar la evolución temporal de la escasez hídrica para comprender su permanencia durante los últimos años y reconocer aquellas zonas donde esta condición se mantiene de forma recurrente.

Decretos de Escasez Hídrica por Año (2020-2025)

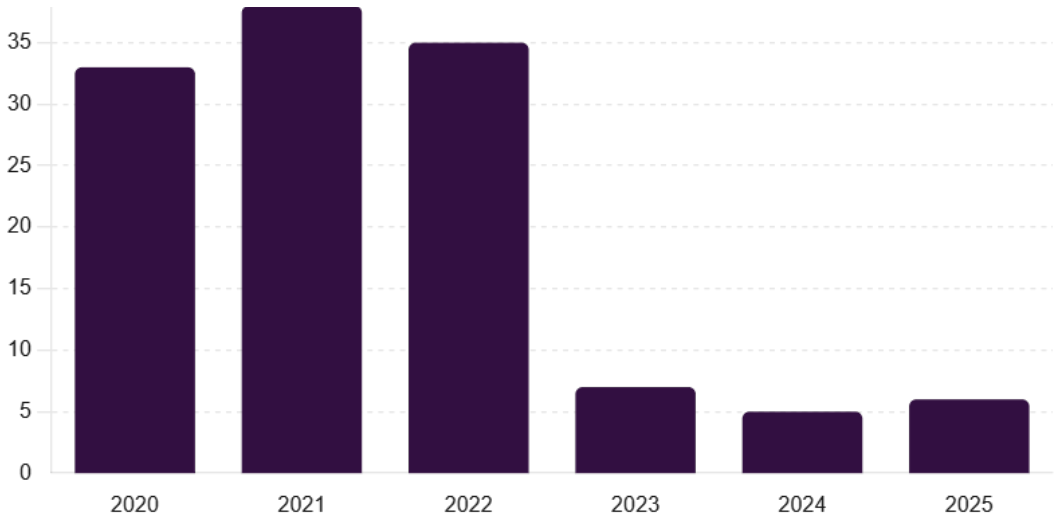


Gráfico 2
Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA (2020-2025).

Decretos de Escasez Hídrica por Región (2020-2025)

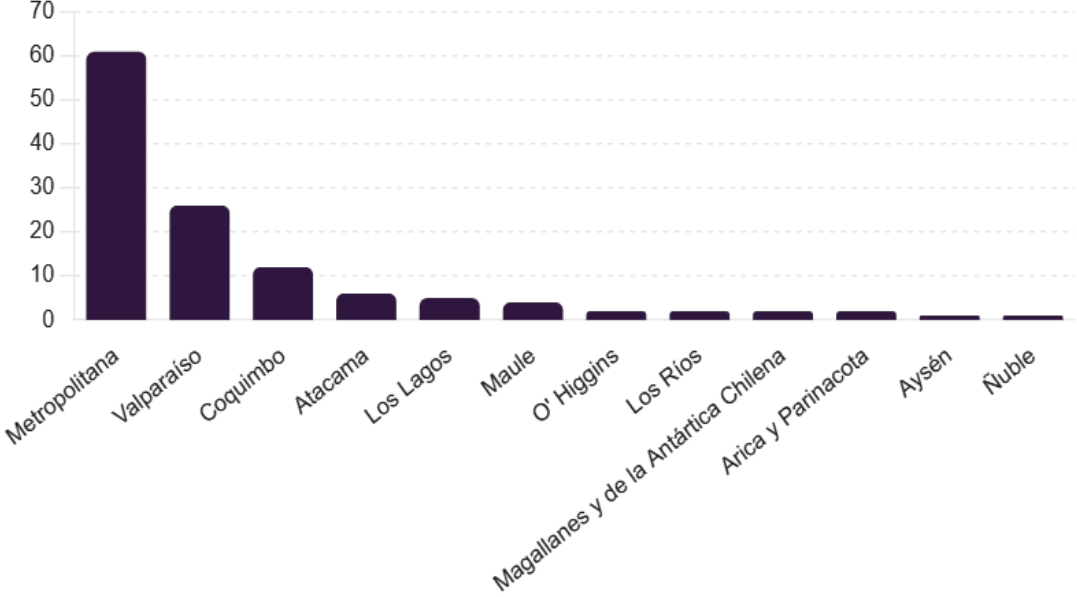


Gráfico 3
Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA (2020-2025).

La demanda de agua en las zonas rurales del norte y centro de Chile se desarrolla en un contexto de déficit hídrico persistente. Entre 2020 y 2025, la Dirección General de Aguas (DGA) emitió numerosos decretos de escasez hídrica, evidenciando una condición prolongada de estrés sobre la disponibilidad de recursos hídricos en gran parte del territorio nacional.

Tal como se observa en el Gráfico 2, la mayor concentración de decretos se registra entre los años 2020 y 2022, período que coincide con una de las etapas más críticas de la megasequía que ha afectado al país durante la última década. Si bien en los años posteriores se observa una disminución, la recurrencia de estos decretos demuestra que la problemática continúa presente en diversos territorios.

Esta tendencia también puede analizarse desde una perspectiva territorial. A escala regional, el Gráfico 3 muestra que las regiones Metropolitana, Valparaíso y Coquimbo concentran la mayor cantidad de decretos emitidos durante el período analizado. Esta distribución permite identificar el norte chico y la zona central como áreas especialmente expuestas a escenarios de restricción hídrica, constituyendo territorios prioritarios para la exploración de estrategias complementarias de abastecimiento.



1.3 JUSTIFICACIÓN Y OPORTUNIDAD



Fig. 4. Imagen intervenida en base a: FAU U. de Chile, "Estudio revela desigualdad hídrica en Petorca" (2021).

Considerando la persistencia del déficit hídrico identificada en el apartado anterior, la presente investigación define como campo de aplicación la franja costera del norte de Chile. Esta elección responde a la coexistencia de dos condiciones territoriales determinantes: una elevada escasez hídrica que afecta el abastecimiento de las comunidades rurales y la presencia recurrente de niebla costera con potencial para la captación de agua atmosférica.

En este contexto, la búsqueda de fuentes complementarias de abastecimiento ha orientado la atención hacia recursos hídricos no convencionales presentes en el territorio. Entre ellos, destaca la niebla costera o camanchaca, un fenómeno atmosférico recurrente asociado a la interacción entre las condiciones oceánicas, climáticas y topográficas propias del norte de Chile. Su disponibilidad ha motivado el desarrollo de distintas experiencias de captación, posicionándola como un recurso con potencial para complementar los sistemas convencionales de suministro de agua en sectores rurales.

NIEBLA COMO RECURSO

La niebla costera, conocida localmente como camanchaca, se define como una masa de aire compuesta por microgotas de agua (entre 1 y 40 micrones de diámetro) que, debido a su reducido peso, permanecen en suspensión y son transportadas por el viento, tanto sobre superficies oceánicas como continentales. Cuando estas partículas se encuentran en niveles superiores de la atmósfera se denominan nubes; en cambio, en contacto con la superficie terrestre, se manifiestan como niebla.

La formación y dinámica de este fenómeno responden a la interacción de condiciones oceánicas, atmosféricas y topográficas específicas. Tal como se observa en la Figura 5 el aire húmedo proveniente del océano Pacífico es impulsado por los vientos predominantes del sur-suroeste hacia el continente, donde la presencia del relieve costero favorece su ascenso y posterior condensación en forma de nubes estratocúmulos. Este proceso se ve reforzado por la existencia de una capa de inversión térmica, la cual limita el desarrollo vertical de las masas de aire y contribuye a la persistencia de la niebla en estratos bajos de la atmósfera.

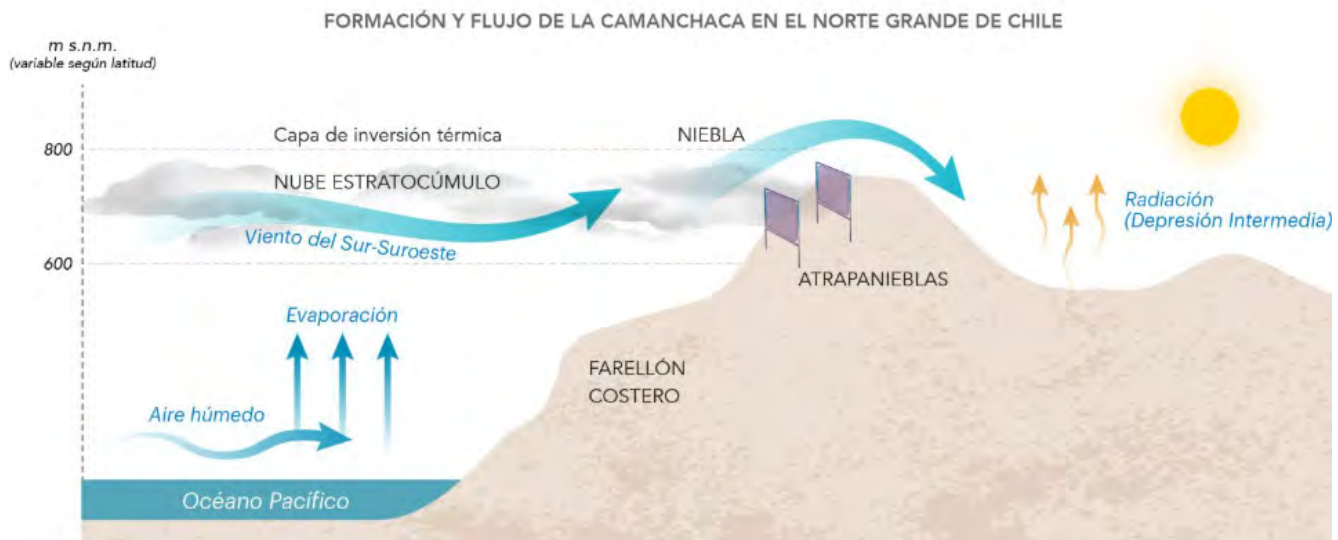


Fig. 5 Fuente: Centro UC Desierto de Atacama, Formación y flujo de la camanchaca en el Norte Grande de Chile, visor "Mapa Agua de Niebla", plataforma ArcGIS (s.f.)

La persistencia de la camanchaca en la franja costera del norte de Chile ha permitido desarrollar sistemas capaces de recuperar parte del agua contenida en estas masas de aire. Entre ellos, los captadores de malla Raschel constituyen actualmente la tecnología más difundida para el aprovechamiento del recurso atmosférico.

COMPONENTES DE ATRAPANIEBLAS DE MALLA RASCHEL



Fig. 6. Componentes de un sistema atrapaniebla. Fuente: Fundación Un Alto en el Desierto y Ministerio de Salud (2020), ATRAPANIEBLA.(s.f.)

Los atrapanieblas funcionan mediante la interceptación de las microgotas suspendidas en la niebla. Cuando el flujo de aire atraviesa la malla, las gotas se adhieren a sus fibras, aumentan de tamaño por coalescencia y, debido a la gravedad, escurren hacia una canaleta que conduce el agua hasta un sistema de almacenamiento. Este principio ha sido ampliamente utilizado para abastecimiento rural, investigación y monitoreo de oasis de niebla en la costa del norte de Chile.

1.4 POTENCIAL HÍDRICO DE LA CAPTACIÓN DE NIEBLA

Para comparar objetivamente el rendimiento de distintos sitios de captación no resulta suficiente medir el volumen total obtenido por un atrapanieblas, ya que este depende de las dimensiones y configuración de cada sistema. Por esta razón, la literatura utiliza como referencia el Standard Fog Collector (SFC), un captador estandarizado de 1 m², compuesto por una doble malla Raschel de 35 % de sombra instalada a dos metros sobre el nivel del suelo. Este instrumento permite expresar el rendimiento en litros captados por metro cuadrado al día (L/m²·día), facilitando la comparación entre diferentes localidades y estudios.

Las mediciones realizadas mediante Standard Fog Collector evidencian que el potencial de captación varía significativamente según las condiciones atmosféricas y geográficas de cada territorio. Larraín et al. (2012) reportan rendimientos comprendidos entre 1,4 y 8,3 L/m²·día, con un promedio cercano a 5 L/m²·día. Asimismo, el estudio señala que, mediante mejoras en la eficiencia del sistema, un atrapanieblas optimizado podría alcanzar aproximadamente 12 L/m²·día, demostrando que el diseño del captador influye directamente en su desempeño.

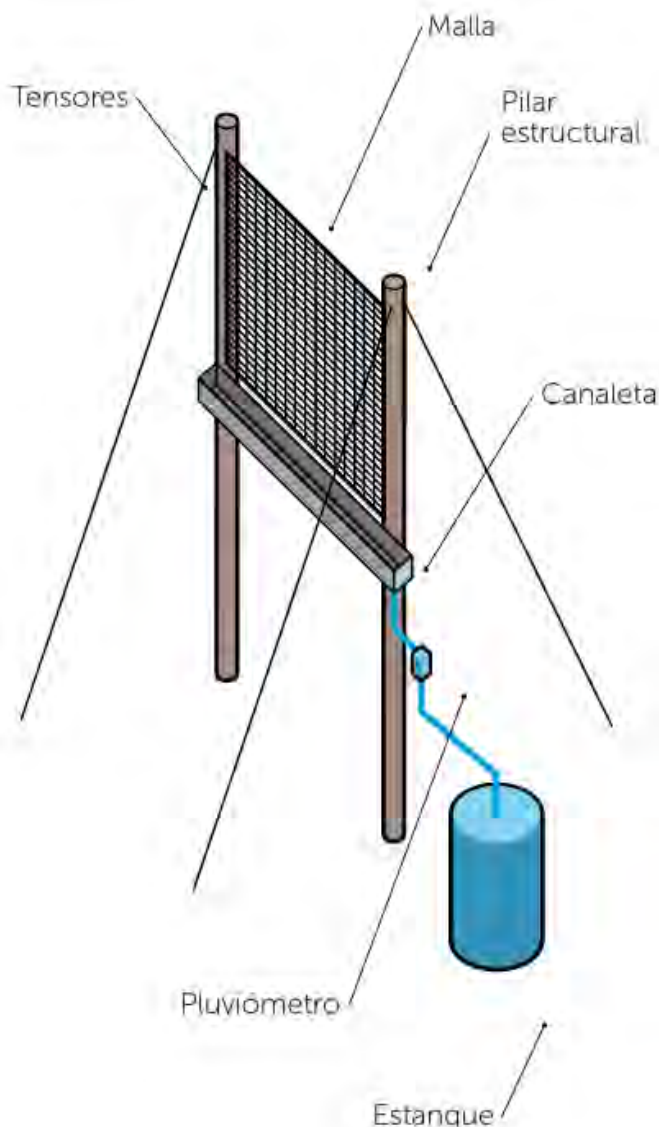


Fig. 7. Esquema de un neblinómetro para la evaluación del potencial de captación de agua de niebla. Fuente: Fundación Un Alto en el Desierto y Ministerio de Salud (2020), ATRAPANIEBLA.

VARIABILIDAD TERRITORIAL DEL POTENCIAL

Lugar	Cota msnm	Período	Rendimiento l/m2/mes	Tipos de estructura
II Región				
Cerro Moreno	900	1968 - 1971	158,3	h Nylon
	900	1967 - 1989	363,3	h Mosquit
	900	1971	403,3	a
	900	1971	401,6	c Mosquit
Promedio (1)		1968 - 1971	158,3	c Nylon
Los Nidos	900		82,1	h Nylon
III Región				
Pan de Azucar	530	1985	69,7	c Raschel
Travesía	800	1985	51,3	c Raschel
Carrizal Bajo	700	E-D (1988)	104,7	d Raschel
IV Región	948	Jun 1982 - Mayo 1983	90,9	b Nylon
El Tofo	780	1983	57,8	cap. 90 m2
	780	1985	152,1	f Raschel
	780	Nov 1987 - Sep 1990	91,3	f Raschel
	780	Enero 1984 - Enero 1985	115,6	c Raschel
	780	1986 (E.D.)	149,0	f Raschel
	550	Feb 1984 - Dic 1984	113,7	c Raschel
Fray Jorge	550	Jun 1982 - Abril 1983	184	c Raschel
Cavilolén	850	1983	89,9	b Nylon

Tabla 1. Rendimientos registrados de captación de agua de niebla en Chile según ubicación, altitud, período y tipo de estructura. Fuente: Fundación Un Alto en el Desierto y Ministerio de Salud (2020), ATRAPANIEBLA, con datos de FAO (2000).

Los valores reportados corresponden a promedios generales y presentan diferencias importantes entre localidades. La recopilación realizada por la FAO muestra que sectores como Cerro Moreno registran algunos de los mayores rendimientos históricos de captación, mientras que otras localidades presentan valores considerablemente menores. Estas diferencias evidencian que el potencial hídrico depende directamente de factores climáticos, topográficos y de la frecuencia de ocurrencia de la niebla.

ESCALAMIENTO DEL POTENCIAL DE CAPTACIÓN

Con el fin de dimensionar el aporte potencial de estos sistemas, diversos estudios han extrapolado los rendimientos obtenidos mediante Standard Fog Collector hacia superficies de captación mayores. Los resultados muestran que el volumen de agua recuperado aumenta proporcionalmente con el área de captación, permitiendo estimar la producción diaria de instalaciones de mayor escala bajo distintas condiciones territoriales.

Aplicación de la información de colecta de agua en SFC					
Colección de agua en litros por día, promedio anual					
Lugar	SFC 1 m ²	Colector 40 m ²	20 colectores 800 m ²	50 colectores 2.000 m ²	100 Colectores 40.000 m ²
Alto Patache	7.81	312	6.250	15.620	31.240
Cerro Guatalaya	0.93	37	740	1.860	3.720
Cerro Moreno	8.26	330	6.610	16.520	33.040
Paposo	3.36	134	2.690	6.720	13.440
Falda Verde	1.43	57	1.140	2.860	5.720
El Tofo	2.98	119	2.380	5.960	11.920

Tabla 2. Aplicación de la información de colecta de agua en Sistemas de Captación de Niebla (SFC). Fuente: Larraín et al. (2002), modificado por J. D. Rivera, en Agua de niebla: Nuevas tecnologías para el desarrollo sustentable en zonas áridas y semiáridas.

Los antecedentes muestran que localidades como Alto Patache y Cerro Moreno presentan algunos de los mayores rendimientos registrados en Chile, superando los 7 L/m²·día, mientras que sectores como Paposo o Falda Verde registran valores considerablemente menores. Estas diferencias evidencian que el potencial de captación depende directamente de las condiciones atmosféricas y geográficas de cada sitio.

No obstante, la capacidad de producir agua constituye solo una parte del problema. Para determinar el aporte efectivo que estos sistemas podrían realizar al abastecimiento habitacional resulta necesario contrastar su producción potencial con la demanda hídrica de una vivienda rural.

1.5 DEMANDA HÍDRICA DE LA VIVIENDA RURAL

El acceso al agua potable constituye un requisito fundamental para garantizar condiciones adecuadas de habitabilidad en la vivienda rural. La disponibilidad de agua determina el desarrollo de actividades esenciales como el consumo humano, la preparación de alimentos, la higiene personal y la limpieza doméstica. En este contexto, la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que una disponibilidad inferior a 50 L por habitante al día compromete la satisfacción de las necesidades básicas, mientras que un nivel de servicio adecuado se sitúa entre 50 y 100 L por habitante al día, dependiendo de las condiciones del sistema de abastecimiento y del contexto territorial (Howard & Bartram, 2003).

En Chile, los proyectos de Servicios Sanitarios Rurales (SSR) consideran dotaciones de diseño superiores, generalmente entre 150 y 200 L por habitante al día. Sin embargo, estas corresponden a criterios de planificación para dimensionar la infraestructura y no representan necesariamente el consumo efectivo de las viviendas rurales.

En numerosas localidades rurales del norte de Chile, especialmente aquellas con abastecimiento limitado o dependientes de camiones aljibe, la disponibilidad real de agua puede reducirse a valores cercanos a 30–50 L por persona al día (CEPAL, 2020; DGA, 2014–2022). Esta diferencia entre la demanda recomendada y el volumen efectivamente disponible refleja una brecha hídrica que afecta directamente la calidad de vida de la población y limita el desarrollo de actividades domésticas básicas.

De acuerdo con antecedentes de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), una vivienda abastecida mediante un Sistema de Servicios Sanitarios Rurales registra consumos promedio entre 13 y 15 m³ mensuales, equivalentes aproximadamente a 117 L por habitante al día, pudiendo alcanzar alrededor de 145 L/hab·día durante el período estival debido al incremento de las necesidades domésticas y del riego domiciliario.

Estos antecedentes representan valores promedio para viviendas abastecidas mediante Sistemas de Servicios Sanitarios Rurales. Sin embargo, el consumo efectivo no es homogéneo en todo el territorio nacional, ya que varía según las condiciones climáticas, la disponibilidad del recurso, las actividades domésticas y las características propias de cada región.

Esta variabilidad se observa en el siguiente gráfico, donde se comparan los consumos per cápita registrados en distintas regiones del país.

Consumo per cápita de agua (litros por día) en áreas rurales según regiones, 2012

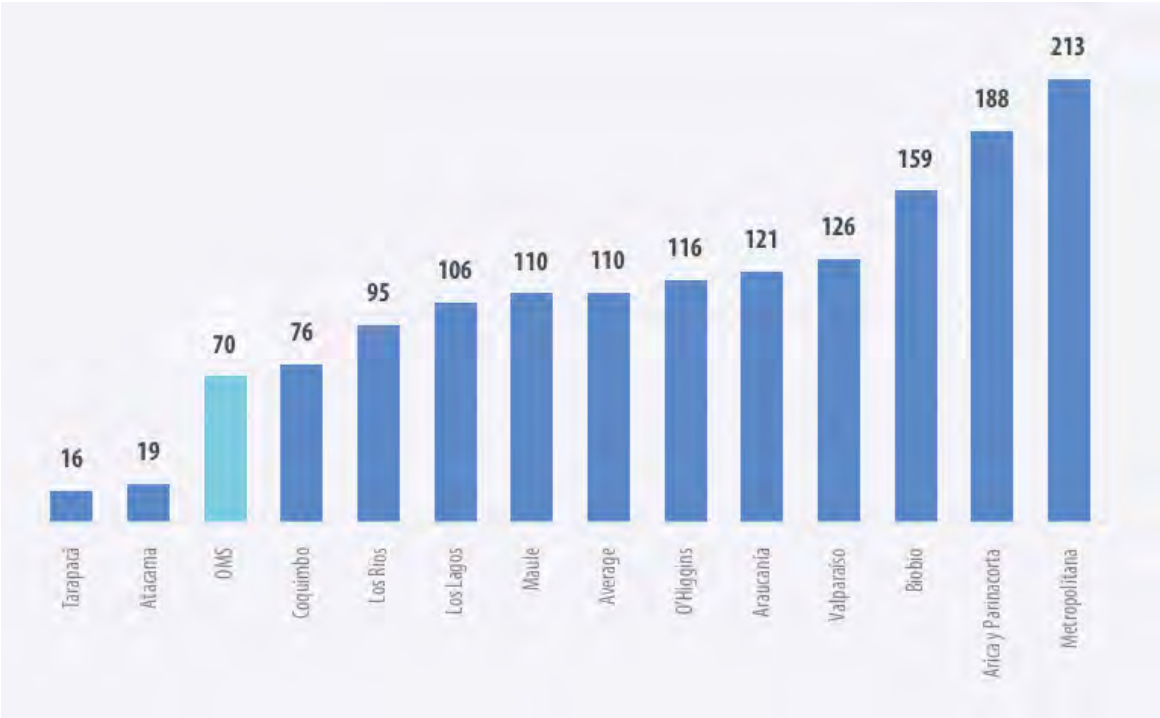


Gráfico 4. Consumo per cápita de agua (litros por día) en áreas rurales según regiones, 2012. Fuente: Rural Brief Chile, a partir de Villarroel Novoa (2012), Asociaciones Comunitarias de APR en Chile: Diagnósticos y Desafíos.

Estas cifras corresponden a promedios regionales y evidencian diferencias significativas en el consumo residencial. De acuerdo con el Rural Brief del Banco Mundial (2021), algunas regiones superaban ampliamente las recomendaciones internacionales de consumo per cápita, mientras que otras registraban valores considerablemente menores, reflejando que la demanda hídrica responde a las condiciones climáticas, la disponibilidad del recurso y las características territoriales de cada zona. En consecuencia, la demanda hídrica no puede entenderse como un valor único para todo el país, sino que debe analizarse considerando el contexto específico donde se emplaza cada vivienda.

DISTRIBUCIÓN DEL CONSUMO DENTRO DE LA VIVIENDA

Además del volumen total requerido, resulta relevante comprender cómo se distribuye el consumo al interior de la vivienda. Los principales usos del agua corresponden a actividades permanentes de habitabilidad, como higiene personal, descarga de inodoros, preparación de alimentos, lavado doméstico y, en determinadas épocas del año, riego domiciliario.

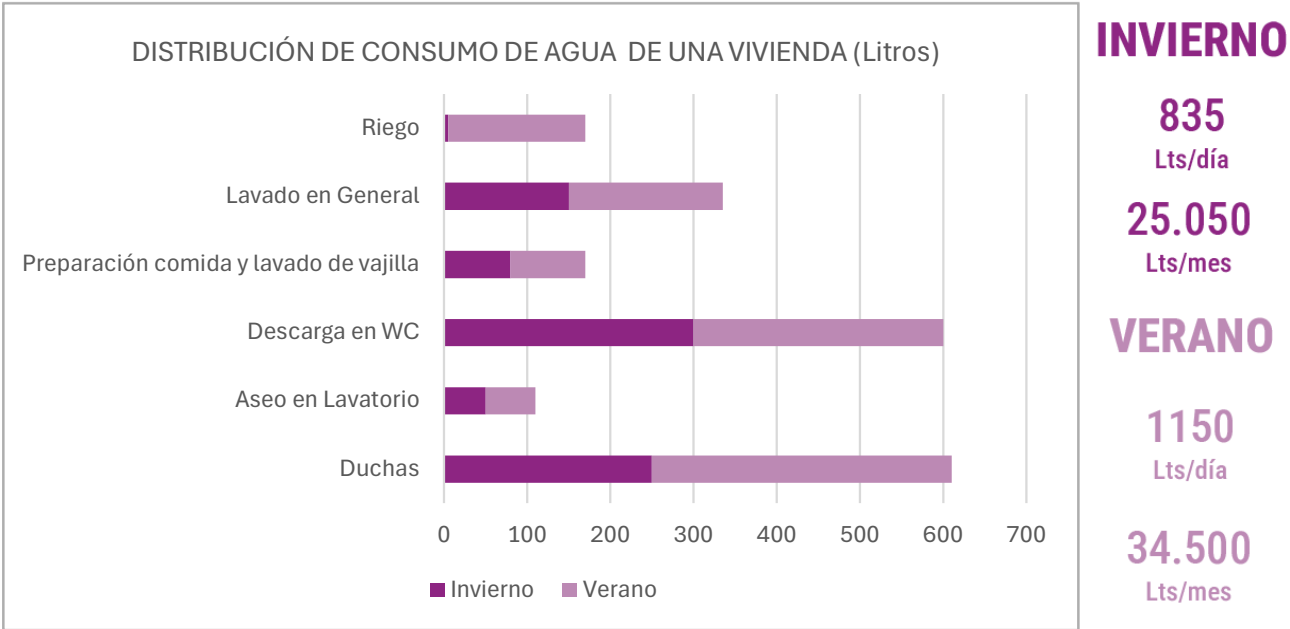
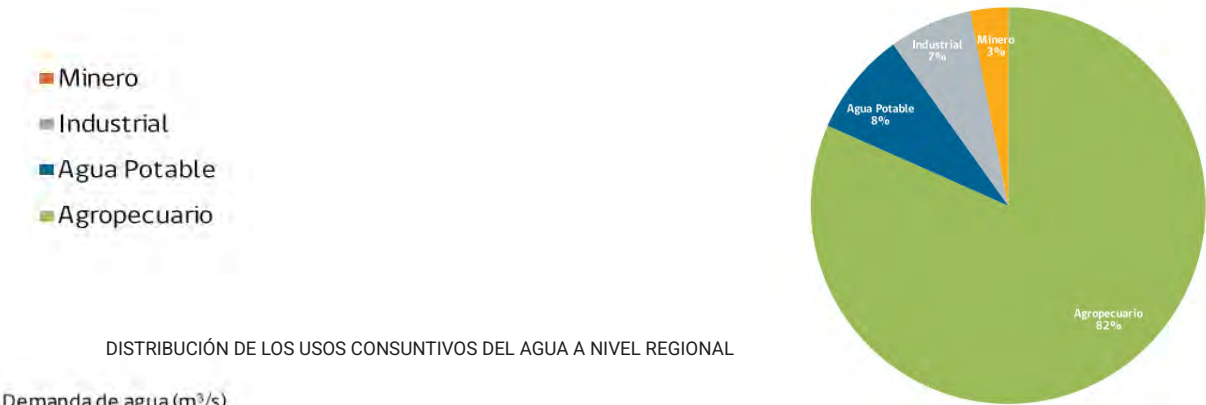


Gráfico 5. Distribución del consumo diario de agua de una vivienda promedio de cinco personas según uso y estación del año. Fuente: Elaboración propia a partir de Servicio Nacional del Consumidor (SERNAC), “¿Cuánto gasta una familia promedio de 5 personas?”.

CONSUMO RESIDENCIAL EN EL CONTEXTO DEL USO NACIONAL DEL AGUA

A escala nacional, el uso consuntivo del agua presenta una marcada concentración en el sector agropecuario, mientras que el abastecimiento de agua potable representa una fracción considerablemente menor del total. Los sectores industrial y minero también participan del consumo, aunque con una incidencia inferior respecto del uso agrícola. Asimismo, la distribución regional evidencia que la demanda de agua varía significativamente entre las distintas regiones del país, respondiendo a las características productivas y territoriales de cada zona. En este contexto, aunque el consumo destinado al abastecimiento residencial no constituye el principal uso del recurso en términos de volumen, su disponibilidad resulta estratégica por su relación directa con el consumo humano, la habitabilidad y la permanencia de las comunidades en el territorio.

DISTRIBUCIÓN DE LOS USOS CONSUNTIVOS DEL AGUA A NIVEL NACIONAL



DISTRIBUCIÓN DE LOS USOS CONSUNTIVOS DEL AGUA A NIVEL REGIONAL

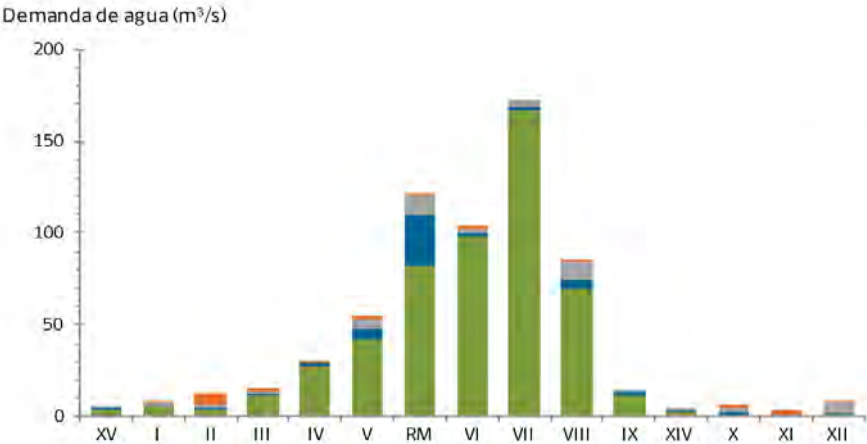


Gráfico 6. Distribución de los usos consuntivos del agua a nivel nacional. Fuente: Dirección General de Aguas (DGA). Atlas del Agua Chile 2016. Santiago: Ministerio de Obras Públicas, 2016

Gráfico 7. Distribución de los usos consuntivos del agua a nivel regional. Fuente: Dirección General de Aguas (DGA). Atlas del Agua Chile 2016. Santiago: Ministerio de Obras Públicas, 2016

SÍNTESIS DEL DIAGNÓSTICO Y OPORTUNIDAD DE INVESTIGACIÓN

Los antecedentes revisados evidencian que en diversas localidades rurales de la franja costera del norte de Chile convergen dos condiciones territoriales: la persistencia de escenarios de escasez hídrica que afectan el abastecimiento de agua y la presencia recurrente de camanchaca, un recurso atmosférico con potencial para ser aprovechado mediante sistemas de captación.

Diversas experiencias desarrolladas con captadores de malla Raschel han demostrado la factibilidad técnica de captar agua de niebla. Sin embargo, estos sistemas han permanecido principalmente como infraestructuras independientes, sin evolucionar hacia soluciones integradas a la vivienda ni responder a criterios de diseño arquitectónico, constructibilidad y escalabilidad.

Por otra parte, el análisis de la demanda hídrica permitió establecer un marco de referencia para evaluar el aporte potencial de estos sistemas. La captación de agua debe responder no solo al consumo humano, sino también a requerimientos cotidianos asociados a la higiene, la preparación de alimentos, la limpieza doméstica y, en determinados contextos, al riego de pequeña escala. En consecuencia, el desempeño de una tecnología de captación debe analizarse en función de la demanda real de una vivienda rural.



En consecuencia, la presente investigación propone avanzar desde los sistemas convencionales de captación hacia una solución integrada a la envolvente arquitectónica, mediante el desarrollo de un panel constructivo capaz de captar agua atmosférica como complemento al abastecimiento de viviendas rurales.

1.5 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este proyecto es Desarrollar un prototipo de panel constructivo para envoltorio arquitectónico capaz de captar y conducir agua atmosférica, destinado a mejorar la autonomía hídrica de viviendas rurales

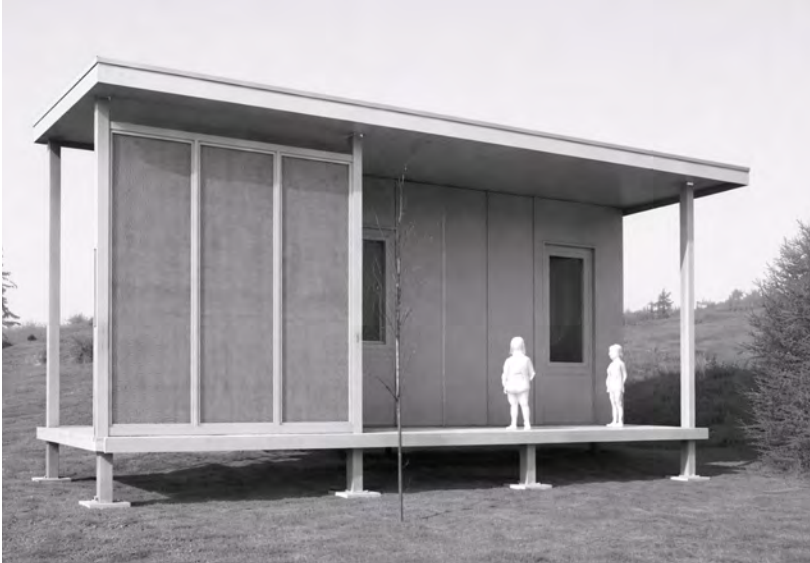


Fig. 8 Imagen intervenida en base a Imagen generada con IA – ChatGPT (OpenAI, 2025)



Fig. 9 Imagen intervenida en base a Imagen generada con IA – ChatGPT (OpenAI, 2025)

El proyecto plantea un cambio de escala respecto a los atrapanieblas tradicionales, trasladando la captación de niebla desde paneles aislados hacia un elemento constructivo capaz de formar parte de la vivienda. A partir del análisis de diversas tipologías existentes de captación y de la posterior selección e integración en un panel constructivo; la propuesta busca mejorar la autonomía hídrica de viviendas rurales ubicadas en zonas afectadas por escasez de agua, incorporando criterios de eficiencia hídrica, factibilidad constructiva y compatibilidad con el desempeño climático del territorio.

DESARROLLO DEL SISTEMA

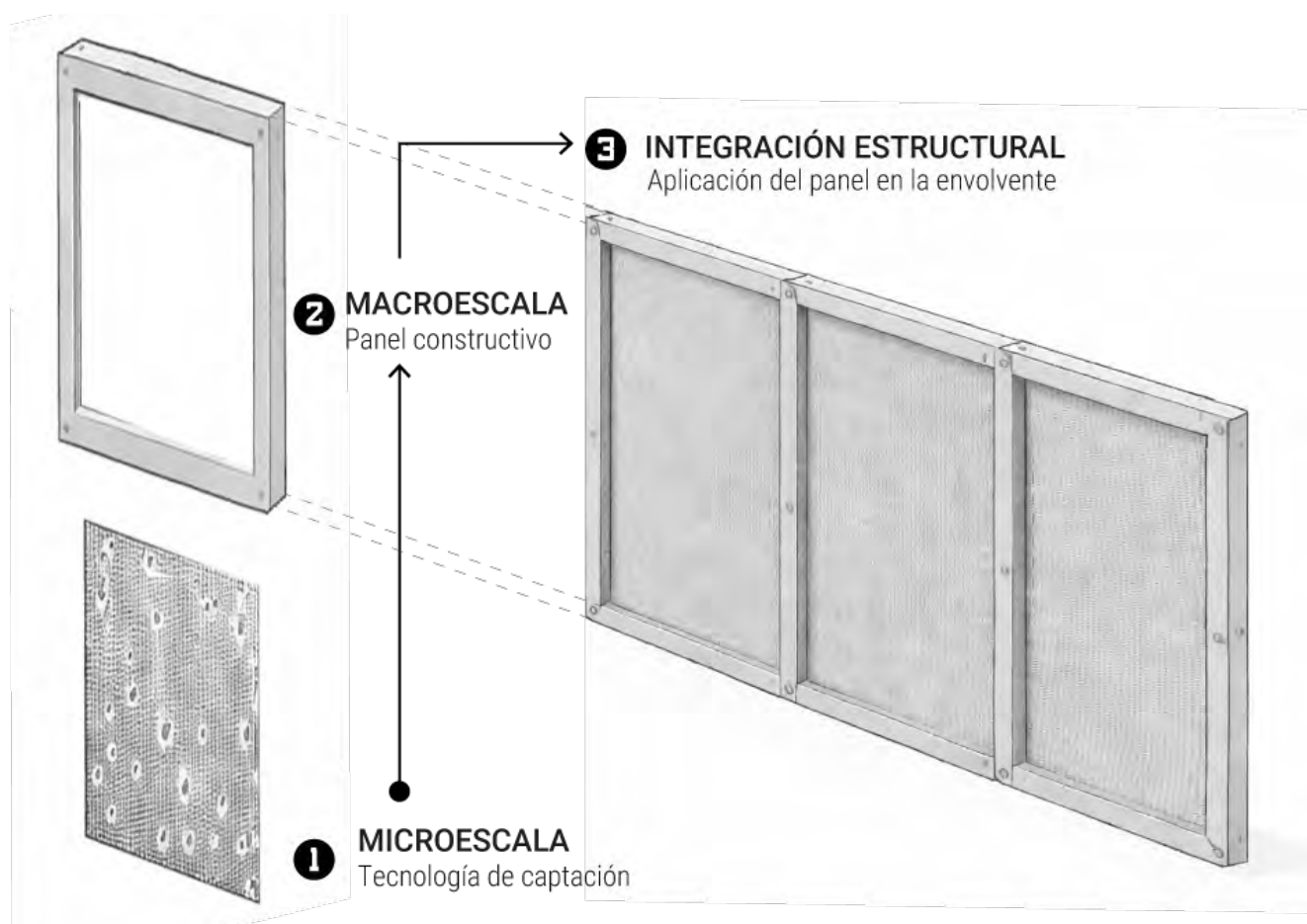


Fig. 10 Esquema del alcance del prototipo de panel. Fuente: Elaboración propia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcanzar el objetivo general, se definieron tres objetivos específicos que estructuran el proceso de investigación y desarrollo, abarcando el análisis de tecnologías existentes, el diseño del sistema y su validación experimental.



Fig. 1.1 Imagen intervenida en base a imagen generada con IA - ChatGPT (OpenAI, 2025)



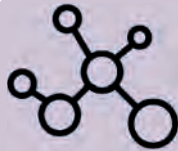
ANALIZAR Y SISTEMATIZAR

Las tecnologías existentes de captación de agua atmosférica, identificando sus principios de funcionamiento, criterios de diseño, ventajas, limitaciones y posibilidades de integración en envolventes arquitectónicas para viviendas rurales.



DISEÑAR Y DESARROLLAR

Un panel constructivo para envoltente arquitectónica destinado a la captación y conducción de agua atmosférica, mediante la incorporación de una tecnología de captación kirigami y la definición de sus parámetros geométricos y constructivos para su funcionamiento como superficie activa dentro de un sistema modular.



VALIDAR Y EVALUAR

Experimentalmente el desempeño del prototipo mediante ensayos en condiciones controladas, evaluando su capacidad de captación y conducción de agua atmosférica para alcanzar un nivel de madurez tecnológica TRL 4.

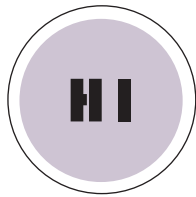
1.6 HIPÓTESIS DEL PROYECTO

HIPÓTESIS NULA



La incorporación de una geometría kirigami en una superficie captadora no produce diferencias significativas en la eficiencia de captación y conducción de agua atmosférica respecto de una malla raschel convencional.

HIPÓTESIS ALTERNATIVA



H1 - La incorporación de una geometría kirigami en una superficie captadora incrementa la eficiencia de captación de agua atmosférica respecto a una malla raschel convencional, favoreciendo el comportamiento aerodinámico del flujo de aire, la intercepción de microgotas y su posterior conducción por gravedad.

VARIABLES DEPENDIENTES

Medibles

- Eficiencia de captación de niebla

$$E = \frac{V}{A \times t} \quad [mL \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}]$$

V = Volumen captado

A = Área efectiva

t = Tiempo

Volumen de agua captado (mL)

VARIABLES INDEPENDIENTES

Tipo de superficie
captadora

Kirigami acero

Kirigami PET

Malla Raschel

Condición de ensayo

Sin viento

Con viento



1.7 ALCANCES Y LIMITACIONES

NIVEL DE MADUREZ

El presente proyecto se desarrollará bajo un enfoque de investigación aplicada (I+D), orientado a alcanzar un nivel de madurez tecnológica TRL 4, lo que implica la validación funcional del sistema en condiciones controladas de laboratorio.

ALCANCES

En este marco, los alcances del estudio se circunscriben al diseño y evaluación de un prototipo de panel para envolvente arquitectónica captador y conductor de agua atmosférica, basado en la integración de geometrías kirigami dentro de un panel constructivo modular.

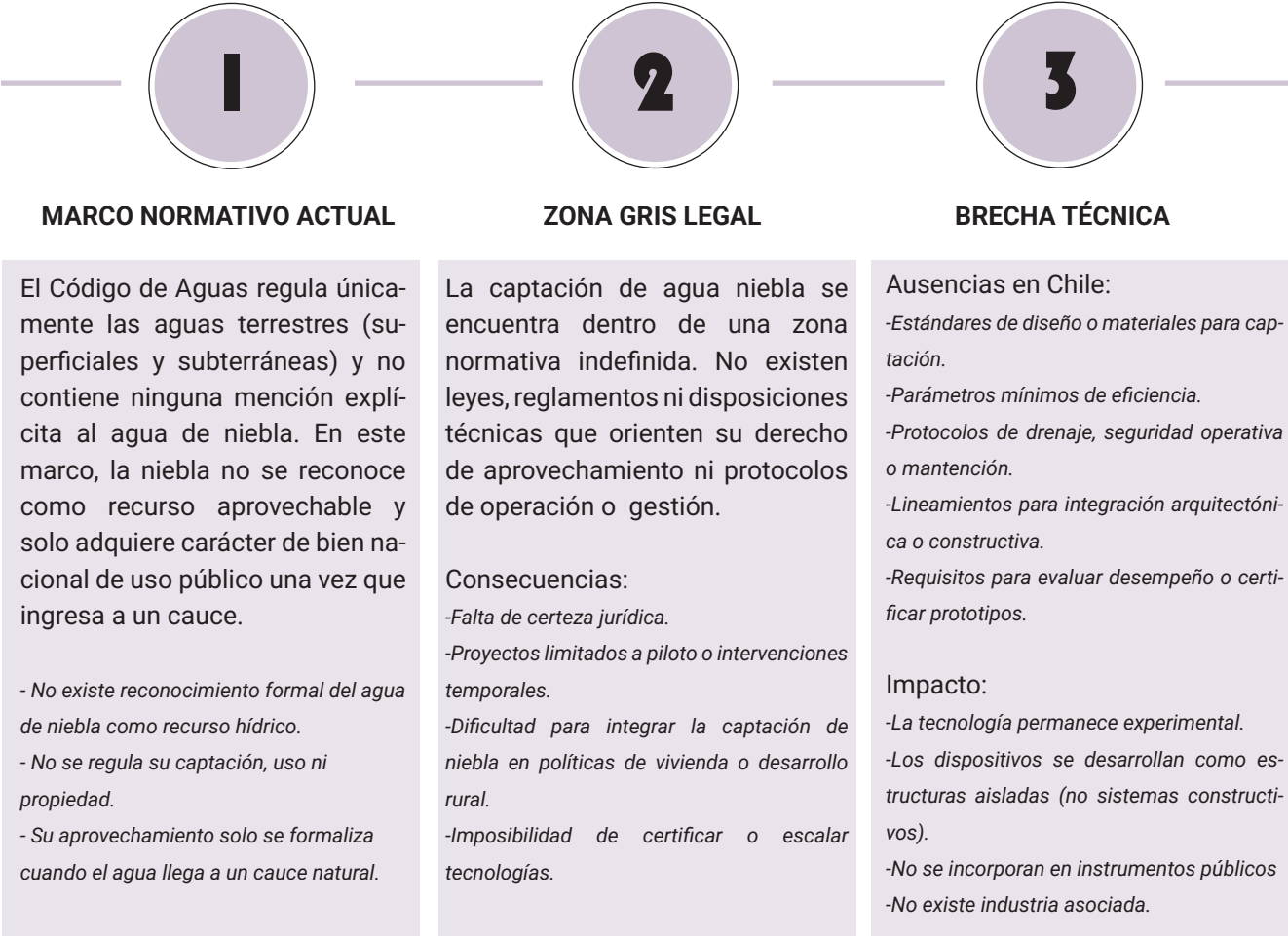
ESCALAS DE TRABAJO

El trabajo aborda tanto la escala micro, relacionada con la exploración y prueba de patrones kirigami, como la escala macro, referida al diseño del panel y su comportamiento hídrico dentro del sistema constructivo.

ENSAYOS

Los ensayos experimentales se realizarán bajo condiciones controladas, por lo que los resultados permitirán evaluar la factibilidad técnica del sistema, pero no su comportamiento definitivo en condiciones de exposición prolongada o variabilidad climática real.

BRECHA TÉCNICA Y NORMATIVA



02

***CAPÍTULO
DOS***

TERRITORIO DE APLICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

2.1 CAMPO DE APLICACIÓN

2.2 CONDICIONES PARA LA CAPTACIÓN

2.3 CARACTERIZACIÓN TERRITORIAL DEL RECURSO

02 CAMPO DE APLICACIÓN Y DIAGNÓSTICO TERRITORIAL

2.1 CAMPO DE APLICACIÓN

DISPONIBILIDAD TERRITORIAL

Según la Guía de Soluciones Sanitarias Sustentables: Atrapanieblas (2021), la disponibilidad de agua de niebla en Chile se concentra principalmente en la franja litoral comprendida entre las regiones de Arica y Parinacota y Biobío, donde confluyen el océano Pacífico, la Cordillera de la Costa y el desierto de Atacama. Esta configuración territorial favorece la presencia recurrente de camanchaca y constituye uno de los principales escenarios para el aprovechamiento del recurso atmosférico.

La guía señala que las condiciones más favorables para la captación se localizan, en términos generales, en sectores situados a menos de 20 km de la costa y entre aproximadamente 500 y 900 m s.n.m., donde la niebla intercepta las laderas occidentales de la Cordillera de la Costa y presenta mayor frecuencia de ocurrencia.



Fig. 12 Zonas con potencial para la captación de agua de niebla en Chile. Fuente: Ministerio de Salud. Atrapaniebla: Manual para el diseño e implementación de sistemas de captación de agua de niebla. Santiago, Chile, s.f.

SELECCIÓN DEL TERRITORIO

Si bien la niebla costera se distribuye a lo largo de una extensa franja del litoral chileno, la mayor parte de los estudios experimentales sobre captación de agua de niebla se ha desarrollado en el Norte Grande, donde existen campañas sistemáticas de monitoreo del recurso y ensayos de tecnologías de captación.

De acuerdo con Albornoz et al. (2023), la franja costera del desierto de Atacama concentra algunos de los sitios de investigación más relevantes del país, entre ellos Alto Patache y Falda Verde, considerados oasis de niebla debido a la persistencia de humedad atmosférica y a la disponibilidad recurrente del recurso. Estos sectores han permitido caracterizar las condiciones ambientales favorables para la captación de agua y generar antecedentes técnicos ampliamente utilizados como referencia para el desarrollo y evaluación de nuevas tecnologías.

En este contexto, el proyecto adopta estos antecedentes como base para comprender el comportamiento del recurso atmosférico y establecer un marco de referencia para el desarrollo del sistema propuesto



Figura 13. Localización de sitios de estudio en la franja costera del Desierto de Atacama, mostrando la posición de Alto Patache y Falda Verde, ambos reconocidos oasis de niebla. Adaptado de Albornoz et al. (2023).

2.2 CONDICIONES PARA LA CAPTACIÓN

Una vez definido el ámbito territorial de aplicación, resulta necesario comprender las condiciones ambientales que determinan el potencial de captación de agua de niebla en estos territorios.

TOPOGRAFÍA COSTERA

La captación de agua de niebla depende directamente de la configuración geográfica del territorio. En Chile, las condiciones más favorables se concentran en la franja costera, donde la interacción entre el océano Pacífico, la Cordillera de la Costa y el desierto de Atacama genera un ambiente propicio para la presencia recurrente de camanchaca.

Las zonas con mayor potencial de captación se localizan generalmente a menos de 20 km de la costa y entre 400 y 1.000 m s.n.m., rango altitudinal donde el relieve favorece la intercepción de la niebla sobre las laderas occidentales de la Cordillera de la Costa (Consultora Profesional Agraria Sur y Pontificia Universidad Católica, 2014).

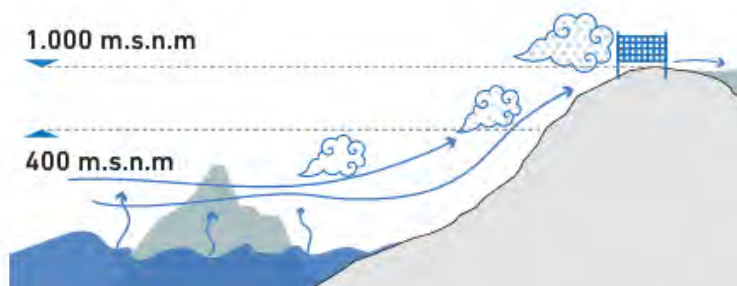


Figura 14. Esquema conceptual de las condiciones topográficas para la captación de agua de niebla. Fuente: Ministerio de Salud. Atrapaniebla: Manual para el diseño e implementación de sistemas de captación de agua de niebla. Santiago, Chile, s.f.

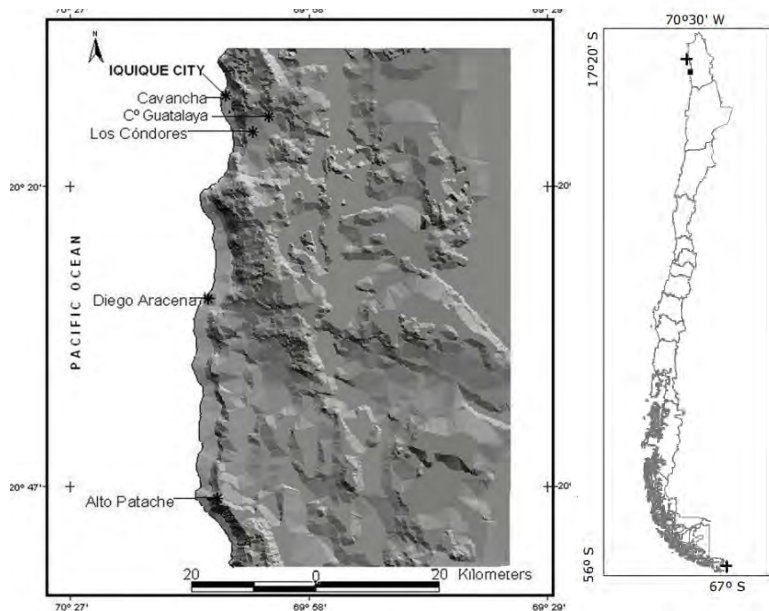


Figura 15. Configuración topográfica de la franja costera del norte de Chile, mostrando planicie litoral, acantilado y Cordillera de la Costa. Adaptado de Cereceda et al. (2008).

A una escala más específica, estudios climáticos desarrollados en la Región de Tarapacá identifican una fog zone comprendida aproximadamente entre 650 y 1.200 m s.n.m., donde la frecuencia de niebla, la humedad atmosférica y las condiciones para la captación alcanzan sus valores más favorables (Cereceda et al., 2008). Sectores como Alto Patache y Cerro Guatalaya se ubican dentro de esta franja, razón por la cual han concentrado gran parte de las investigaciones experimentales sobre cosecha de agua de niebla.

FORMACIÓN DE LA CAMANCHACA

La persistencia de la camanchaca responde a la interacción entre la corriente fría de Humboldt, la inversión térmica y los vientos predominantes del sur-suroeste, que transportan aire húmedo desde el océano hacia el continente. Al encontrar la Cordillera de la Costa, esta masa de aire asciende, se enfría y permanece adherida a las laderas occidentales, generando bancos de niebla relativamente estables (Cereceda et al., 2008).

Las mediciones meteorológicas realizadas en Alto Patache muestran humedades relativas medias superiores al 80 % durante la mayor parte del año, con una presencia más frecuente de niebla entre otoño y primavera. Asimismo, los autores registran rendimientos de captación mediante Standard Fog Collectors que varían entre 0,8 y 7 L/m²·día, dependiendo de la altitud y de la ubicación respecto del océano (Cereceda et al., 2008). Estos antecedentes evidencian que el potencial de captación no depende únicamente de la existencia de niebla, sino también de las condiciones topográficas y climáticas específicas de cada sitio.

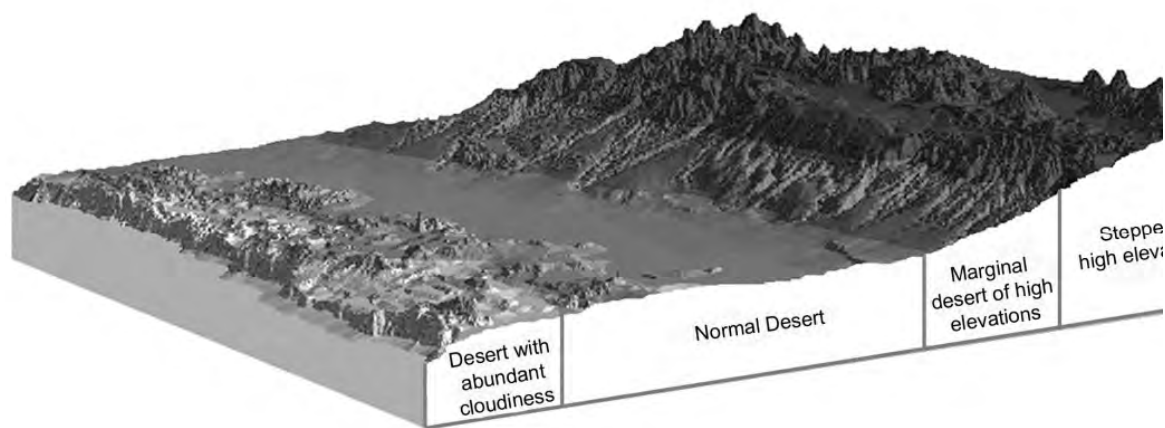


Figura 16. Esquema del proceso de formación de la camanchaca, mostrando el flujo de aire húmedo desde el océano, la corriente fría de Humboldt, la capa de inversión térmica y la condensación sobre la Cordillera de la Costa. Adaptado de Cereceda & Osses (2008).

VARIACIÓN ANUAL DE HUMEDAD RELATIVA

Para caracterizar las condiciones de humedad del territorio de estudio se utilizaron los registros meteorológicos recopilados por Cereceda y Osses (2008) en estaciones representativas de la franja costera del Norte Grande. El análisis considera las estaciones de Cavancha, Diego Aracena, Los Cóndores y Alto Patache, ubicadas en distintos sectores del litoral y la Cordillera de la Costa, permitiendo observar la variación anual de la humedad relativa en ambientes asociados a la presencia de camanchaca.

Los registros muestran que la humedad relativa se mantiene, en general, entre un 70 y un 85 % durante gran parte del año, alcanzando sus valores más altos entre invierno y primavera. Las estaciones ubicadas en la Cordillera de la Costa, como Alto Patache y Los Cóndores, presentan los mayores niveles de humedad, mientras que Cavancha y Diego Aracena registran valores ligeramente inferiores.

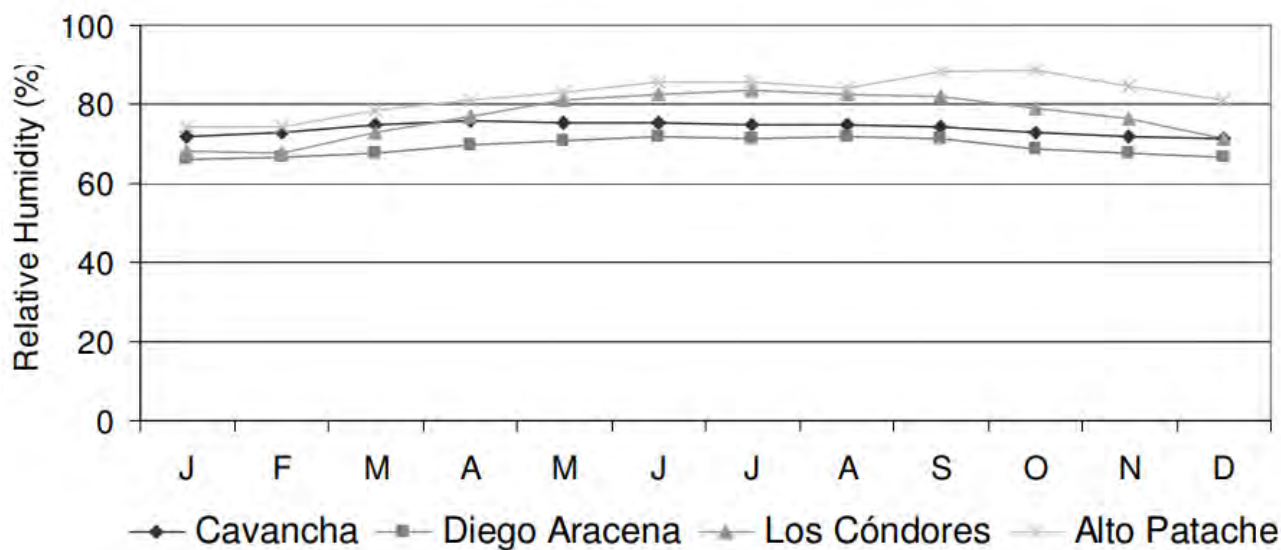


Gráfico 8. Variación mensual de la humedad relativa promedio en estaciones de la franja costera del Norte Grande (Cavancha, Diego Aracena, Los Cóndores y Alto Patache), mostrando valores elevados y una marcada estabilidad anual. Fuente: The climate of the coast and fog zone in the Tarapacá region, Atacama Desert, Chile Cereceda & Osses (2008).

En conjunto, los registros evidencian una alta estabilidad anual de la humedad relativa en las estaciones analizadas, reflejando la persistencia de condiciones atmosféricas asociadas a la camanchaca a lo largo del litoral norte.

VELOCIDAD DEL VIENTO

Además de la disponibilidad de humedad atmosférica, el desempeño de los sistemas de captación depende del régimen de viento, ya que éste determina el flujo de niebla que atraviesa la superficie captadora.

Para caracterizar el régimen de vientos de la franja costera del Norte Grande se utilizaron los registros meteorológicos recopilados por Cereceda y Osses (2008) en las estaciones de Cavancha, Diego Aracena y Los Cóndores. El estudio analiza la velocidad media del viento en distintos horarios del día (08:00, 14:00 y 19:00 horas), permitiendo comparar su comportamiento en sectores representativos del litoral y la Cordillera de la Costa.

Los registros muestran que las velocidades del viento presentan variaciones asociadas tanto a la ubicación de las estaciones como al horario de medición. En términos generales, los valores más bajos se registran durante la mañana, mientras que las mayores velocidades ocurren durante la tarde, alcanzando máximos en la estación Diego Aracena.

Comparativamente, Cavancha registra las menores velocidades medias, Diego Aracena presenta los valores más altos y Los Cóndores mantiene un comportamiento intermedio. Estas diferencias responden a las características locales de cada estación, particularmente a su exposición al flujo predominante proveniente del océano.

En conjunto, los registros evidencian un régimen de vientos relativamente estable en las estaciones analizadas, constituyendo uno de los principales factores que caracterizan la dinámica atmosférica del litoral norte.

Los antecedentes climáticos anteriores permiten comprender las condiciones físicas que favorecen la captación de agua de niebla. En los últimos años, estos conocimientos han sido complementados mediante herramientas geoespaciales que permiten representar y cuantificar el recurso a escala territorial.

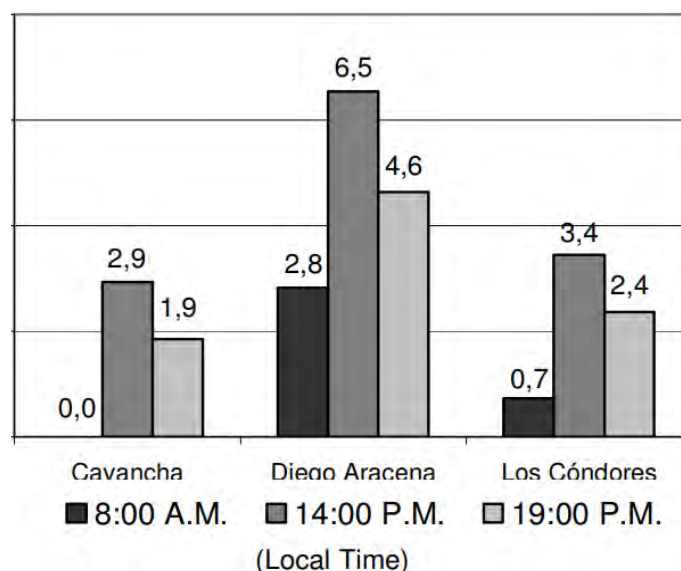


Gráfico 9. Análisis integrado del régimen de viento en la franja costera del Norte Grande, mostrando velocidad media anual según estación meteorológica. Fuente: The climate of the coast and fog zone in the Tarapacá region, Atacama Desert, Chile Cereceda & Osses (2008).

2.3 CARACTERIZACIÓN TERRITORIAL DEL RECURSO

NNB anual 1998-2022

Promedio del período 1998-2022

En los últimos años, el estudio del agua de niebla en Chile ha avanzado desde levantamientos locales hacia plataformas que integran información meteorológica, satelital y geoespacial. Un ejemplo de ello es el Mapa Agua de Niebla, desarrollado por el Centro UC Desierto de Atacama, el cual reúne información sobre la disponibilidad de agua de niebla colectable en el litoral comprendido entre los 18° y 35° S, constituyéndose como una herramienta para la planificación y gestión de este recurso complementario.

Uno de los productos generados por esta plataforma corresponde al mapa de frecuencia anual de niebla y nubes bajas (NNB), elaborado a partir del promedio del período 1998–2022. Este indicador permite cuantificar la recurrencia espacial del fenómeno e identificar las zonas donde la presencia de niebla es más persistente a lo largo del tiempo. Los mayores valores se concentran en la franja litoral del norte y centro de Chile, disminuyendo progresivamente hacia el interior del territorio.

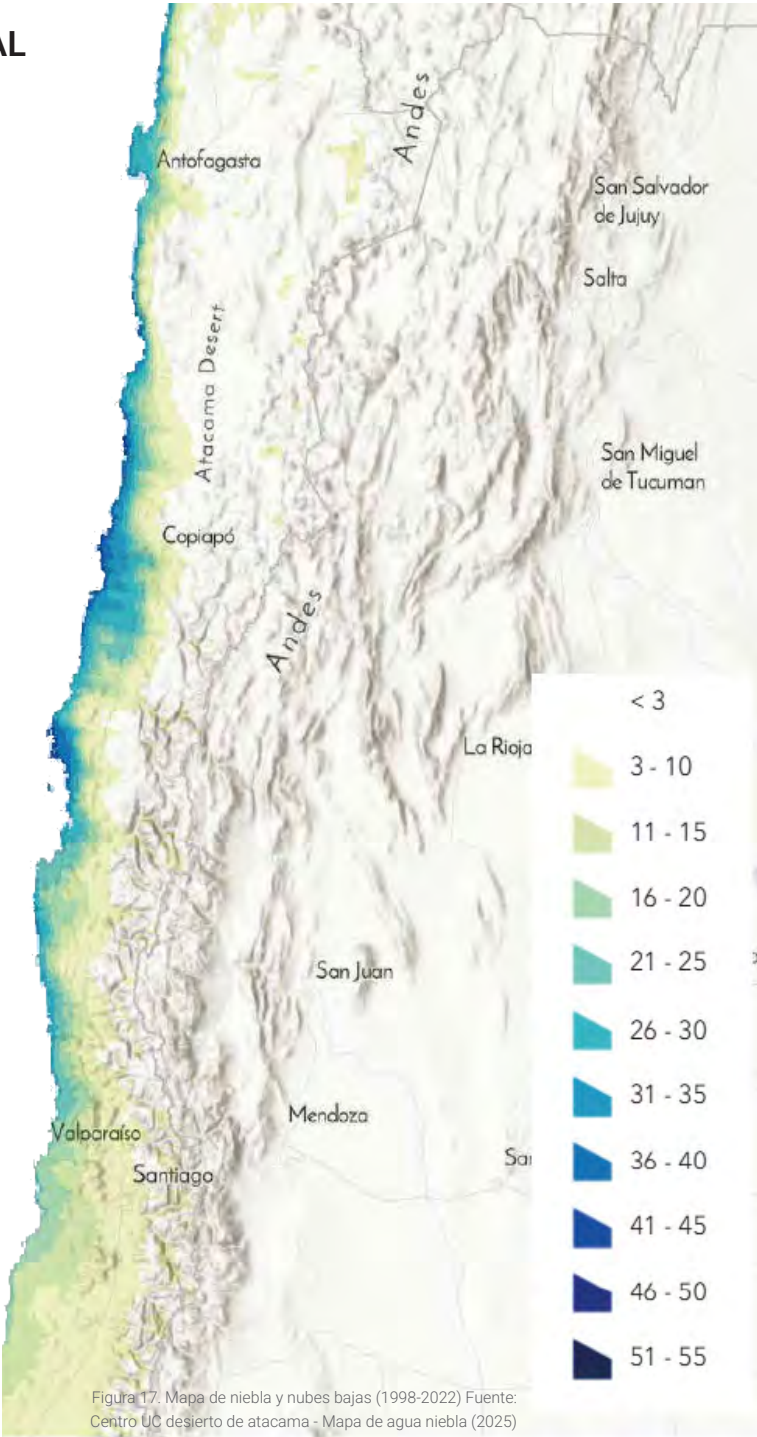


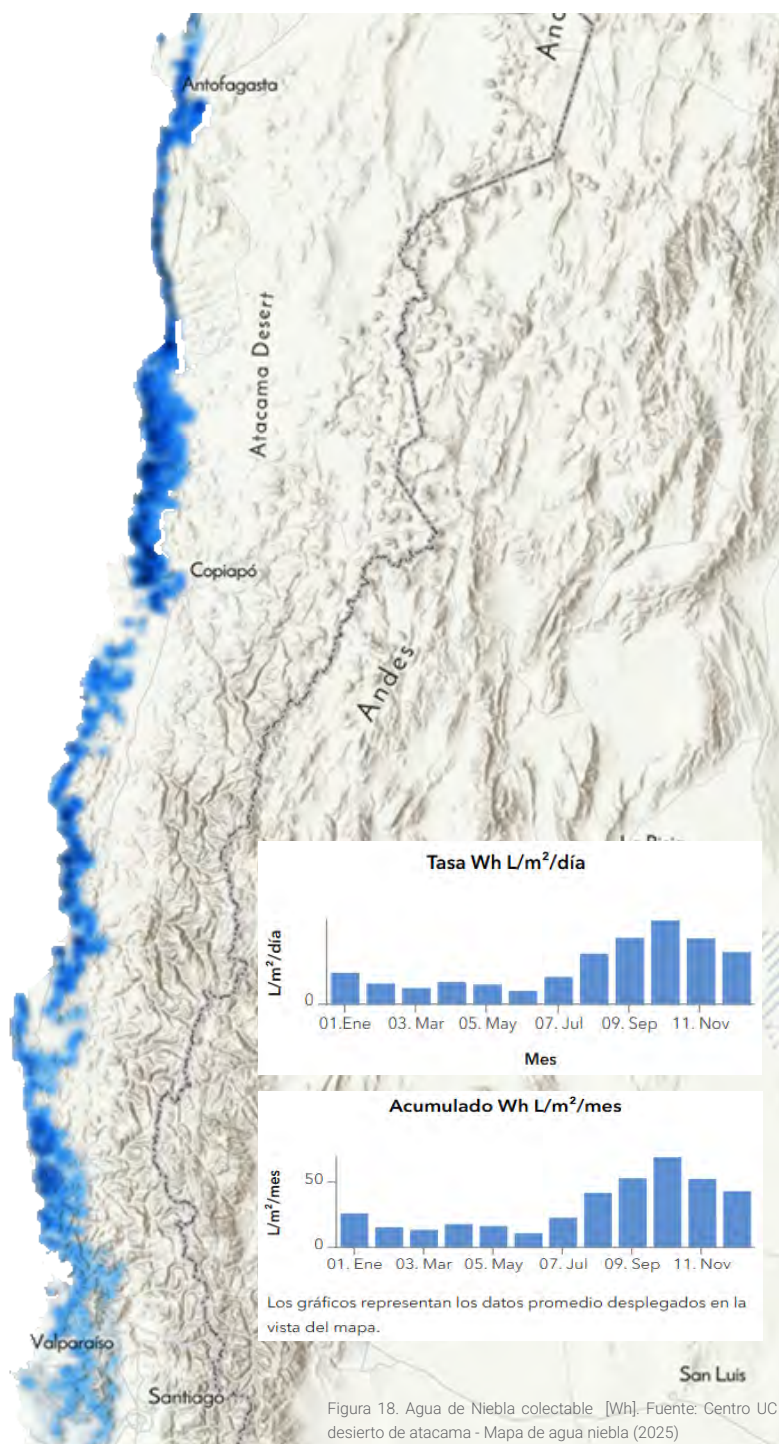
Figura 17. Mapa de niebla y nubes bajas (1998-2022) Fuente: Centro UC desierto de atacama - Mapa de agua niebla (2025)

Agua niebla colectable

[Wh]

Además de caracterizar la frecuencia del fenómeno, la plataforma incorpora un indicador de agua de niebla colectable, el cual estima el potencial hídrico disponible para captación mediante modelos desarrollados para distintos sectores del litoral chileno. Esta información permite pasar desde una descripción cualitativa de la presencia de niebla a una evaluación cuantificable del recurso, facilitando la comparación entre territorios y la identificación de zonas con mayor potencial de aprovechamiento.

Los resultados muestran que los mayores valores se concentran nuevamente en la franja costera comprendida entre las regiones de Tarapacá y Valparaíso, coincidiendo con sectores donde históricamente se han desarrollado investigaciones y proyectos de captación de agua de niebla. Asimismo, la plataforma incorpora la variación mensual del recurso, permitiendo evaluar su comportamiento estacional y entregar antecedentes para el dimensionamiento de sistemas de captación en distintos contextos territoriales



03

***CAPÍTULO
TRES***

METODOLOGÍA

3.1 PLAN DE TRABAJO

3.2 CARTA GANTT

3.3 ETAPAS OPERATIVAS

3.4 SOFTWARES Y HERRAMIENTAS

03 METODOLOGÍA

3.1 PLAN DE TRABAJO



A

ANÁLISIS Y SISTEMATIZACIÓN

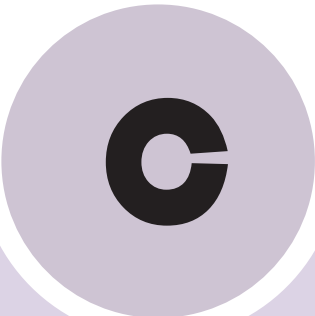
Organización y análisis de antecedentes teóricos y técnicos sobre tecnologías de captación de agua de niebla, condiciones climáticas, demanda hídrica, sistemas constructivos y referentes tecnológicos. A partir de esta información se establecieron criterios de diseño y parámetros para orientar el desarrollo del sistema propuesto.



B

DISEÑO Y DESARROLLO

Estudio y análisis de distintas tecnologías de captación de agua de niebla para evaluar su potencial de integración en una envolvente arquitectónica. A partir de esta revisión se definiran criterios de selección y se desarrollará la solución constructiva propuesta, culminando con la fabricación de los prototipos para su evaluación.

**C**

VALIDACIÓN Y EVALUACIÓN

Ensayos experimentales en condiciones controladas mediante niebla artificial para evaluar el desempeño de los prototipos. Se realizaron mediciones del volumen captado, eficiencia de drenaje y comportamiento del sistema, obteniendo antecedentes cuantitativos y cualitativos para validar su funcionamiento.

**D**

DOCUMENTACIÓN Y SÍNTESIS

Integración y análisis de los resultados obtenidos para establecer criterios de diseño, especificaciones técnico-construccionistas y conclusiones de la investigación, junto con proyecciones para futuras etapas de desarrollo y validación.

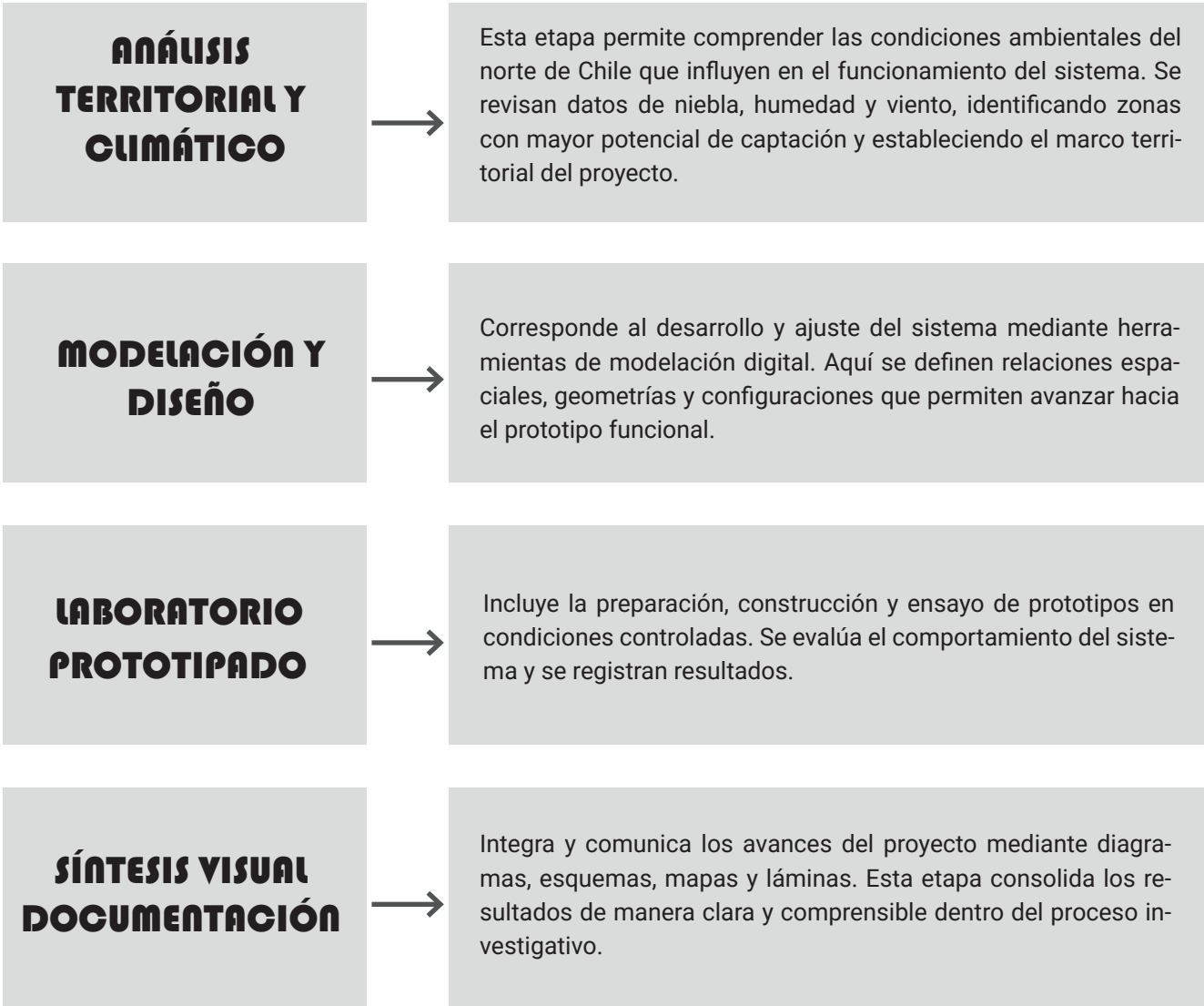
3.2 CARTA GANTT

ACTIVIDADES / PERIODO	PRIMER S									
	SEP				OCT				NOV	
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2
ACTIVIDAD 1: INVESTIGACIÓN Y MARCO TEÓRICO										
1.1 Estado del arte de captación atmosférica, condiciones de funcionamiento										
1.2 Estado del arte kirigami aplicado a captación de niebla										
1.3 Análisis climático y territorial zona norte										
1.4 Definición de criterios de diseño y requisitos técnicos del prototipo										
ACTIVIDAD 2: DEFINICIÓN DEL SISTEMA HÍDRICO-CONSTRUCTIVO										
2.1 Definición tipológica del sistema										
2.2 Definición de variables geométricas del kirigami										
2.3 Experimentación de materiales										
2.4 Diseño del prototipo TRL 4 (GEOMETRÍA + MATERIAL)										
2.5 Iteraciones estéticas de integración arquitectónica										
ACTIVIDAD 3: EXPERIMENTACIÓN I+D										
3.1 Construcción de prototipos										
3.2 Ensayos de captación (laboratorio/exterior)										
3.3 Registro fotográfico y cuantificación										
3.4 Optimización geométrica										
3.5 Validación funcional + riesgos (TRL4)										
ACTIVIDAD 4: INTEGRACIÓN ARQUITECTÓNICA										
4.1 Integración del sistema hídrico en estructura mínima										
4.2 Modelación 3D y detalles constructivos										
ACTIVIDAD 5: DOCUMENTOS Y ENTREGABLES										
5.1 Redacción de Memoria I+D										
5.2 Láminas finales										
5.3 Preparación de defensa										

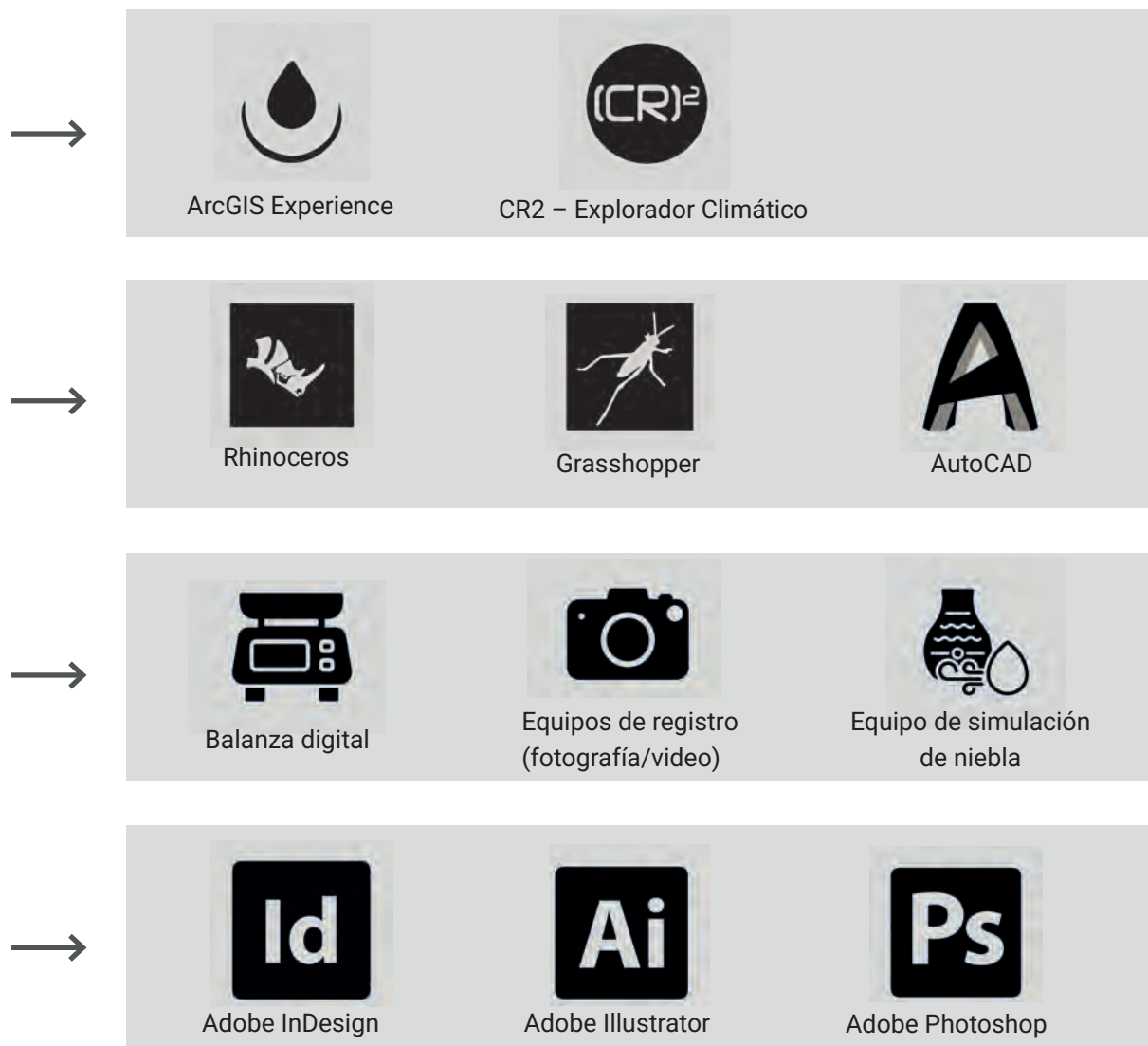
Tabla 3. Carta gantt. Fuente: Elaboración Propia (2025)

3.3 ETAPAS OPERATIVAS

Este proceso articula momentos de análisis, diseño y verificación que permiten avanzar de lo general a lo específico, trazando una secuencia de trabajo clara que sostiene el desarrollo de la investigación.



3.4 SOFTWARES Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS



04

***CAPÍTULO
CUATRO***

ESTADO DEL ARTE

4.1 TIPOLOGÍAS DE CAPTACIÓN ATMOSFÉRICA

4.2 CAPTACIÓN ATMOSFÉRICA POR COALESCENCIA

4.3 TECNOLOGÍAS ATRAPANIEBLA

4.4 COMPARACIÓN DE EFICIENCIA

4.5 TIPOLOGÍAS KIRIGAMI PARA CAPTACIÓN ATMOSFÉRICA

04 ESTADO DEL ARTE

4.1 TIPOLOGÍAS DE CAPTACIÓN ATMOSFÉRICA

La captación de agua atmosférica reúne un conjunto de técnicas que permiten obtener agua dulce directamente desde el aire, aprovechando fenómenos naturales como, el rocío, la condensación radiativa o la adsorción de vapor. Estos métodos han adquirido relevancia en contextos de estrés hídrico, ya que operan sin necesidad de infraestructura hidráulica, dependen de energías tanto pasivas como activas y pueden ser integrados en sistemas habitacionales o productivos a distintas escalas.

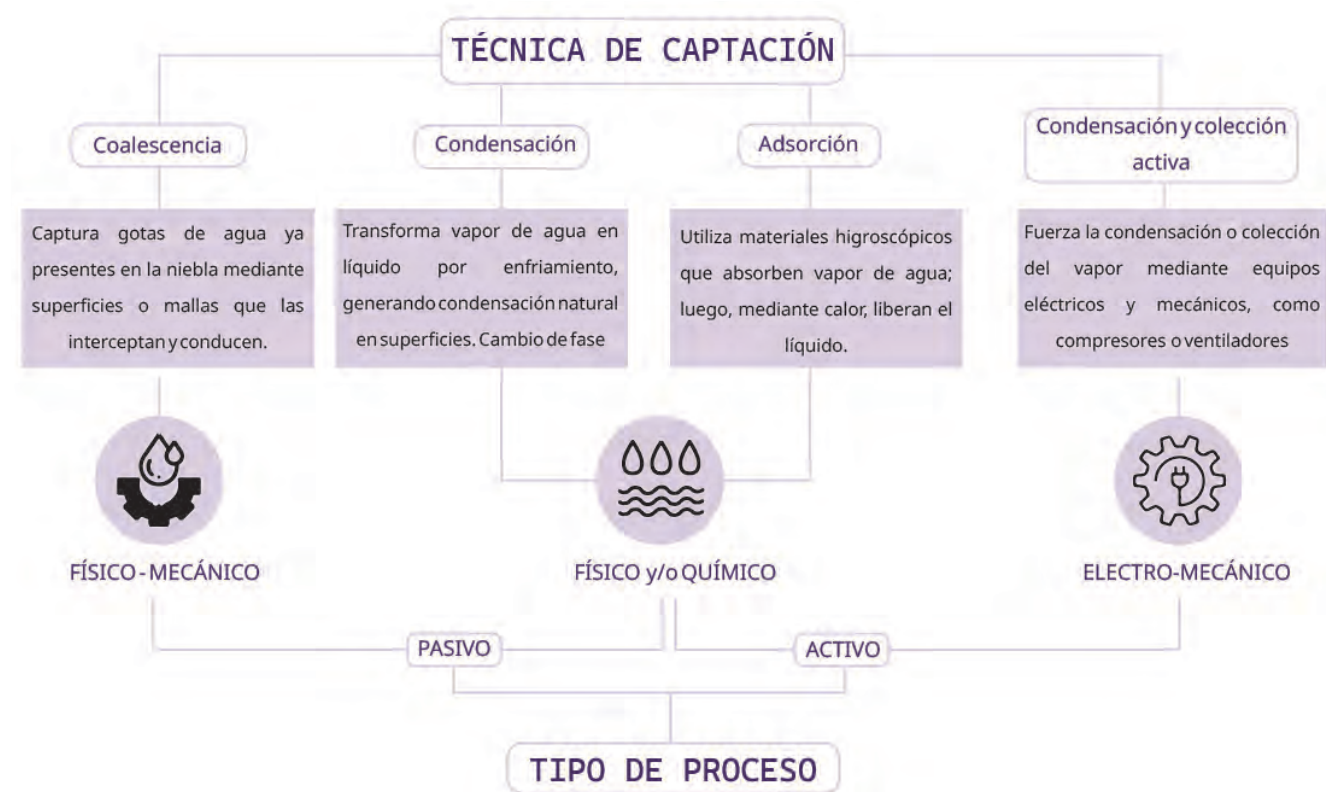


Figura 19. Diagrama de tipologías de captación atmosférica. Fuente: Elaboración propia (2025).

Las tecnologías de captación de agua atmosférica pueden clasificarse, de manera general, en cuatro categorías: captación por condensación, que transforma el vapor de agua en estado líquido mediante el enfriamiento de una superficie; adsorción, que emplea materiales higroscópicos para absorber y liberar agua; condensación activa, que acelera el cambio de fase mediante sistemas electromecánicos; y captación por coalescencia, basada en la interceptación, unión y drenaje de las microgotas presentes en la niebla. Debido a su funcionamiento pasivo, su aplicación en zonas costeras con presencia recurrente de niebla y su potencial de incorporación en sistemas constructivos, la captación por coalescencia fue seleccionada como la estrategia de desarrollo del presente proyecto.

4.2 CAPTACIÓN ATMOSFÉRICA POR COALESCENCIA

TIPO DE PROCESO - FÍSICO MECÁNICO - PASIVO

La captación por coalescencia se fundamenta en la interceptación y fusión de microgotas presentes en la niebla o en el aire saturado. Cuando estas microgotas impactan una superficie colectora, quedan retenidas y comienzan a agruparse, aumentando su tamaño hasta formar gotas mayores que pueden desplazarse por gravedad o por gradientes de superficie hacia un punto de recolección.

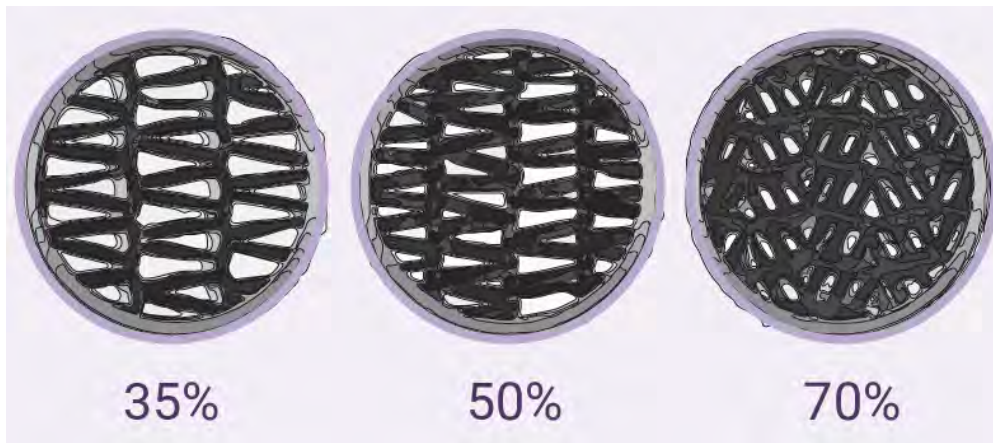


Figura 20. Diagrama explicativo coalescencia. Fuente: Elaboración propia (2025).

4.3 TECNOLOGÍAS ATRAPANIEBLAS

1° MALLAS RASCHEL Y MALLAS CRUZADAS METÁLICAS

MALLA RASCHEL



Base histórica –
Eficiencia 3–10
 $L/m^2 \cdot \text{día}$

Figura 21. Tipos de malla Raschel de polietileno disponibles en diferentes porcentajes de sombra (35 %, 50 %, 70 %), utilizadas comúnmente en sistemas de captación de niebla. Imagen modificada en base al catálogo de DM Tecnologías (s.f.).

MALLA METÁLICA

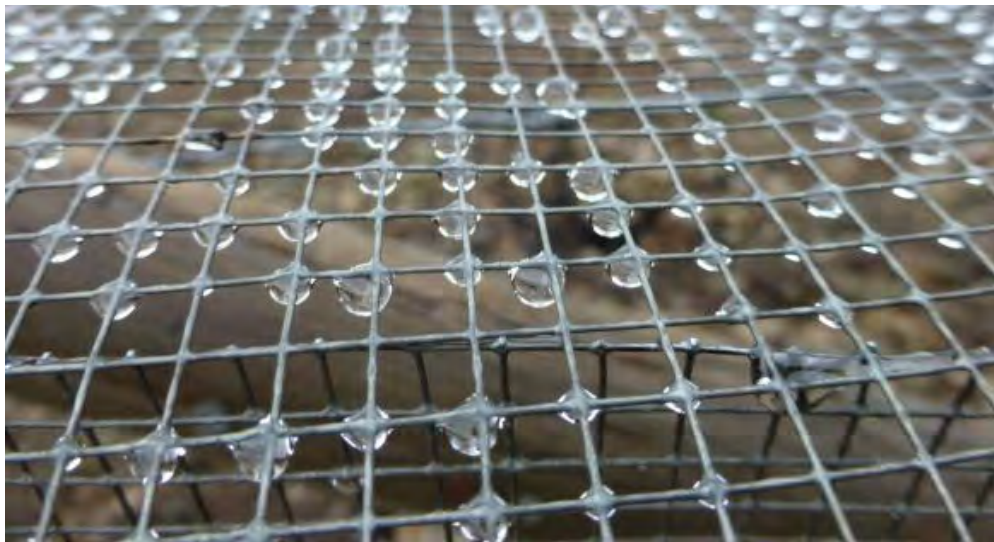


Figura 22 Formación de gotas por coalescencia sobre una malla metálica durante un evento de niebla, mostrando acumulación en los cruces de alambres. Fuente: Okanagan Okanagan (2013).

La captación de agua de niebla ha sido practicada durante siglos por comunidades asentadas en territorios con escasez hídrica, aprovechando de manera pasiva la condensación de la humedad atmosférica. Sin embargo, el desarrollo de tecnologías específicamente destinadas a este propósito comenzó durante la segunda mitad del siglo XX, impulsado por investigaciones orientadas a transformar este recurso en una fuente complementaria de abastecimiento. En Chile, los primeros prototipos fueron desarrollados durante la década de 1960 por el físico Carlos Espinosa, de la Universidad Católica del Norte, dando origen a una línea de investigación que posteriormente se consolidó mediante proyectos como Alto Patache, Falda Verde, Peñablanca y El Tofo, los cuales permitieron evaluar el potencial de la niebla en distintos sectores del norte del país.

En este contexto surgieron las mallas Raschel de polietileno y las mallas metálicas entrecruzadas, consideradas la primera generación de tecnologías modernas para la captación de agua de niebla. Estos sistemas funcionan mediante la interceptación de las microgotas transportadas por el viento, su coalescencia sobre las fibras de la malla y el posterior drenaje gravitacional hacia un sistema de recolección. Aunque continúan siendo la tecnología más difundida debido a su bajo costo, disponibilidad comercial y facilidad de implementación, la literatura señala que la malla Raschel fue desarrollada originalmente para aplicaciones agrícolas, de sombreado y cercado, siendo posteriormente adaptada para la captación de niebla sin un proceso sistemático de optimización para esta función (Kennedy y Boreyko, 2024).

El desempeño de estas mallas depende principalmente de la geometría de sus fibras y de su porosidad. Cuando las aberturas son demasiado grandes, una parte importante de la niebla atraviesa la superficie sin ser interceptada; por el contrario, cuando la porosidad disminuye para aumentar la captación, las gotas quedan retenidas entre los filamentos, dificultando el drenaje y reduciendo el flujo de aire. Esta limitación, conocida como dual constraint, impide optimizar simultáneamente la eficiencia de captura, la permeabilidad aerodinámica y el drenaje del agua recolectada, constituyendo una de las principales motivaciones para el desarrollo de nuevas tecnologías de captación (Kennedy y Boreyko, 2024).

2° SISTEMAS DE DOBLE CAPA CLOUD FISHER Y VARIANTES

Los sistemas de doble capa representan la segunda generación de tecnologías atrapanieblas y surgen como una evolución de las mallas tradicionales, con el objetivo de mejorar la eficiencia de captación y responder a las exigencias de operación en condiciones ambientales más severas. A diferencia de los sistemas convencionales, estas configuraciones incorporan una mayor complejidad geométrica y estructural, buscando aumentar la estabilidad del flujo de agua sobre la superficie y reducir las pérdidas provocadas por el viento.

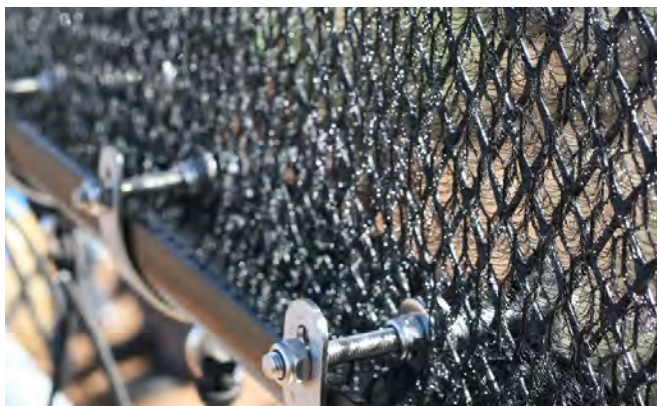


Figura 23. Sistema CloudFisher instalado en Marruecos, diseñado para mejorar la retención y recolección de agua de niebla mediante una configuración de doble malla. Fuente: WebUrbanist (2017).

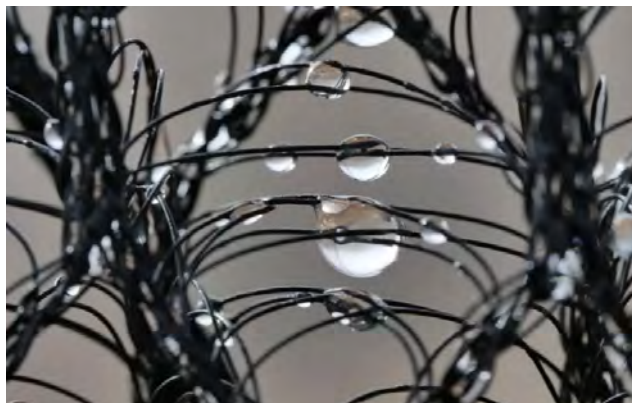


Figura 24. Sistema CloudFisher®, compuesto por una estructura de acero con una configuración de doble malla para la captación de agua de niebla. Fuente: WasserStiftung (s. f.).

Uno de los desarrollos más representativos de esta generación es CloudFisher®, tecnología desarrollada por la fundación alemana WasserStiftung y actualmente comercializada por Aqualonis GmbH. Su diseño incorpora una malla frontal de captación y una segunda capa estabilizadora, conformando una estructura tridimensional que mejora la resistencia al viento, favorece el drenaje y aumenta la estabilidad del proceso de captación

En comparación con las mallas Raschel, los sistemas de doble capa presentan una captación más estable y una mayor resistencia estructural, reportándose incrementos cercanos al 36 % en el rendimiento respecto de las configuraciones convencionales. Sin embargo, al mantener una geometría basada en fibras entrecruzadas, continúan enfrentando la limitación conocida como dual constraint, donde el aumento de la densidad de la malla mejora la captura de gotas, pero reduce la permeabilidad al aire y favorece la acumulación de agua sobre la superficie.

3° SUPERFICIES BIOMIMÉTICAS

La tercera generación de tecnologías atrapanieblas corresponde a las superficies biomiméticas, inspiradas en organismos capaces de captar agua en ambientes áridos. Según Kennedy y Boreyko (2024), estas superficies reproducen estrategias presentes en el escarabajo del desierto *Stenocara*, las telarañas, los cactus y la hierba *Namib* para mejorar la captación y conducción del agua.

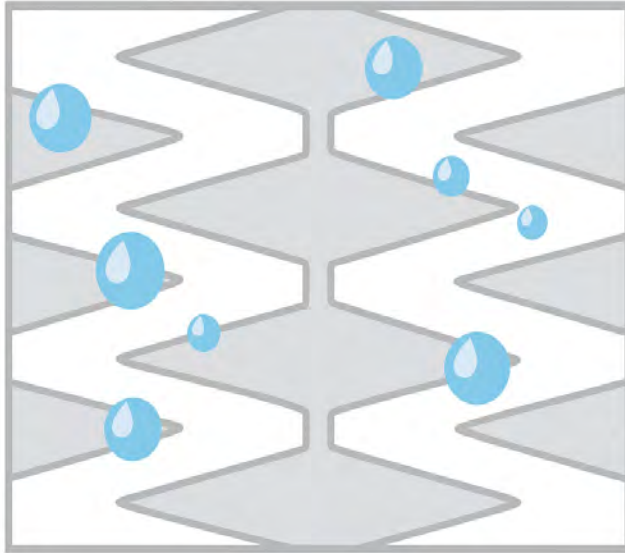


Figura 25. Esquema de comportamiento de gotas sobre una superficie con geometría zigzag, mostrando acumulación en vértices, coalescencia acelerada y drenaje guiado por la pendiente local. Ilustración reinterpretada en base a Kennedy & Boreyko (2024).

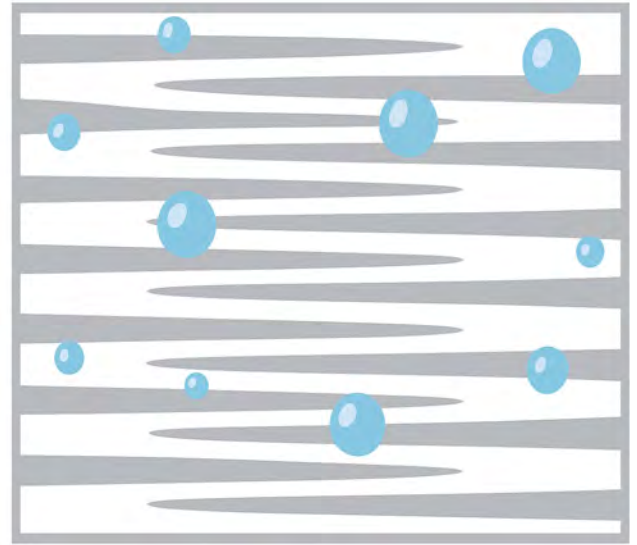


Figura 26. Esquema de comportamiento de gotas sobre filamentos horizontales, evidenciando acumulación, coalescencia y drenaje limitado debido a la disposición lineal paralela. Ilustración reinterpretada en base a Kennedy & Boreyko (2024).

Estas configuraciones incorporan gradientes de curvatura, patrones selectivos de mojabilidad (zonas hidrofílicas e hidrofóbicas) y microcanales que favorecen la formación, conducción y drenaje de las gotas hacia puntos de recolección. Algunas propuestas incorporan además mecanismos de transporte por presión capilar, acelerando el desplazamiento del agua sobre la superficie.

Sin embargo, la mayoría de estas soluciones permanece en etapa experimental. Aunque mejoran la captación y reducen el desprendimiento de gotas por acción del viento, su fabricación requiere procesos complejos que dificultan su escalabilidad y aplicación en sistemas constructivos de gran superficie. Esta limitación mantiene abierta la búsqueda de tecnologías que combinen un alto rendimiento con factibilidad constructiva (Kennedy y Boreyko, 2024).

4° MANIPULACIÓN AERODINÁMICA

La cuarta generación de tecnologías de captación introduce un cambio de enfoque: en lugar de optimizar únicamente la superficie colectora, modifica la geometría para controlar el flujo del aire y el desplazamiento de las gotas. Según Kennedy y Boreyko (2024), este grupo incluye tecnologías como Fog Harp, Vertical Fiber Mesh, superficies tridimensionales y configuraciones kirigami.

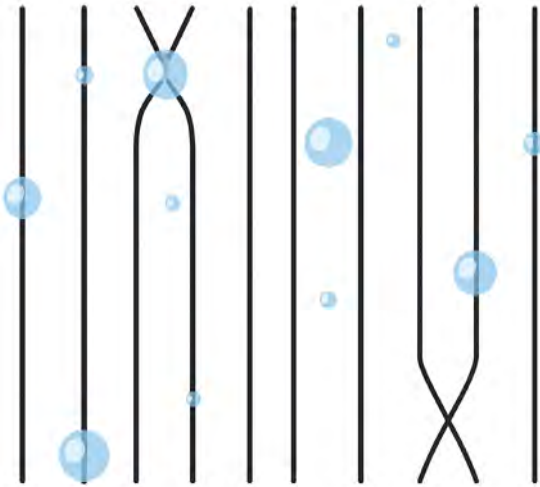


Figura 27. Esquema del comportamiento de gotas sobre fibras verticales con puntos de cruce, mostrando guiado gravitacional y acumulación en zonas de convergencia. Ilustración reinterpretada en base a Kennedy & Boreyko (2024).

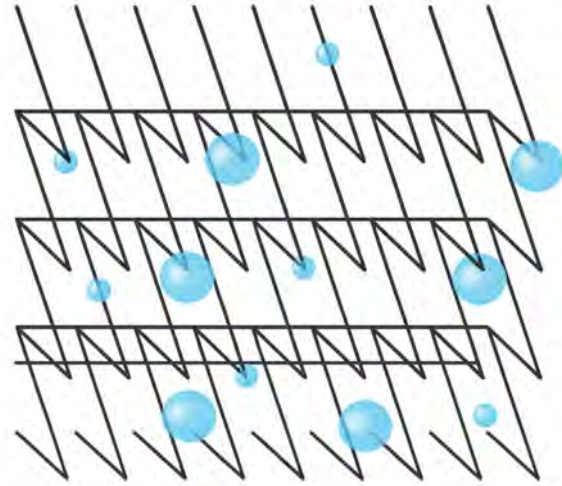


Figura 28. Representación esquemática de una superficie colectora con geometría en zigzag dispuesta en capas, utilizada para inducir desvíos de flujo y favorecer la coalescencia. Ilustración reinterpretada en base a Kennedy & Boreyko (2024).

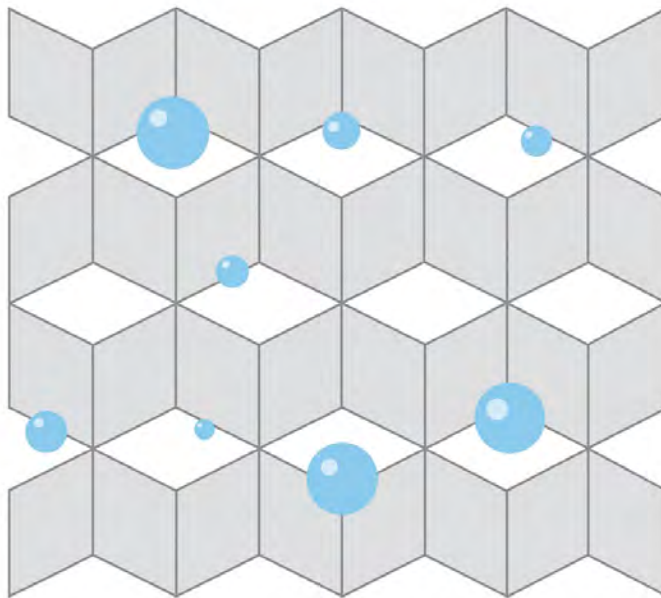
Al reducir o eliminar las fibras horizontales, estos sistemas disminuyen la adhesión de las gotas, favorecen un drenaje continuo y evitan la saturación de la superficie. Además, las geometrías tridimensionales generan vórtices y zonas de recirculación que aumentan el tiempo de contacto entre la niebla y el captador.

Como resultado, distintos estudios reportan incrementos de eficiencia de 3 a 8 veces respecto a las mallas Raschel convencionales y una reducción del volumen necesario para iniciar el drenaje. No obstante, algunas configuraciones aún presentan limitaciones de fabricación y escalabilidad para aplicaciones de gran tamaño (Kennedy y Boreyko, 2024).

5° KIRIGAMI GEOMÉTRICO + AERODINÁMICO

Como evolución de las estrategias basadas en manipulación aerodinámica, investigaciones recientes han explorado el uso de geometrías kirigami, obtenidas mediante cortes en una lámina continua que, al deformarse, generan configuraciones tridimensionales. Este enfoque permite integrar en un mismo elemento una superficie colectora, mecanismos de conducción del agua y una geometría capaz de interactuar con el flujo de aire (Li et al., 2021; Bintein et al., 2023).

A diferencia de las mallas compuestas por fibras independientes, las geometrías kirigami forman superficies continuas que modifican localmente la trayectoria del viento, favoreciendo la formación de vórtices y aumentando el tiempo de permanencia de la niebla sobre la superficie. Simultáneamente, los pliegues, aristas y cambios de curvatura facilitan la coalescencia y el drenaje de las gotas hacia zonas de recolección mediante gradientes de presión superficial (efecto Laplaciano



Estas configuraciones reúnen principios desarrollados en generaciones anteriores, incorporando control aerodinámico, conducción dirigida del agua y superficies continuas obtenidas a partir de una única lámina. Entre las geometrías estudiadas se incluyen patrones sinusoidales, cónicos, radiales y volumétricos, cuya respuesta depende de variables como la apertura, la porosidad y la configuración geométrica (Kennedy y Boreyko, 2024).

Figura 29. Esquema tridimensional de una superficie kirigami tipo celosía, mostrando el comportamiento de gotas sobre relieves 2.5D y zonas de interceptación. Ilustración reinterpretada en base a Kennedy & Boreyko (2024).

4.4 COMPARACIÓN DE EFICIENCIA ENTRE TECNOLOGÍAS PASIVAS DE CAPTACIÓN ATMOSFÉRICA

Tras el desarrollo de configuraciones kirigami para captación de niebla, diversos estudios comenzaron a evaluar experimentalmente su desempeño frente a tecnologías previamente consolidadas. Entre ellos, el trabajo de Bintein et al. (2023) realiza una comparación bajo condiciones de laboratorio controladas, utilizando un mismo flujo de niebla, igual área de exposición y un protocolo experimental común para distintas tecnologías pasivas de captación.

Los autores comparan una malla Raschel, una Fog Harp, una malla de fibras (fiber grid), un textil tridimensional (CloudFisher) y una geometría kirigami. Esta metodología permite evaluar objetivamente la velocidad de captación y la eficiencia alcanzada por cada configuración, eliminando las diferencias propias de los ensayos realizados en condiciones ambientales variables.

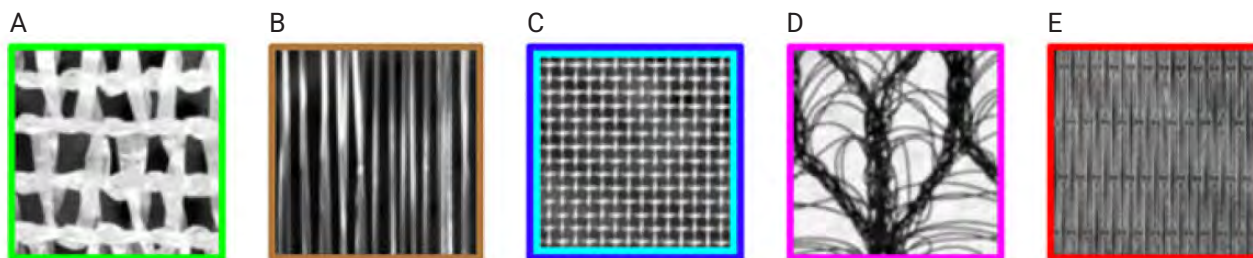
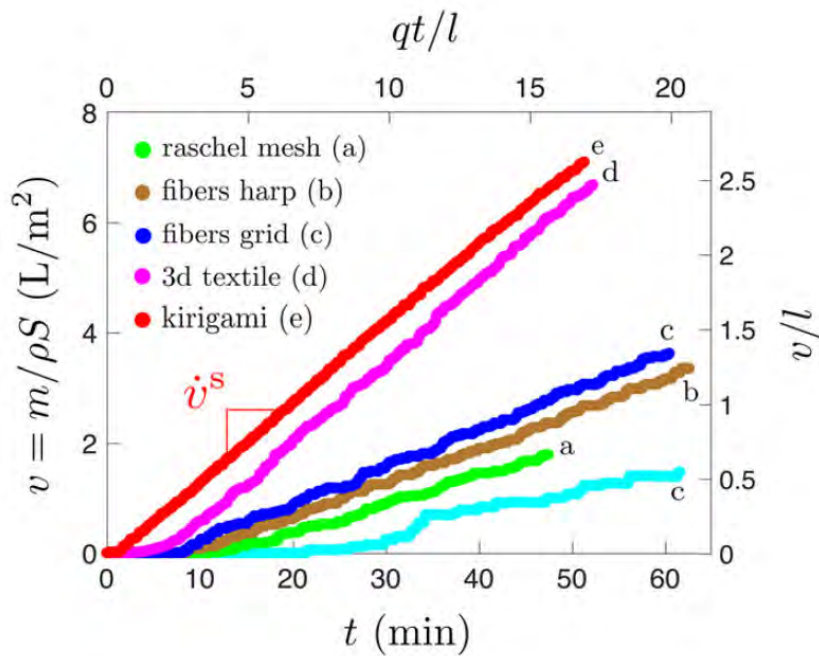


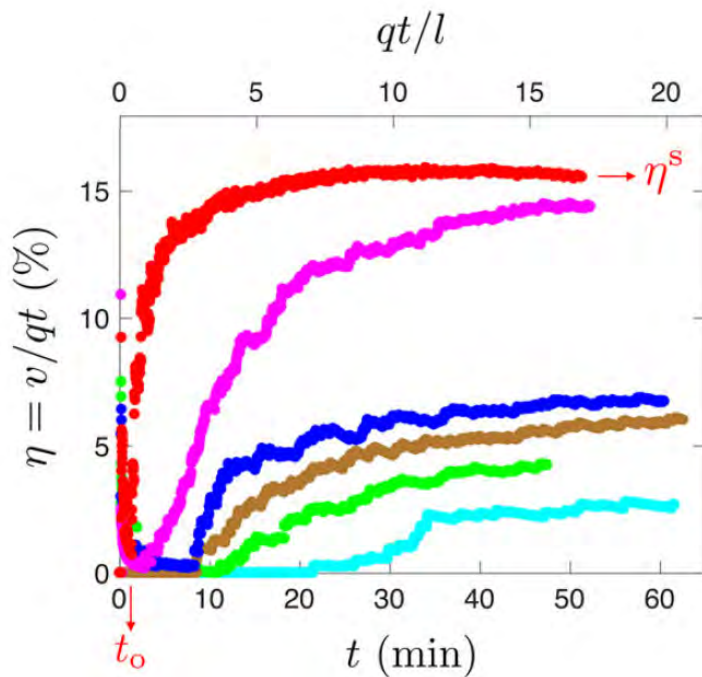
Figura 30. Comparación de las cinco superficies de captación evaluadas experimentalmente: (a) malla Raschel, (b) Fog Harp, (c) rejilla metálica, (d) textil 3D y (e) red kirigami. Fuente: Bintein, P.-B.; Cornu, A.; Weyer, F.; De Coster, N.; Vandewalle, N.; Terwagne, D. Kirigami fog nets: how strips improve water collection.

Los resultados muestran una evolución progresiva del rendimiento entre las distintas generaciones tecnológicas. Las mallas Raschel presentan la menor eficiencia, mientras que las configuraciones que incorporan mejoras en el drenaje y en la interacción con el flujo de aire alcanzan desempeños superiores. Dentro del conjunto analizado, la geometría kirigami obtiene la mayor velocidad de captación, inicia la recolección de agua en un tiempo considerablemente menor y alcanza la mayor eficiencia estacionaria registrada durante el ensayo.



volumen de agua recolectada por unidad de área de malla en función del tiempo

Gráfico 10. Volumen acumulado de agua recolectada por unidad de área de la malla en función del tiempo para diferentes tipos de mallas y tratamientos superficiales, evaluados bajo las mismas condiciones de niebla controlada. Fuente: Bintein, P.-B.; Cornu, A.; Weyer, F.; De Coster, N.; Vandewalle, N.; Terwagne, D. Kirigami fog nets: how strips improve water collection.



Eficiencia dinámica de captación de agua de las mallas a lo largo del tiempo.

Gráfico 11. Eficiencia dinámica de captación (η) en función del tiempo para distintas mallas. Fuente: Bintein, P.-B.; Cornu, A.; Weyer, F.; De Coster, N.; Vandewalle, N.; Terwagne, D. Kirigami fog nets: how strips improve water collection.

4.5 TIPOLOGÍAS DE KIRIGAMI PARA CAPTACIÓN DE NIEBLA

En los últimos años, el kirigami se ha consolidado como una de las estrategias más prometedoras para la captación pasiva de agua atmosférica, debido a su capacidad para transformar una lámina plana en geometrías tridimensionales mediante cortes y deformaciones controladas. Estas configuraciones modifican simultáneamente la interacción entre la niebla, el flujo de aire y el drenaje del agua, incorporando mecanismos aerodinámicos y de conducción que superan las prestaciones de las mallas convencionales (Li et al., 2021).

La literatura reciente muestra una amplia variedad de configuraciones kirigami desarrolladas con distintos objetivos funcionales. Junto a ellas, algunos estudios incorporan geometrías origami que, aunque no emplean cortes, presentan principios aerodinámicos y de conducción del agua comparables, por lo que constituyen referentes útiles para comprender la evolución de estas superficies plegadas.

La figura 31 presenta las tipologías consideradas en esta revisión bibliográfica. En los apartados siguientes cada configuración se analiza individualmente, considerando su geometría, materialidad, proceso de fabricación y antecedentes de desempeño, con el fin de establecer una base comparativa para la selección de la configuración más pertinente para esta investigación.

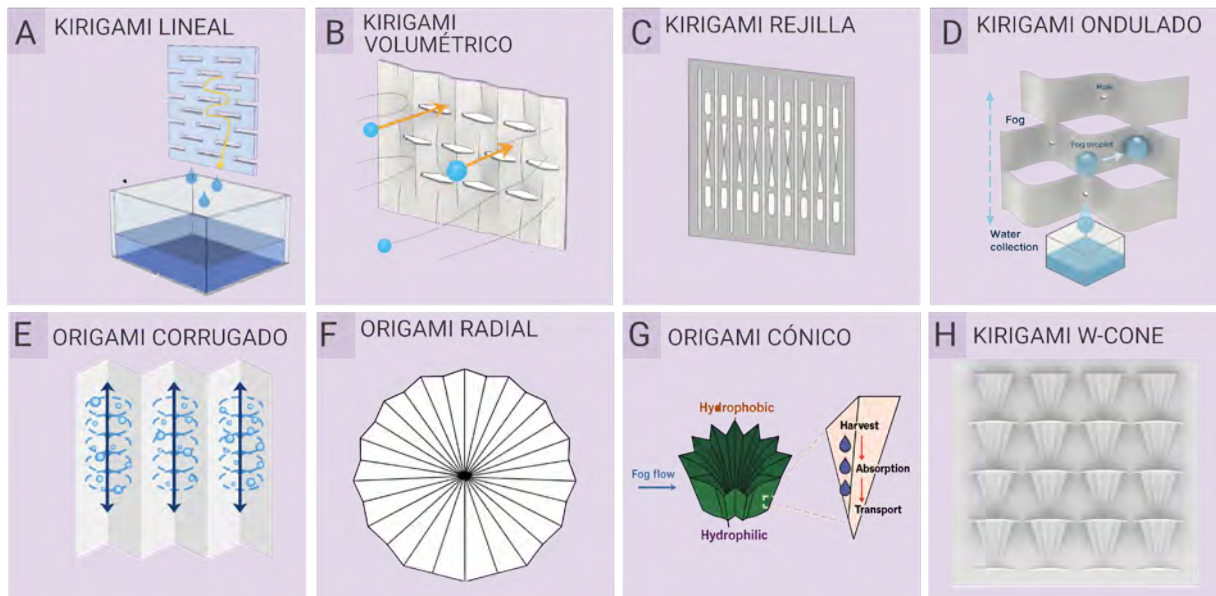


Fig. 31. Tipos de estructuras kirigami/origami estudiadas. Fuente: Elaboración propia 2025

KIRIGAMI LINEAL

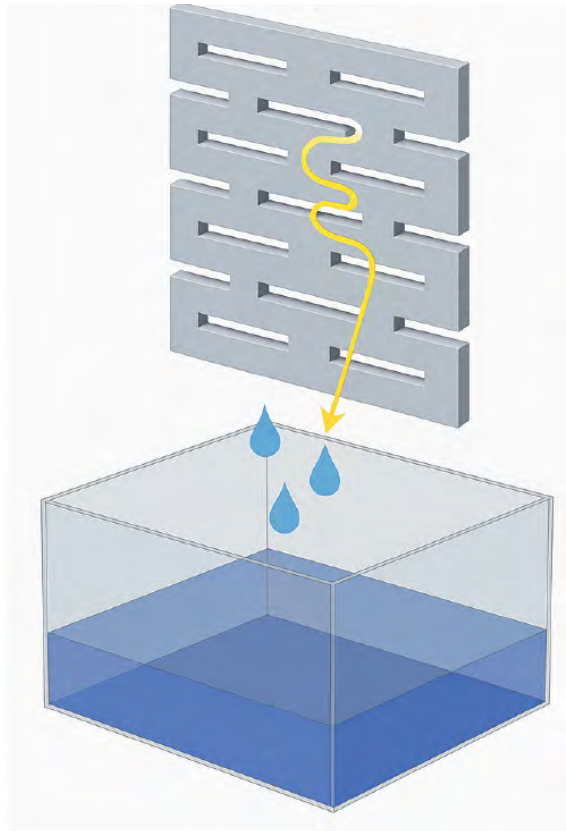


Fig 32. Elaboración propia en base a Yu, E. (2017). Estudio sobre fabricaciones de nanoestructuras jerárquicas y su aplicación.

El kirigami lineal corresponde a una de las primeras aplicaciones de patrones de corte para captación de niebla. Su funcionamiento se basa en la deformación controlada de una lámina mediante estiramiento, generando aberturas que incrementan la superficie expuesta y favorecen el drenaje gravitacional del agua (Yu, 2017).

MATERIALIDAD

ALUMINIO
0.024 mm

VARIABLES
GEOMÉTRICAS

ALTURA (h) Y LARGO DEL
CORTE (l)

VARIABLE DE
DEFORMACIÓN

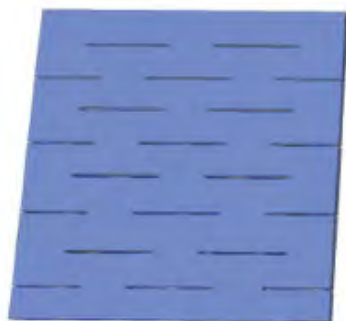
Estiramiento aplicado
(0–50%)

FABRICACIÓN

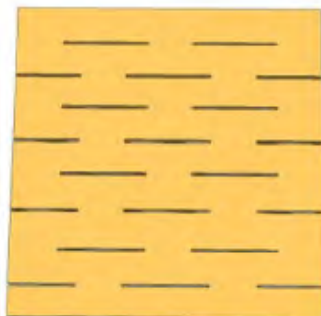


Los ensayos muestran que el rendimiento depende directamente del grado de deformación aplicado. La mayor captación se obtiene con un strain cercano al 30 %, condición en la que aumenta la superficie efectiva sin comprometer el drenaje.

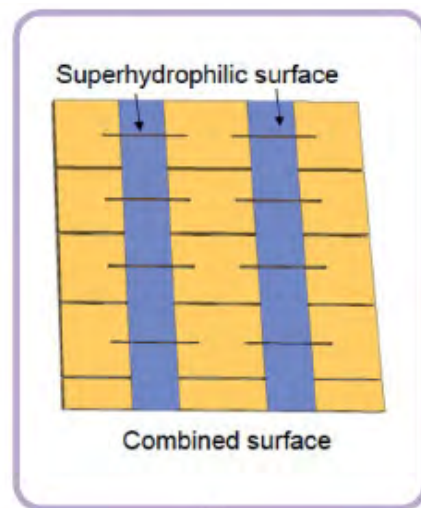
El estudio también demuestra que la incorporación de superficies con distinta mojabilidad (hidrofílicas e hidrofóbicas) mejora simultáneamente la intercepción de microgotas y el escurrimiento hacia el colector



Superhydrophilic surface



Superhydrophobic surface



Combined surface

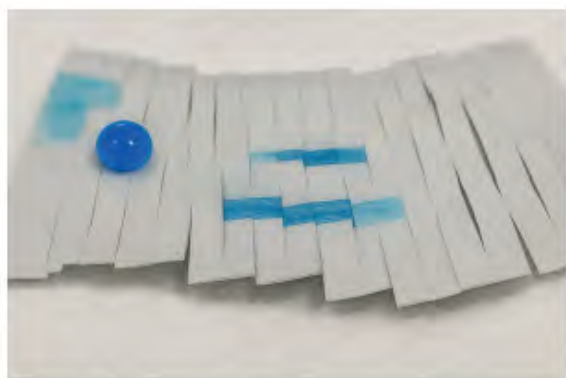
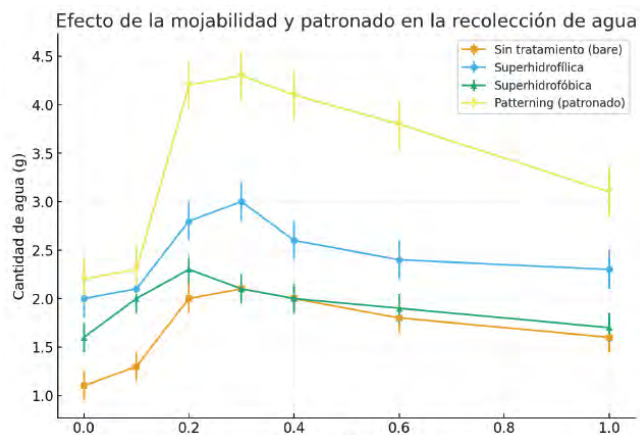


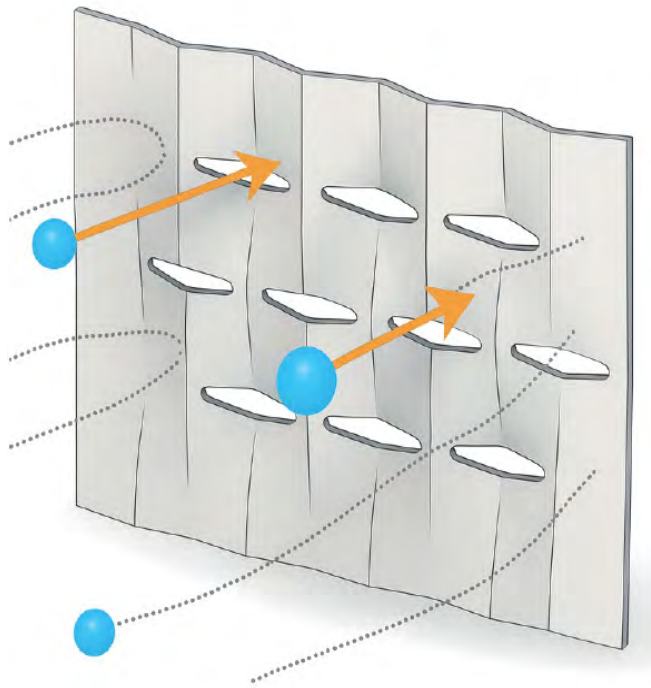
Fig. 33. Fuente: Yu, E. (2017). Estudio sobre fabricaciones de nanoestructuras jerárquicas y su aplicación.



El estudio también demuestra que la incorporación de superficies con distinta mojabilidad (hidrofílicas e hidrofóbicas) mejora simultáneamente la intercepción de microgotas y el escurrimiento hacia el colector

Gráfico 12 . Fuente: Yu, E. (2017). Estudio sobre fabricaciones de nanoestructuras jerárquicas y su aplicación.

KIRIGAMI VOLUMÉTRICO



MATERIALIDAD

PET, papel, polímeros planos

VARIABLES
GEOMÉTRICAS

Tipo de módulo: cubo o pirámide
Altura del módulo: 9–10 mm
Ángulo de plegado: 90°, 120°, 150°
Abertura frontal del kirigami

FABRICACIÓN

Corte + plegado
(mountain/valley folds)

Fig. 34. Fuente: Elaboración propia en base a: Li, J. (2021). Aerodynamics-assisted, efficient and scalable kirigami fog collectors.

A diferencia de las configuraciones lineales, el kirigami volumétrico incorpora una tercera dimensión mediante cortes y pliegues, generando módulos tridimensionales que modifican simultáneamente la interacción entre el flujo de aire, la interceptación de microgotas y el drenaje del agua. El estudio de Li et al. (2021) demuestra que el desempeño depende principalmente de la geometría generada, siendo variables como el tipo de módulo, el ángulo de plegado, la apertura frontal y la altura efectiva las que determinan el comportamiento aerodinámico del sistema.

Los resultados muestran que la combinación de aerodinámica asistida, superficies tridimensionales y trayectorias de drenaje definidas permite incrementar significativamente la captación respecto a las mallas convencionales. En particular, las configuraciones piramidales favorecen la formación de vórtices locales, aumentan el tiempo de residencia de la niebla sobre la superficie y conducen el agua condensada hacia zonas de recolección de manera continua, alcanzando los mayores niveles de eficiencia entre las geometrías evaluadas (Li et al., 2021).

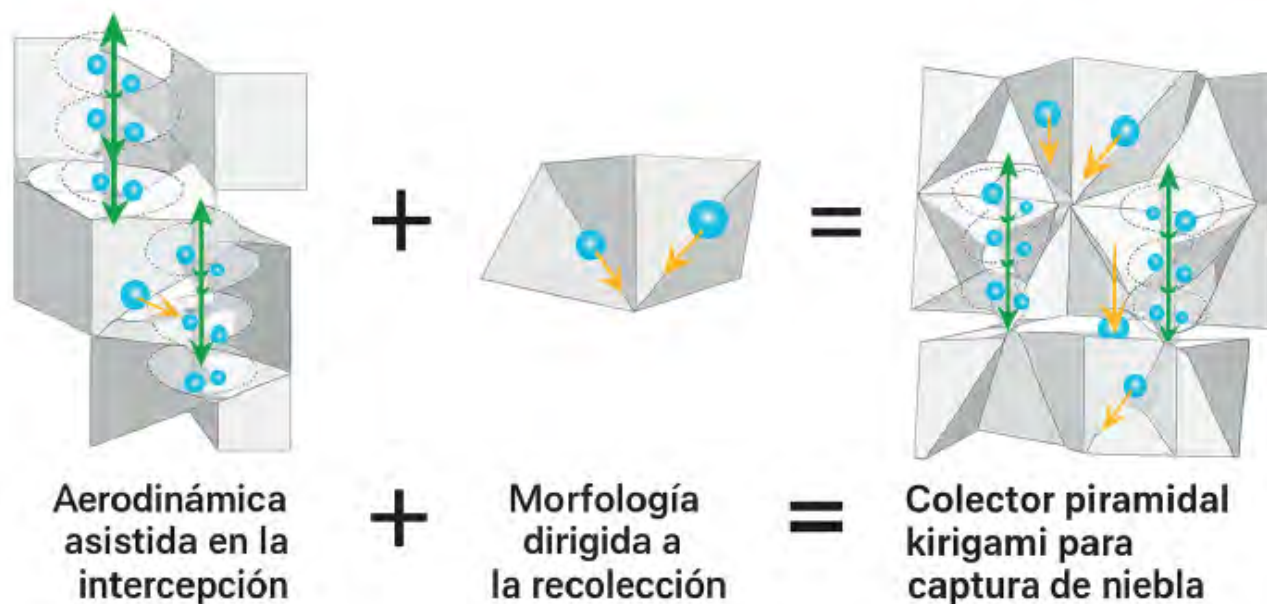
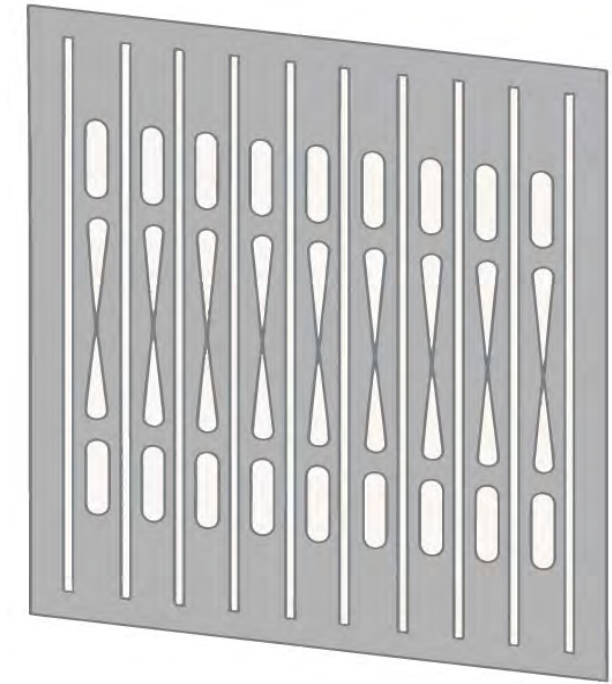


Fig. 35. Geometría kirigami piramidal. Fuente: Li, J. (2021). Aerodynamics-assisted, efficient and scalable kirigami fog collectors.

KIRIGAMI REJILLA



MATERIALIDAD

Polipropileno 60 μm

VARIABLES
GEOMÉTRICAS

Ancho de tira (w): 0.55 mm

Solidity (s): fracción sólida
~60–80%

Separación entre tiras

FABRICACIÓN

Corte láser: patrón
vertical repetitivo.

Fig. 36. Fuente: Elaboración propia en base a: Bintein, P. B. (2023). Kirigami fog nets: How strips improve water collection.

A diferencia de otras configuraciones kirigami que buscan aumentar la captación mediante perturbaciones aerodinámicas, el kirigami tipo rejilla (Kirigami Net) optimiza la continuidad del agua sobre la superficie. El patrón de tiras verticales favorece la formación de una película líquida estable (water film), capaz de conectar rápidamente las microgotas captadas y conducir las por gravedad hacia el sistema de recolección.

Los autores demuestran que el desempeño depende principalmente de la geometría del patrón, especialmente del ancho de las tiras, la separación entre ellas y la fracción sólida (solidity). Estas variables determinan la estabilidad de la película de agua y el equilibrio entre permeabilidad al viento y continuidad del drenaje. Los mejores resultados se obtienen con separaciones cercanas a 5–6 mm y una fracción sólida entre 40 y 60 %, condiciones que maximizan la captación sin comprometer el flujo de aire (Bintein et al., 2023).

Secuencia temporal de formación de la película de agua sobre una malla Kirigami Net. La geometría favorece la conexión entre microgotas, formando un film continuo que acelera el drenaje gravitacional

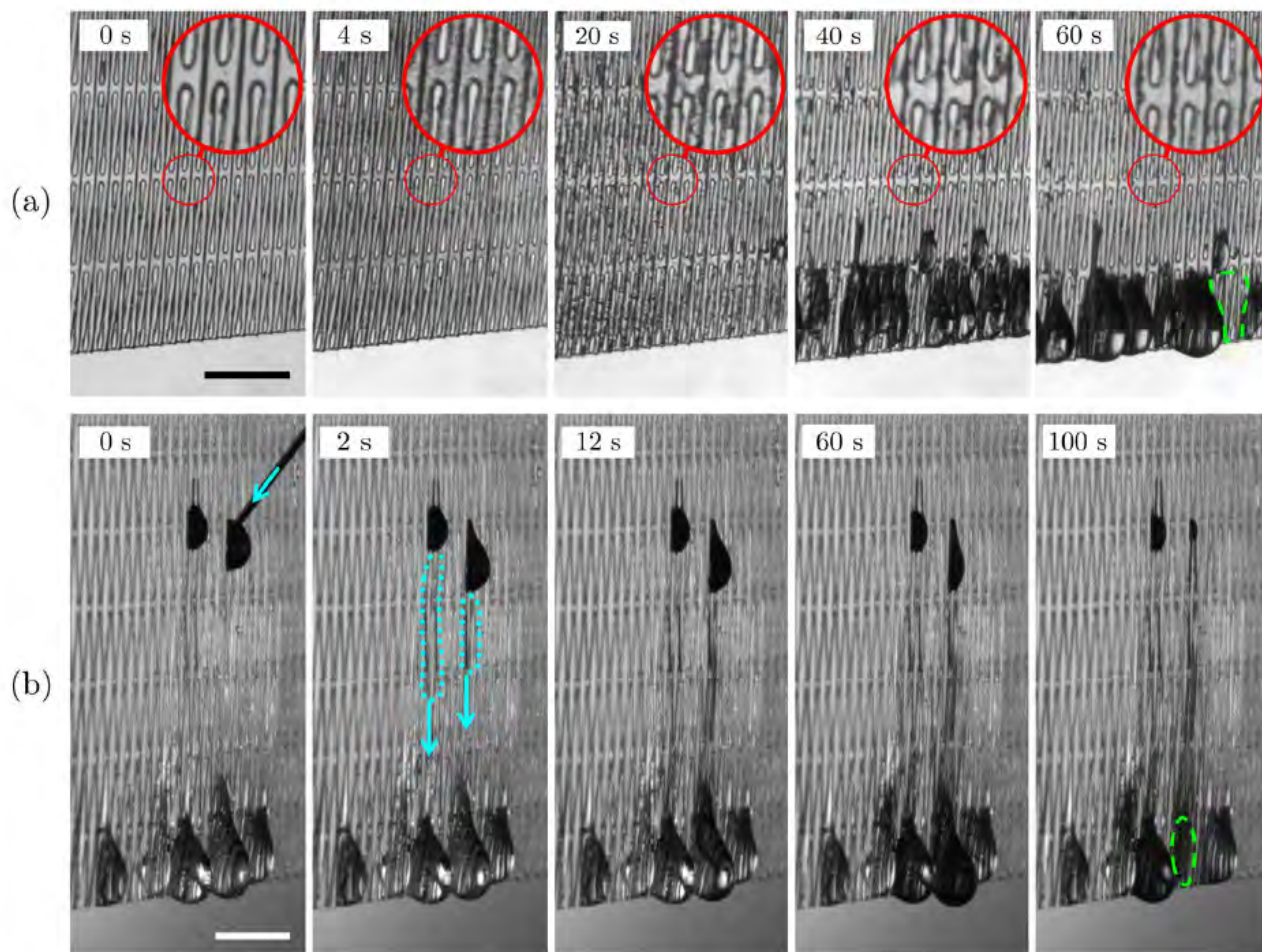
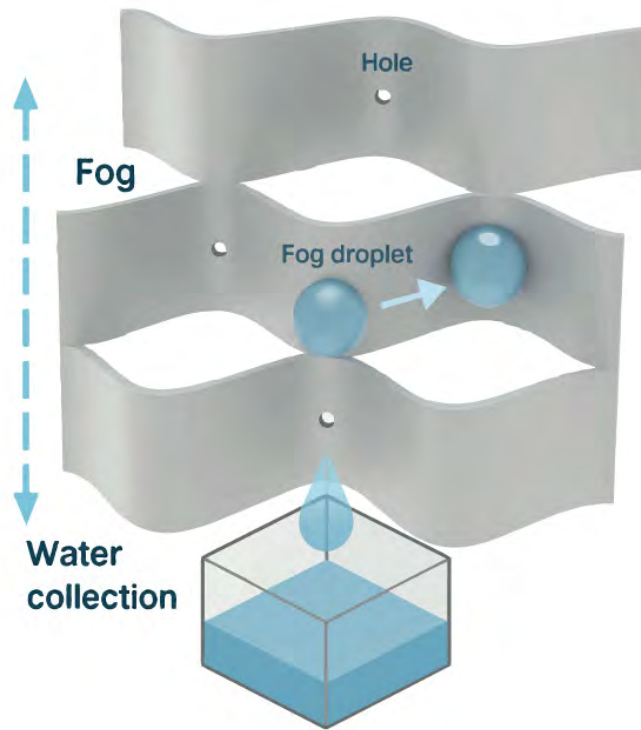


Fig. 37. Visualización de la repartición del agua en una malla kirigami bajo flujo de niebla, mostrando la coalescencia, formación de película continua y drenaje gravitacional en diferentes tiempos de exposición (0–100 s). La figura compara el comportamiento en malla seca y humedecida, evidenciando la rápida formación de una película estable y su rol en la captura continua de microgotas. Fuente: Bintein, P. B. (2023). Kirigami fog nets: How strips improve water collection.

KIRIGAMI ONDULADO 3D

El kirigami ondulado 3D se basa en un patrón de cortes desfasados que, al ser sometido a estiramiento, transforma una lámina plana en una superficie ondulada con relieves cóncavos y convexos. Esta deformación modifica el flujo del aire alrededor de la superficie, favoreciendo la formación de vórtices locales que incrementan la probabilidad de impacto entre las microgotas y la estructura colectora



MATERIALIDAD

Acero inoxidable 304 – 15 μm

VARIABLES GEOMÉTRICAS

Longitud de muestra: 40, 42, 44, 46 mm

Gap (espaciado): 0–6 mm

Curvatura convexo–cóncavo

Versión rotacional: hexágonos, octágonos

FABRICACIÓN

Fabricación

Corte (slits desfasados)

Estiramiento (load-responsive)

Fig. 38. Fuente: Elaboración propia en base a: Li, S. (2023). Load-responsive bionic kirigami structures.

El estudio evalúa distintas configuraciones variando la longitud del patrón, el espaciado entre aberturas y la geometría de la unidad (cuadrada, hexagonal y octagonal). Los resultados muestran que estas variables controlan directamente la estabilidad de la deformación tridimensional y, en consecuencia, el comportamiento aerodinámico del sistema.

Las configuraciones con longitudes cercanas a 46 mm y espaciamientos intermedios de aproximadamente 6–8 mm presentan el mejor equilibrio entre intercepción, coalescencia y drenaje del agua condensada. Asimismo, los autores demuestran que las geometrías poligonales, particularmente las configuraciones hexagonales y octagonales, desarrollan deformaciones tridimensionales más estables durante el estiramiento, manteniendo un rendimiento superior frente a configuraciones más simples. Este comportamiento evidencia que la eficiencia no depende únicamente del patrón de corte, sino también de la forma tridimensional que adquiere la superficie durante su funcionamiento (Li et al., 2023).



Fig. 39. Fuente: Li, S. (2023). Load-responsive bionic kirigami structures.

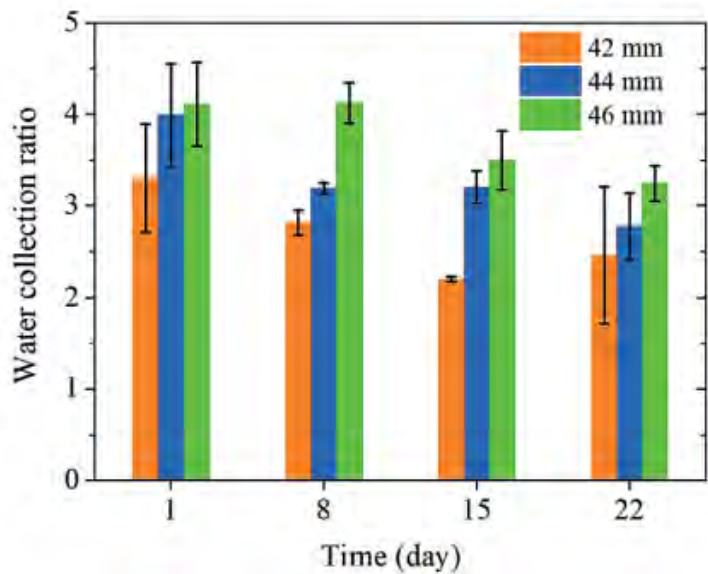


Gráfico 13. Fuente: Li, S. (2023). Load-responsive bionic kirigami structures.

ORIGAMI CORRUGADO

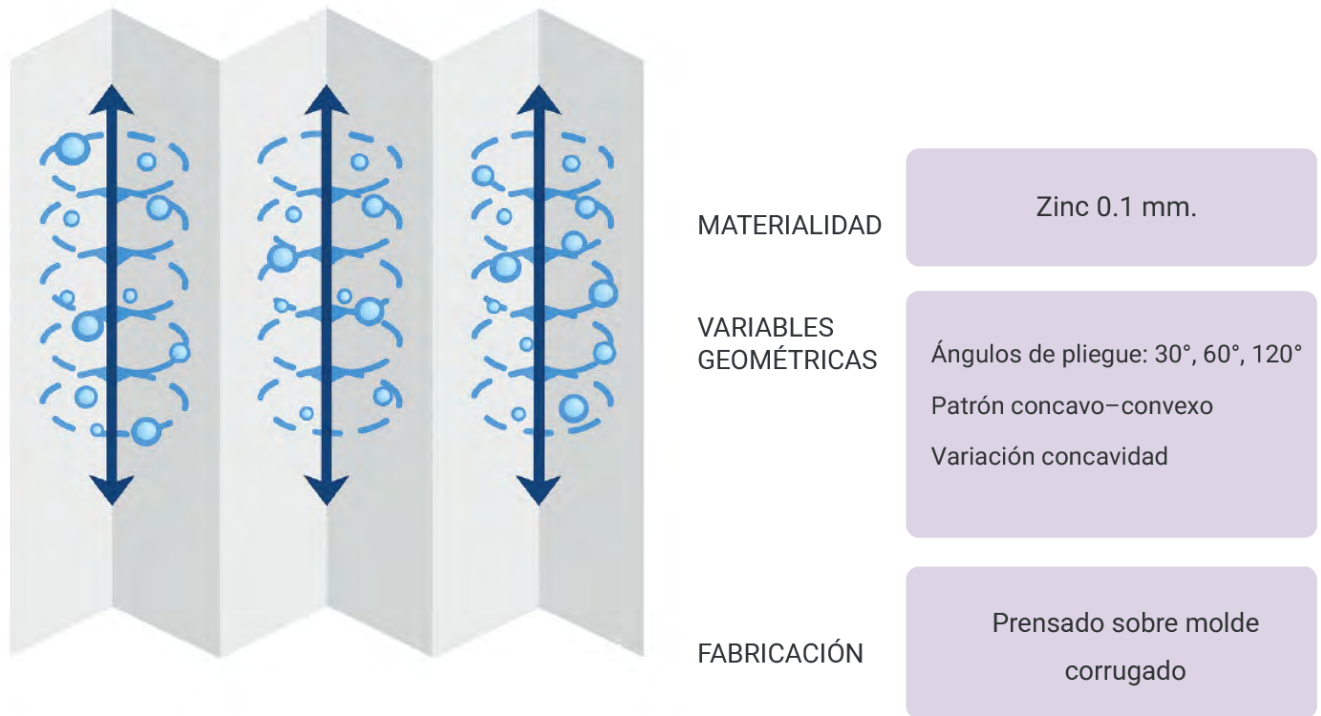


Fig. 40. Fuente: Elaboración propia en base a: Peng, Z., Fu, Y., & Guo, Z. (2023). Origami-like 3D fog water harvester with hybrid wettability for efficient fog harvesting. ACS Applied Materials & Interfaces

La geometría corrugada utiliza una secuencia repetitiva de pliegues cóncavos y convexos que modifica el flujo del aire al atravesar la superficie colectora. A diferencia de las mallas planas, esta configuración genera zonas de recirculación y vórtices locales dentro de cada canal, aumentando el tiempo de interacción entre las microgotas y la superficie de captación

El estudio evalúa distintas configuraciones variando el ángulo de plegado y la geometría de la sección corrugada. Los resultados muestran que la eficiencia depende directamente de la forma del canal generado por los pliegues, siendo las configuraciones con una secuencia cóncavo-convexo-cóncavo y un ángulo cercano a 60° las que presentan el mejor desempeño.

Esta geometría favorece simultáneamente la interceptación de microgotas, la coalescencia y el drenaje continuo del agua.

Los autores reportan que esta configuración alcanza un incremento de 418 % en la captación respecto a una lámina plana de zinc bajo las mismas condiciones experimentales. El aumento del rendimiento se atribuye a la combinación entre la manipulación aerodinámica del flujo y la conducción eficiente del agua mediante la geometría corrugada, más que a cambios en la materialidad de la superficie (Peng et al., 2023).

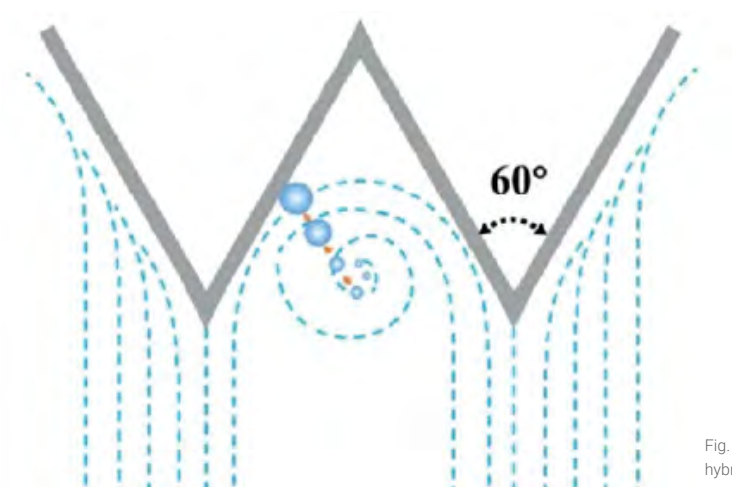


Fig. 41. Fuente: Peng, Z., Fu, Y., & Guo, Z. (2023). Origami-like 3D fog water harvester with hybrid wettability for efficient fog harvesting. ACS Applied Materials & Interfaces

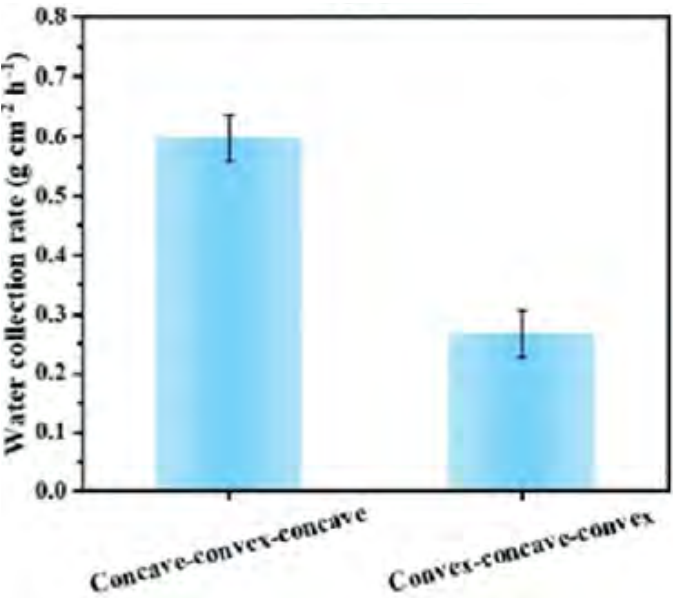
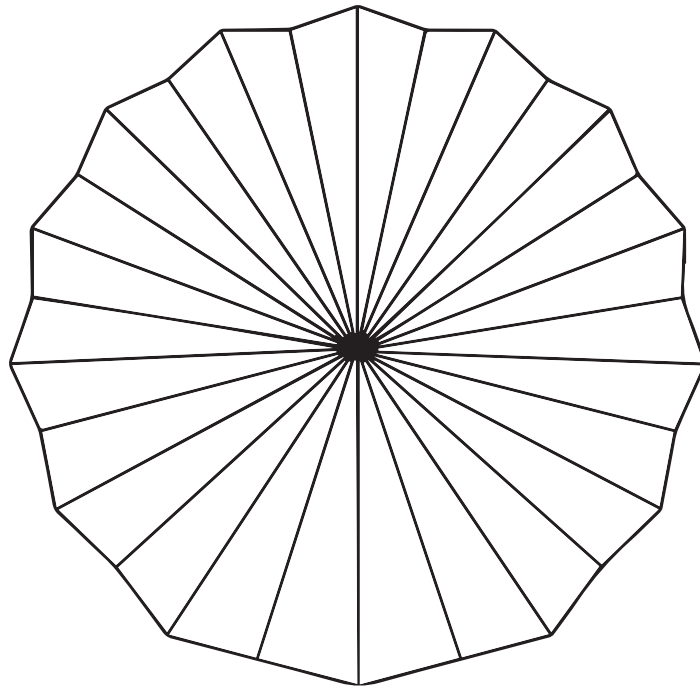


Gráfico 14. Fuente: Peng, Z., Fu, Y., & Guo, Z. (2023). Origami-like 3D fog water harvester with hybrid wettability for efficient fog harvesting. ACS Applied Materials & Interfaces

ORIGAMI RADIAL (FAN)



MATERIALIDAD

Acero inoxidable 304

VARIABLES
GEOMÉTRICAS

Geometría del FAN: Sistema radial 360°

Perforaciones ("hollows"):

redondas

rectangulares

dentadas (ganadoras)

Longitud del pliegue (crease length):

3.5, 4.0, 4.5 mm (óptimo)

FABRICACIÓN

Plegado origami tipo embudo

Fig. 42. Fuente: Elaboración propia en base a: Zhang, R., Li, Y., Wu, K., & Zhao, Q. (2024). Efficient fog-harvesting origami fan. Manuscrito no publicado.

El sistema FAN corresponde a una geometría kirigami radial formada por pliegues en "V" distribuidos en 360°, los cuales transforman una lámina plana en una estructura tridimensional con canales convergentes. Esta configuración dirige simultáneamente el flujo de aire y el escurrimiento del agua hacia un punto central, reduciendo la distancia de transporte de las gotas y favoreciendo un drenaje continuo

Los autores evaluaron el efecto del ángulo de apertura, la longitud del pliegue (crease length) y la geometría de las perforaciones (hollows) sobre el desempeño del sistema. Los resultados muestran que la eficiencia aumenta progresivamente con la apertura del patrón, alcanzando valores cercanos a 5,75 veces los de una superficie plana.

Asimismo, las perforaciones dentadas favorecen la nucleación de microgotas y la generación de vórtices locales, mientras que longitudes de pliegue entre 3,5 y 4,5 mm optimizan el transporte del agua sin comprometer la estabilidad estructural (Zhang et al., 2024).



Fig. 43. Fuente: Elaboración propia en base a: Zhang, R., Li, Y., Wu, K., & Zhao, Q. (2024). Efficient fog-harvesting origami fan. Manuscrito no publicado.

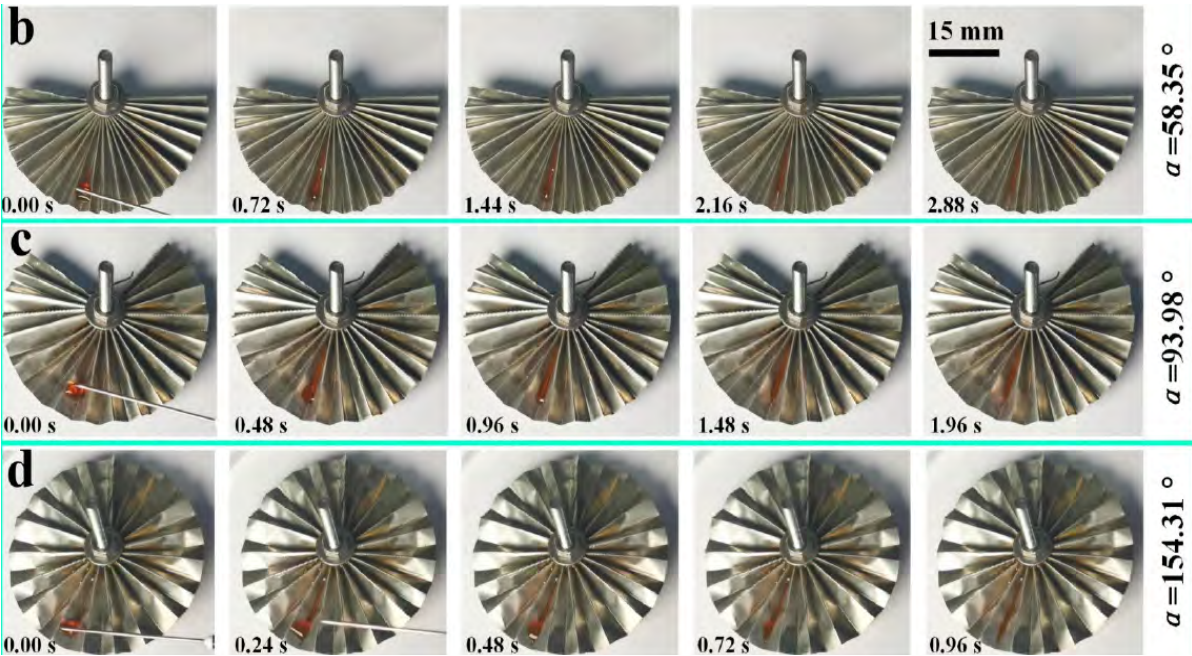


Fig. 44. Fuente: Elaboración propia en base a: Zhang, R., Li, Y., Wu, K., & Zhao, Q. (2024). Efficient fog-harvesting origami fan. Manuscrito no publicado.

La apertura progresiva del patrón radial modifica la pendiente de los canales en "V" y la velocidad de transporte de las gotas. A medida que aumenta el ángulo de apertura, el agua es conducida más rápidamente hacia el centro del colector, reduciendo los tiempos de drenaje y mejorando la continuidad del proceso

ORIGAMI CÓNICO

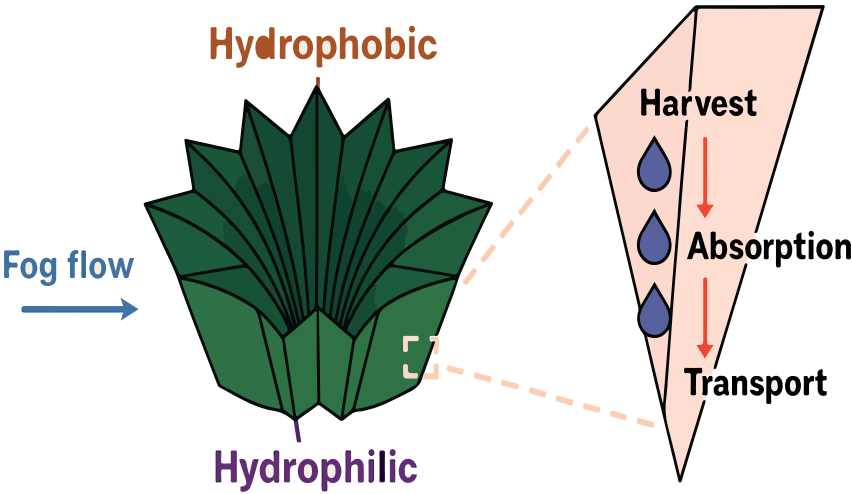


Fig. 45. Fuente: Elaboración propia en base a: Wang, Q., Chen, X., Liu, Y., & Zhang, Z. (2025). An efficient fog-collection origami Janus membrane for rapid directional water transport and omnidirectional fog harvesting

MATERIALIDAD	Acero inoxidable (lámina delgada)
VARIABLES GEOMÉTRICAS	Ángulo de apertura: 30°, 45°, 60°, 75°, 90° Número de "scallops": 8, 12, 16, 20 (óptimo) Longitud del canal Diámetro de entrada vs salida Profundidad / altura del embudo Relación entrada/salida del canal V-shaped
FABRICACIÓN	Plegado origami tipo embudo (no cortes) Generación de canales V-shaped mediante plegado

La geometría cónica tipo trompeta transforma una malla metálica en una estructura tridimensional formada por canales convergentes en "V", combinados con una configuración Janus, donde la cara exterior es hidrofóbica y el interior superhidrofílico. Esta disposición permite que las microgotas sean interceptadas en la superficie externa y, una vez alcanzan el gradiente de mojabilidad, atraviesen rápidamente la membrana hacia el interior, donde son conducidas de manera direccional hasta el punto de recolección.

A diferencia de los colectores Janus convencionales, cuya eficiencia depende de la orientación frente al flujo de niebla, la configuración tridimensional mantiene siempre una superficie hidrofóbica expuesta al ambiente. Los canales convergentes en "V" favorecen un transporte capilar rápido y continuo, evitando la acumulación de agua sobre la superficie y regenerando constantemente zonas activas para la condensación. Como resultado, el sistema alcanza eficiencias de $0,83 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, aproximadamente tres veces superiores a la muestra plana utilizada como referencia. El estudio demuestra que la combinación entre geometría espacial, gradiente de mojabilidad y transporte capilar constituye una estrategia altamente eficiente para la captación omnidireccional de agua atmosférica.

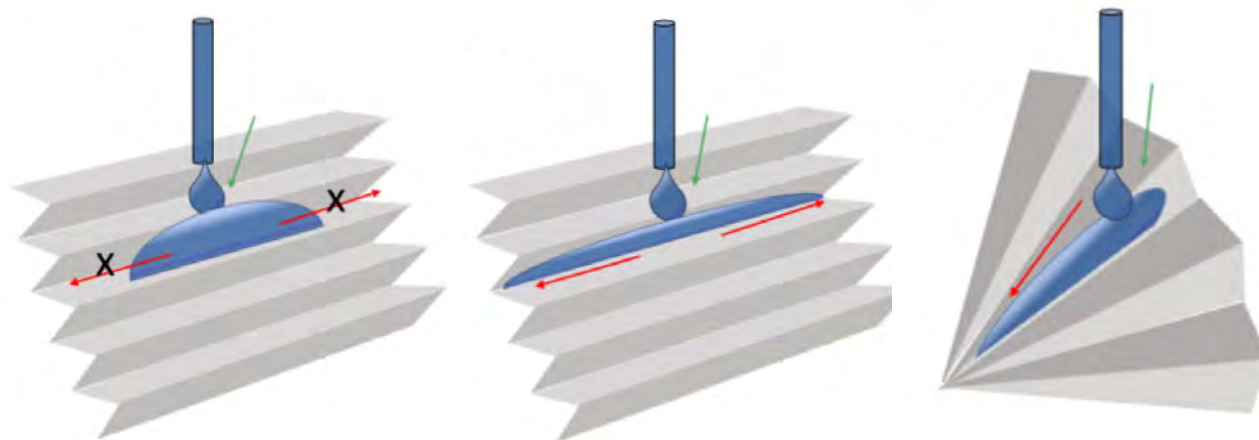


Fig. 46. Fuente: Wang, Q., Chen, X., Liu, Y., & Zhang, Z. (2025). An efficient fog-collection origami Janus membrane for rapid directional water transport and omnidirectional fog harvesting

Comparación del transporte de gotas en distintas geometrías de canal. Los canales paralelos permiten una dispersión bidireccional del agua, mientras que los canales convergentes en "V" generan un gradiente de presión capilar que dirige el líquido hacia un único punto de salida. Esta configuración reduce la retención de agua y acelera el drenaje, favoreciendo un proceso continuo de captación.

KIRIGAMI W-CONE

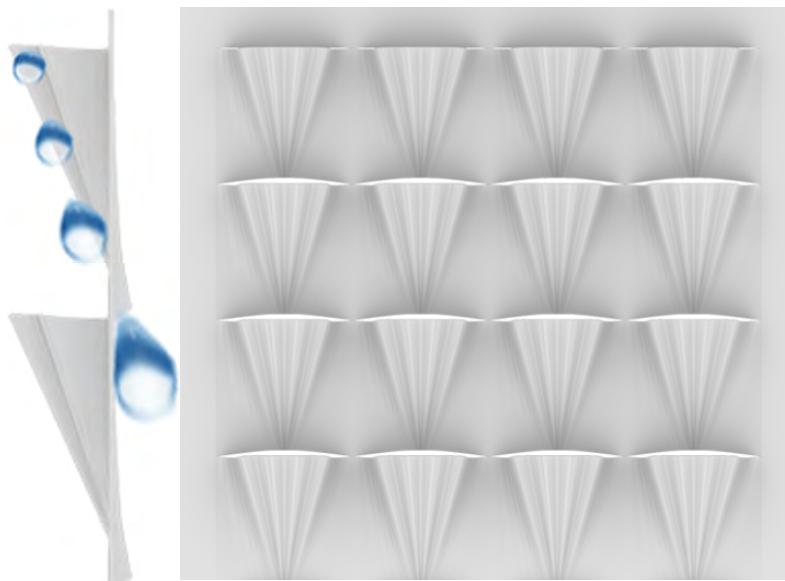


Fig. 47. Fuente: Elaboración propia en base a: Wang, X., Wang, Y., Zhang, T., Gao, X., & Zhang, Y. (2023). Efficient water mist collector with both a kirigami structure and chemical modification. Manuscrito no publicado.

MATERIALIDAD	Zinc (Zn) 0.1 mm
VARIABLES GEOMÉTRICAS	Parámetros geométricos: Largo del corte: 1.2 cm Separación horizontal: 0.6 cm Separación vertical: 1.4 cm Altura de la onda Amplitud del patrón Angulación entre las crestas Distribución de las elevaciones
FABRICACIÓN	Corte láser para slits rectangulares

El kirigami W-cone consiste en una lámina de zinc cortada mediante un patrón kirigami y posteriormente conformada en cavidades tridimensionales con geometría cónica. La superficie incorpora una modificación química Janus, con una cara superhidrofílica destinada a la nucleación de gotas y otra superhidrofóbica que facilita su desprendimiento. Esta combinación permite integrar la captación, el crecimiento y el transporte direccional del agua en una única estructura tridimensional.

Los ensayos comparativos demostraron que la geometría W-cone alcanzó la mayor eficiencia de captación del estudio (3,54 g·h⁻¹·cm⁻²), superando al kirigami sinusoidal (3,04 g·h⁻¹·cm⁻²) y al triangular (3,17 g·h⁻¹·cm⁻²).

Su rendimiento equivale a aproximadamente 1,82 veces el obtenido por la lámina de zinc sin modificar, confirmando que la incorporación de geometrías tridimensionales mejora significativamente el desempeño del colector.

El análisis del comportamiento del flujo indica que el mejor desempeño del W-cone se debe a la interacción de varios mecanismos. La mayor superficie efectiva aumenta el área de contacto sólido-líquido, mientras que la deformación de la lámina favorece la nucleación de gotas en las zonas elevadas. A medida que estas crecen, convergen hacia el eje del cono y son transportadas hasta la cara superhidrofóbica, donde se desprenden rápidamente, liberando nuevamente la superficie para continuar el proceso de captación.

Además, la cavidad del cono genera un vórtice interno que incrementa la retención de microgotas y las dirige hacia la superficie superhidrofílica. Este fenómeno aerodinámico, junto con el transporte direccional y el rápido drenaje de las gotas, constituye el principal mecanismo responsable de la mayor eficiencia observada en esta configuración.

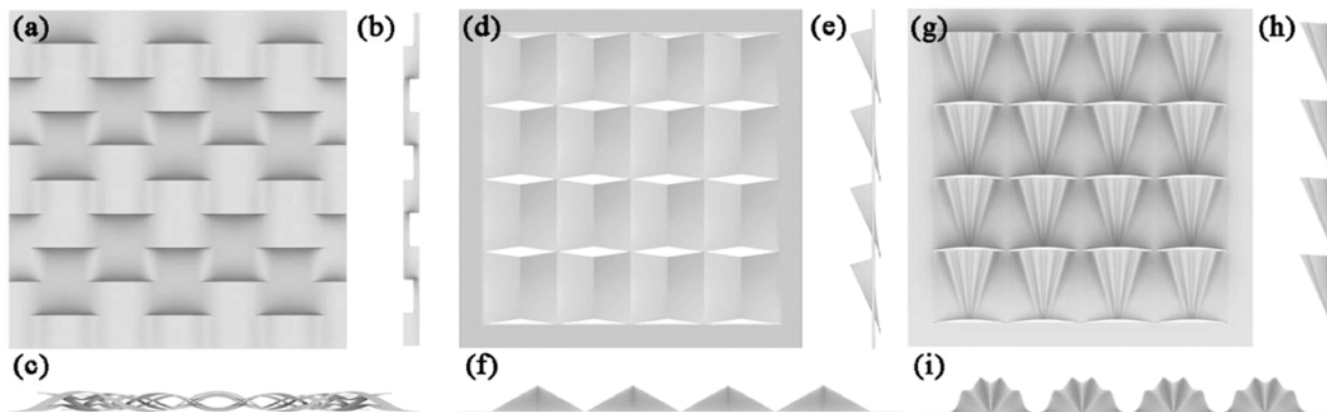


Fig. 48. Fuente: Wang, X., Wang, Y., Zhang, T., Gao, X., & Zhang, Y. (2023). Efficient water mist collector with both a kirigami structure and chemical modification. Manuscrito no publicado.

El estudio compara tres configuraciones tridimensionales obtenidas a partir del mismo patrón kirigami: sinusoidal, triangular y W-cone. A medida que aumenta la complejidad geométrica, también se incrementan la profundidad de las cavidades y la capacidad de controlar el flujo del aire y el transporte de las gotas. La geometría W-cone desarrolla cavidades cónicas capaces de generar vórtices internos, favoreciendo la retención de microgotas, la coalescencia y el drenaje continuo, lo que explica el mejor desempeño experimental entre las configuraciones evaluadas.

CONCLUSIÓN TIPOLOGÍAS KIRIGAMI

Tipología	Descripción geométrica	Comportamiento / Mecanismo	Ventajas	Limitaciones
A. Kirigami lineal	Cortes paralelos 1D	Captura y drenaje lineal	Simple, barato, fácil de fabricar	Poco 3D, eficiencia moderada
B. Kirigami volumétrico	Cavidades cúbicas o piramidales	Genera vórtices locales	Alta eficiencia aerodinámica	Complejidad de plegado
C. Kirigami rejilla (NET)	Tiras continuas	Película continua de agua	Excelente para niebla débil	No controla dirección del flujo
D. Kirigami ondulado	Ondas suaves o modulación baja	Curvatura favorece coalescencia	Fabricación simple	Transporte poco controlado
E. Origami corrugado	Relieves marcados tipo acordeón	Vórtices tubulares	+418% eficiencia (Peng 2023)	Integración arquitectónica más compleja
F. Origami radial (FAN)	Pliegues 360° en V	Transporte unidireccional acelerado	5.75× eficiencia (Zhang 2024)	Requiere moldeado radial
G. Origami cónico	Geometría tipo trompeta	Captura omnidireccional	Transporte en 0.333 s	Química Janus avanzada
H. Kirigami W-cone	Conos embudo repetidos	Vórtices internos estables	3.54 g/h/cm² (mejor del grupo)	Fabricación con molde

Tabla 4. comparación tipologías de kirigami. Fuente: Elaboración propia 2025

El análisis comparado de las tipologías kirigami y origami evidencia que la eficiencia de captación no depende únicamente del material o de tratamientos superficiales, sino principalmente de la configuración geométrica y de su interacción con el flujo de aire. A medida que las geometrías evolucionan desde patrones lineales hacia configuraciones tridimensionales, incorporan mecanismos progresivamente más complejos de manipulación aerodinámica, coalescencia y conducción del agua.

Las distintas investigaciones muestran que cada tipología optimiza un aspecto específico del proceso de captación. Mientras las geometrías lineales y tipo NET destacan por favorecer la formación de películas continuas de agua, las configuraciones onduladas, corrugadas, radiales y cónicas incrementan la eficiencia mediante la generación de vórtices, el aumento del tiempo de residencia de la niebla y el transporte direccional de las gotas. En conjunto, estas estrategias demuestran que el rendimiento mejora cuando la geometría integra simultáneamente mecanismos de intercepción, conducción y drenaje.

MATERIALES

La revisión bibliográfica muestra además una tendencia común en cuanto a materialidad. Aunque las primeras investigaciones utilizaron polímeros y películas flexibles para facilitar la fabricación experimental, los estudios más recientes migran progresivamente hacia láminas

metálicas delgadas, principalmente aluminio, acero inoxidable y zinc, debido a su estabilidad dimensional, precisión de manufactura y mayor potencial de escalamiento constructivo. Esta evolución resulta especialmente pertinente para aplicaciones arquitectónicas, donde la durabilidad y la factibilidad de fabricación constituyen criterios tan relevantes como la eficiencia de captación.

Código	Tipología	Material según estudios / literatura	Observaciones técnicas
A	Kirigami lineal	Hojas metálicas delgadas (acero, aluminio) o polímeros flexibles	Es el tipo más básico; se usa mucho en pruebas iniciales y en kirigami 1D. Compatible con corte láser.
B	Kirigami volumétrico	Hojas metálicas (aluminio), acero delgado, o films poliméricos	Los aerodinámicos 3D suelen hacerse en metal por estabilidad. Adecuado para impresiones 3D conceptuales.
C	Kirigami rejilla (NET)	Hojas plásticas (PET, PE), films de polímeros y acero inoxidable	El paper Bintein 2023 usa polímeros; mallas tipo NET experimentales en PET o films delgados.
D	Kirigami ondulado (sinusoidal)	Zinc (Zn) 0.1 mm + anodización ZnO + spray SiO ₂ /AP	Wang 2023 : este patrón aparece dentro del estudio de las tres geometrías metálicas. Es 100% real.
E	Origami corrugado (Peng 2023)	Aluminio o acero delgado + recubrimientos Janus (SiO ₂ , PDMS)	Su diseño puede imprimirse en 3D también, pero los resultados buenos fueron en láminas metálicas.
F	Origami radial FAN (Zhang 2024)	Acero inoxidable 304 + tratamiento Janus	El más robusto: cara frontal hidrofóbica y cara posterior superhidrofílica. No requiere polímeros.
G	Origami cónico / trompeta (Wang 2025)	Acero inoxidable + recubrimientos químicos Janus (superhidrofílico / hidrofóbico)	Se basa en lámina metálica plegada. Requiere tratamiento químico avanzado.
H	Kirigami W-cone (Wang 2023)	Zinc (Zn) 0.1 mm + anodización ZnO + spray SiO ₂ /AP	Es el más eficiente del estudio. Misma base material que el sinusoidal y triangular.

Tabla 5. Comparación de materiales de tipologías kirigami. Fuente: Elaboración propia 2025

Los antecedentes revisados muestran que las configuraciones tridimensionales concentran los mejores resultados de desempeño; sin embargo, varias de ellas dependen de procesos de fabricación complejos, tratamientos químicos o geometrías altamente especializadas que dificultan su aplicación como envolvente arquitectónica. Por ello, además del rendimiento hidráulico, la selección de una tipología requiere incorporar criterios relacionados con la constructibilidad, la modularidad y la posibilidad de adaptación a sistemas panelizados.

Desde esta perspectiva, el kirigami volumétrico reúne el conjunto más equilibrado de atributos para el desarrollo del presente proyecto. Su geometría permite integrar mecanismos aerodinámicos, conducción gravitacional y generación de relieves tridimensionales dentro de un sistema modular, manteniendo una fabricación basada únicamente en operaciones de corte y plegado. Asimismo, ofrece una mayor libertad para modificar parámetros geométricos sin alterar el principio constructivo, condición que facilita su adaptación a distintas escalas y aplicaciones arquitectónicas.

MATRIZ DE EVALUACIÓN DE TIPOLOGÍAS KIRIGAMI PARA CAPTACIÓN DE NIEBLA

Con base en los antecedentes recopilados se elaboró una matriz comparativa que evalúa las tipologías kirigami mediante cinco criterios relevantes para su aplicación arquitectónica: desempeño aerodinámico, conducción del flujo, capacidad de panelización, escalabilidad y autonomía geométrica. Estos criterios sintetizan los mecanismos identificados durante la revisión bibliográfica y permiten comparar configuraciones desarrolladas bajo metodologías experimentales distintas.

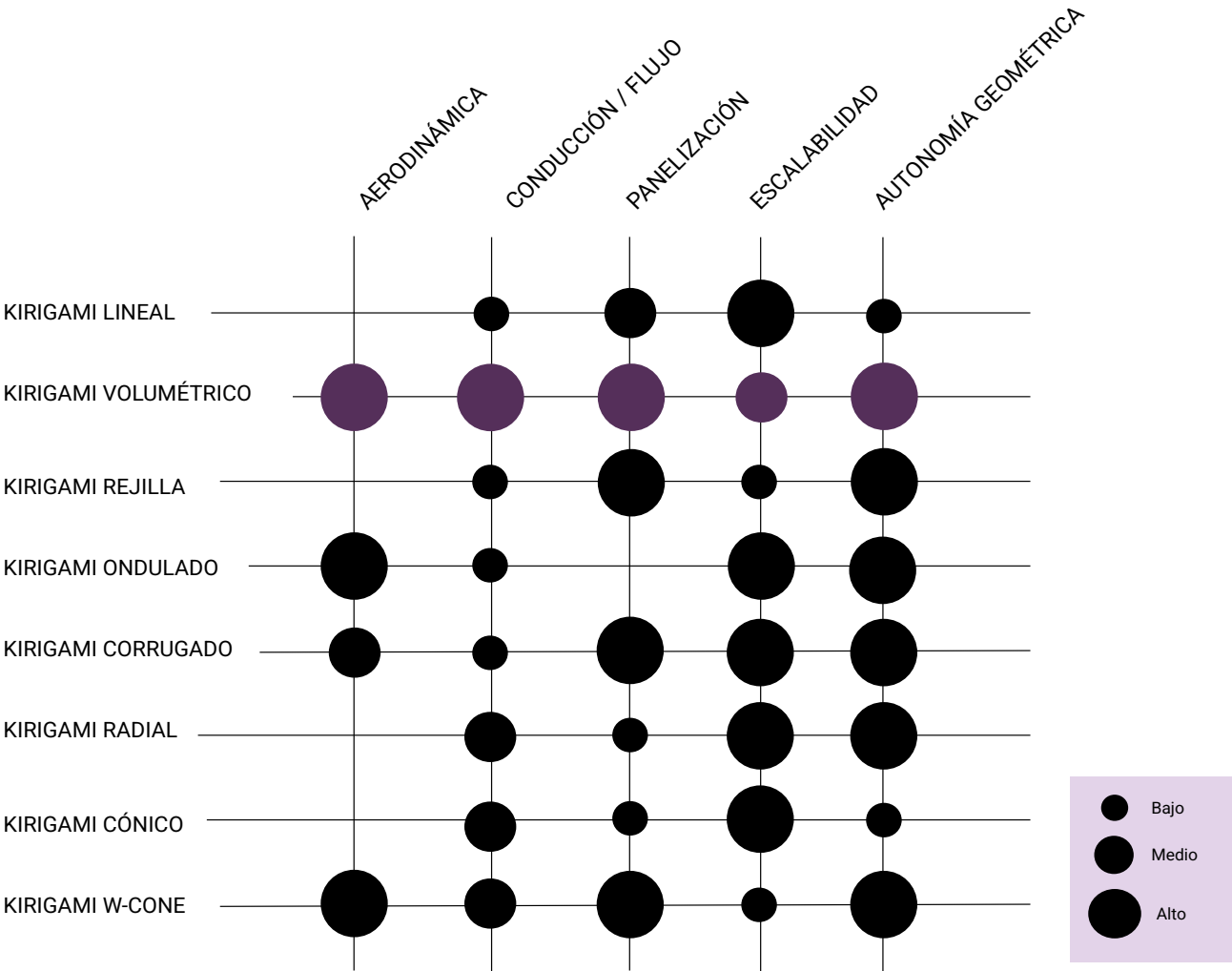


Fig. 49. Matriz de evaluación kirigami. Fuente: Elaboración propia (2025)

La evaluación muestra que el kirigami volumétrico presenta el comportamiento más equilibrado al integrar simultáneamente manipulación del flujo, conducción del agua, modularidad y posibilidades de fabricación mediante procesos convencionales de corte y plegado. Si bien otras configuraciones alcanzan mayores eficiencias en condiciones específicas, su dependencia de tratamientos químicos, materiales especializados o procesos de manufactura más complejos reduce su pertinencia para el desarrollo de un panel arquitectónico.

En consecuencia, el kirigami volumétrico fue seleccionado como base para el desarrollo del prototipo presentado en esta investigación, constituyendo el punto de partida para la etapa de exploración geométrica descrita en el capítulo siguiente.

05

***CAPÍTULO
CINCO***

DISEÑO DEL PATRÓN KIRIGAMI

5.1 FUNCIONAMIENTO AERODINÁMICO DEL KIRIGAMI VOLUMÉTRICO

5.2 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DEL PATRÓN KIRIGAMI

5.3 CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DEL PATRÓN KIRIGAMI

5.4 FACTIBILIDAD CONSTRUCTIVA DEL PATRÓN GEOMÉTRICO

5.5 CONCLUSIONES DE LA FACTIBILIDAD CONSTRUCTIVA

05

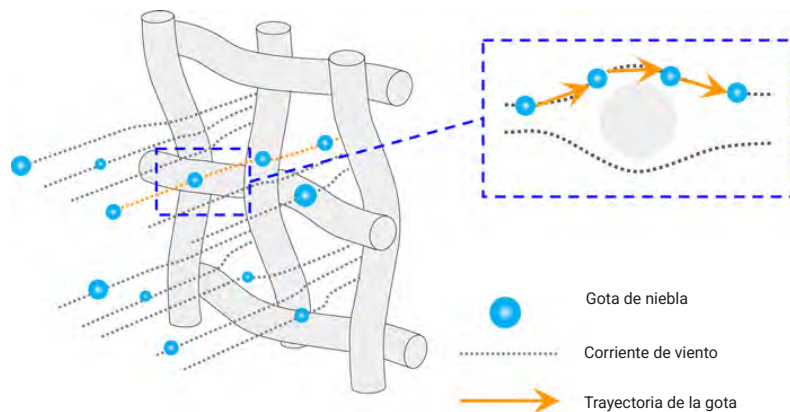
DISEÑO DEL PATRÓN KIRIGAMI

5.1 FUNCIONAMIENTO AERODINÁMICO DEL KIRIGAMI VOLUMÉTRICO

Una vez seleccionada la configuración kirigami volumétrica, resulta necesario comprender el principio de funcionamiento que sustenta su desempeño. A diferencia de las geometrías lineales o de rejilla, esta configuración transforma una lámina plana en una superficie tridimensional compuesta por cavidades piramidales que modifican localmente el comportamiento del flujo de aire y la trayectoria de las microgotas. El estudio desarrollado por Li et al. (2021) demuestra que la eficiencia del sistema no depende únicamente de la presencia de una superficie colectora, sino de la interacción entre la geometría, el flujo de aire y el mecanismo de drenaje generado por el propio patrón.

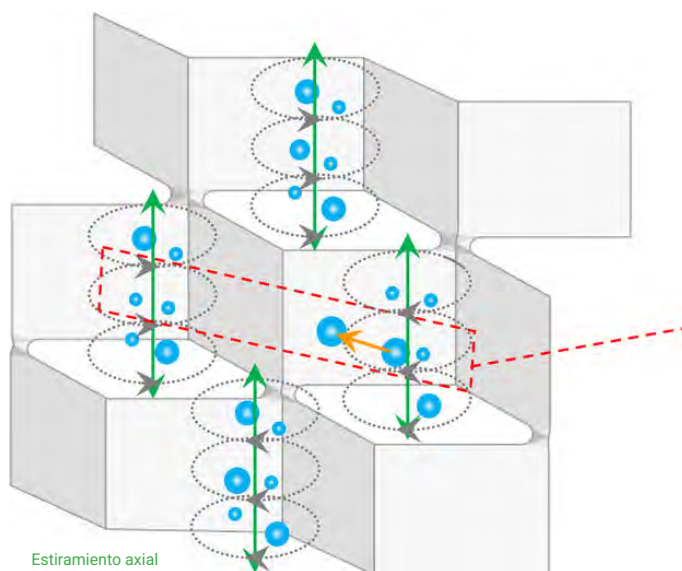
En una primera etapa, las microgotas transportadas por el viento tienden a seguir las líneas de corriente y rodear una superficie convencional debido a su baja inercia (Figura A). Al incorporar las cavidades tridimensionales del patrón kirigami, el flujo se desvía y genera pares de vórtices localizados frente a cada unidad geométrica (Figura B). Estas estructuras aerodinámicas incrementan el tiempo de permanencia de las gotas en las proximidades de la superficie, favoreciendo su concentración y aumentando la probabilidad de impacto.

Finalmente, la acumulación de microgotas dentro de las zonas de recirculación promueve la coalescencia y el crecimiento progresivo de las gotas hasta que estas son guiadas por las pendientes de la geometría hacia los puntos de drenaje (Figura C). De esta manera, la unidad kirigami integra en un mismo elemento tres funciones complementarias: modificar el flujo de aire para aumentar la captación, favorecer el crecimiento de las gotas y conducir el agua recolectada mediante la propia forma tridimensional.



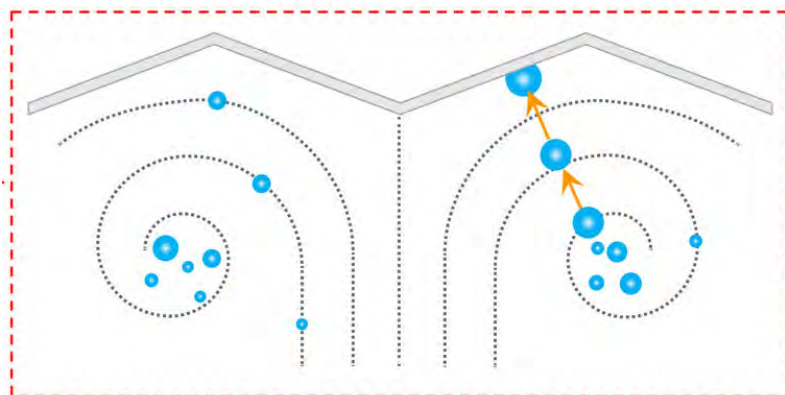
DESVIACIÓN AERODINÁMICA

Fig. 50. Fuente: Li, J. et al., esquema de desviación aerodinámica en mallas convencionales de captación de niebla, Nature Communications (2021).



RECOLECCIÓN ASISTIDA POR AERODINÁMICA

Fig. 51. Fuente: Li, J. et al., diagrama conceptual de vórtices inducidos por geometría kirigami para captación de niebla, Nature Communications (2021).



INTERCEPCIÓN DE GOTAS PROMOVIDA POR VÓRTICE

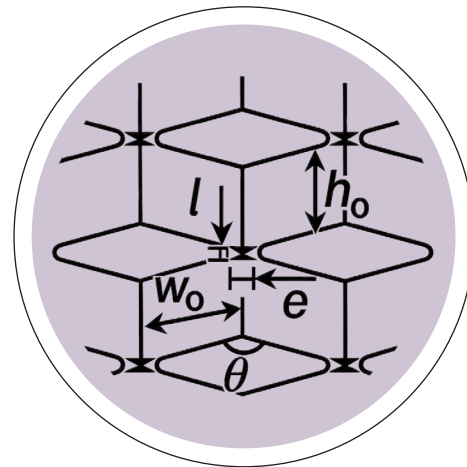
Fig. 52. Fuente: Li, J. et al., esquema de trayectoria de gotas de niebla influenciada por vórtices, Nature Communications (2021).

5.2 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DEL PATRÓN KIRIGAMI

Una vez comprendido el mecanismo de funcionamiento del kirigami volumétrico, el estudio de Li et al. (2021) identifica las variables geométricas que controlan su desempeño aerodinámico. Estas variables determinan la generación y estabilidad de los vórtices, la interacción entre las microgotas y la superficie, así como la conducción del agua hacia las zonas de drenaje. En conjunto, constituyen los parámetros de diseño que posteriormente sirven como base para el desarrollo y adaptación del patrón constructivo utilizado en esta investigación.

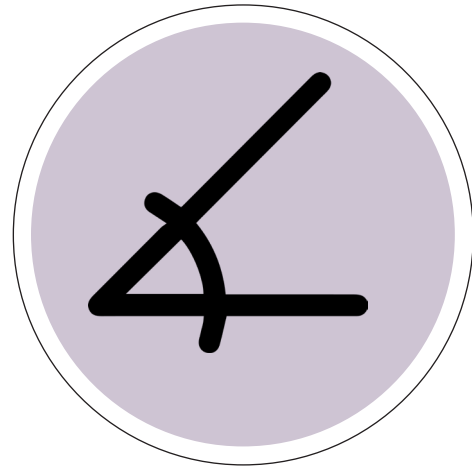
1° UNIDAD GEOMÉTRICA

La unidad geométrica corresponde al módulo básico repetitivo del patrón kirigami. Su configuración se define mediante el ancho de la unidad (w_0), la altura (h_0), el ancho de junta (e) y el largo del corte (l), parámetros que controlan las dimensiones de las cavidades generadas tras el plegado. La repetición de esta unidad permite conformar una superficie continua donde el comportamiento aerodinámico observado a escala local se replica en todo el sistema.



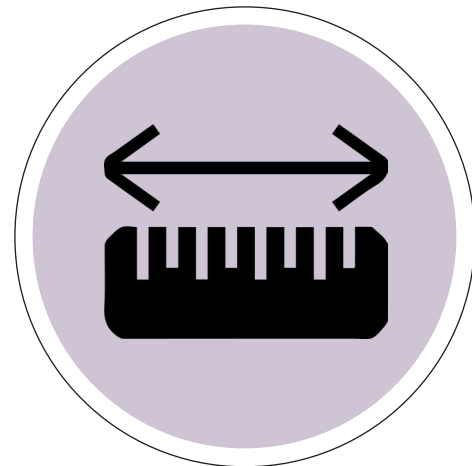
2° ÁNGULO DE PLEGADO

El ángulo de plegado determina la apertura de cada cavidad y modifica directamente la intensidad y estabilidad de los vórtices generados frente a la superficie. Li et al. (2021) identifican un rango óptimo entre 120° y 150°, donde se obtiene un equilibrio entre captación, crecimiento de gotas y drenaje, manteniendo un comportamiento aerodinámico estable.



3° ESCALA DE LA UNIDAD

El tamaño de la unidad influye en la formación de los vórtices y en la factibilidad de fabricación del patrón. El estudio demuestra que el mecanismo aerodinámico puede mantenerse en unidades de escala centimétrica siempre que se respeten las proporciones geométricas definidas para el sistema. Esta condición permite trasladar el comportamiento observado experimentalmente hacia aplicaciones de mayor tamaño.



5.3 CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DEL PATRÓN KIRIGAMI

El estudio de Li et al. (2021) desarrolla un patrón kirigami compuesto por una retícula de módulos obtenidos mediante una secuencia de cortes y pliegues sobre una lámina continua. Cada unidad está definida por líneas de corte, pliegues tipo mountain y valley y uniones que mantienen la continuidad estructural del patrón. La repetición de este módulo genera una superficie tridimensional capaz de modificar el flujo de aire de manera uniforme.

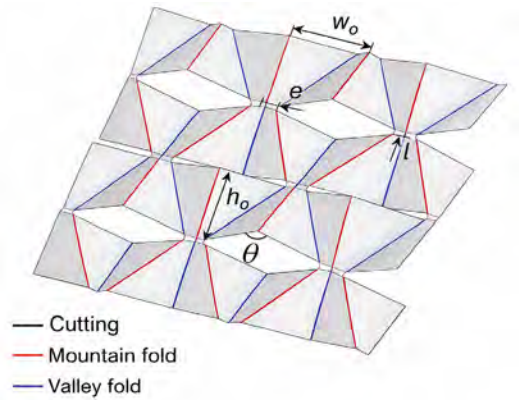


Fig. 53. Diagrama de pliegues monte y valle de la geometría kirigami. Fuente: Li, J. et al., esquema de trayectoria de gotas de niebla influenciada por vórtices, Nature Communications (2021).

A partir de esta configuración inicial, los autores proponen una evolución geométrica mediante la incorporación de un pliegue diagonal en cada unidad. Esta modificación transforma el volumen cúbico en una geometría piramidal cóncava, generando superficies inclinadas y canales de drenaje que conducen el agua hacia los vértices inferiores de cada módulo. De este modo, la geometría mantiene el comportamiento aerodinámico observado en la configuración cúbica e incorpora un mecanismo de conducción gravitacional del agua, integrando la captación y el drenaje dentro de una misma unidad geométrica.

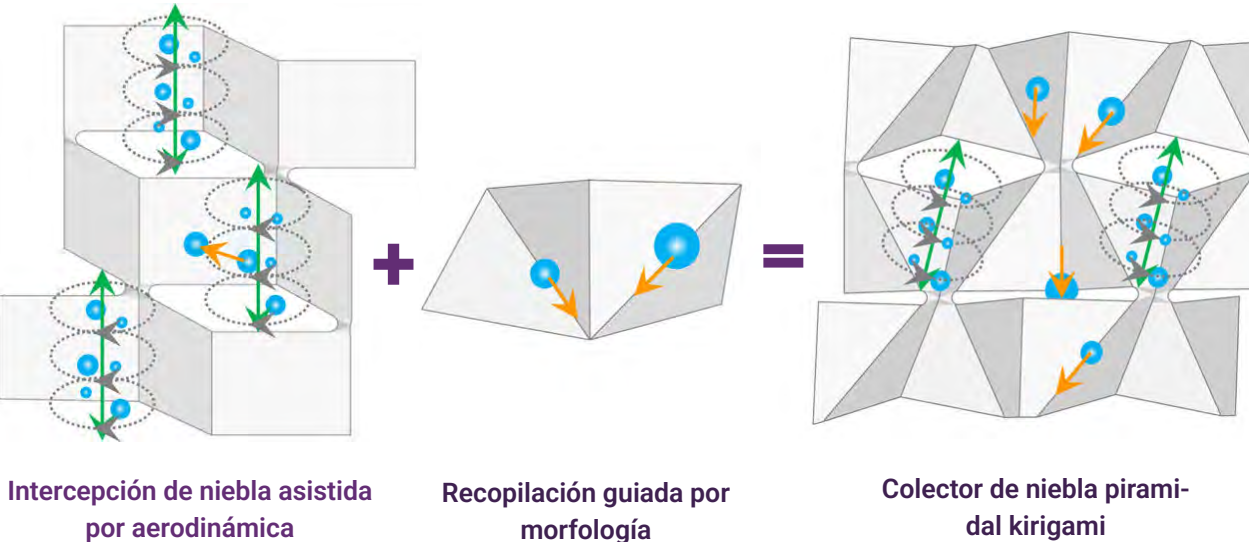


Fig. 54. Fuente: Li, J. et al., esquema de desviación aerodinámica en mallas convencionales de captación de niebla, Nature Communications (2021).

Esta transición desde una configuración cúbica hacia una piramidal constituye la base geométrica adoptada en la presente investigación, ya que establece el principio de diseño sobre el cual posteriormente se desarrolla y adapta el patrón constructivo empleado en el prototipo.

5.4 FACTIBILIDAD CONSTRUCTIVA DEL PATRÓN GEOMÉTRICO

A partir de los parámetros geométricos originales definidos en el estudio, presentados en la tabla 6, se desarrolla una fase de exploración orientada a verificar la viabilidad del sistema mediante su fabricación en láminas de PET.

PARÁMETROS CONFIGURACIÓN PIRAMIDAL

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR
Ancho de unidad	wo	10 mm (1 cm)
Altura de unidad	ho	9 mm (0.9 cm)
Ancho de junta	e	3 mm
Largo de junta	l	1 mm
Espesor material	t	127–150 µm PET
Tamaño hoja usada	—	1 × 1 m
Diámetro redondeo en juntas	—	1 mm
Ángulo óptimo de plegado	θ	120° – 150°

Tabla 6. Parámetros configuración piramidal.
Fuente: Elaboración propia en base a Li, J. et al.,
Nature Communications (2021).

Con el objetivo de evaluar la factibilidad constructiva de la geometría propuesta por Li et al. (2021), se desarrolló una primera aproximación utilizando los parámetros originales del estudio. El patrón fue fabricado mediante corte y grabado en un plotter de corte Silhouette sobre láminas de PET de distintos espesores (200, 300 y 500 µm), tanto transparentes como gofradas y opacas, generando la configuración en estado plano a partir de líneas de corte y pliegue definidas digitalmente. Esta primera exploración evidenció que la reducida escala de los cortes dificultaba considerablemente su fabricación y plegado manual, comprometiendo la precisión del patrón y la estabilidad de la configuración tridimensional.

En respuesta a las limitaciones identificadas durante la primera fase de fabricación, se reajustaron los parámetros geométricos del patrón, incrementando la dimensión de la unidad hasta el valor máximo recomendado por Li et al. (2021) ($w_o = 20\text{ mm}$), tal como se presenta en la tabla 7. Este escalamiento permitió conservar los principios aerodinámicos del sistema, manteniendo la generación de vórtices locales y la conducción del agua mediante la geometría tridimensional, pero adaptando el patrón a una escala compatible con un proceso de fabricación manual y de prototipado.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR
Ancho de unidad	w_o	20 mm
Altura de unidad	h_o	18 mm
Ancho de junta	e	6 mm
Largo de junta	l	2 mm
Espesor material	t	200-500 μm PET-PP
Tamaño hoja usada	—	$14 \times 12.8\text{ cm}^2$
Diámetro redondeo en juntas	—	0
Ángulo óptimo de plegado	θ	$120^\circ - 150^\circ$

Tabla 7. Parámetros ajustados de configuración piramidal. Fuente: Elaboración propia en base a parámetros descritos en Li, J. et al., Nature Communications (2021).

Paralelamente, se evaluó el comportamiento de distintas láminas de PET con espesores de 200, 300 y 500 μm , con el propósito de determinar el material más adecuado para reproducir la geometría propuesta. La lámina de 200 μm permitió realizar el plegado con facilidad; sin embargo, presentó una rigidez insuficiente para conservar la configuración tridimensional, provocando deformaciones que comprometían la estabilidad del patrón. En el extremo opuesto, la lámina de 500 μm proporcionó una elevada rigidez, pero su espesor dificultó significativamente el plegado, generando fisuras y quiebres permanentes en las líneas de pliegue.

En contraste, la lámina de PET de 300 μm presentó el comportamiento más equilibrado, permitiendo ejecutar los pliegues sin daño del material y conservando una geometría estable una vez desplegada. En consecuencia, este espesor fue seleccionado para continuar el desarrollo del patrón kirigami, al ofrecer un balance adecuado entre flexibilidad, estabilidad geométrica y factibilidad constructiva.

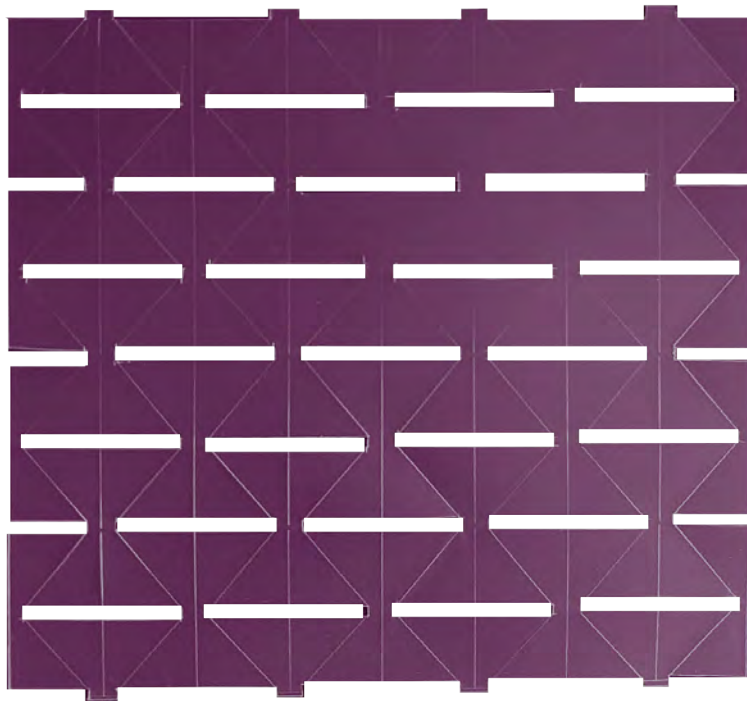


Fig. 55. 1ra prueba de corte del patrón kirigami piramidal en una mica gofrada 200 μm . Fuente: Elaboración propia (2026).

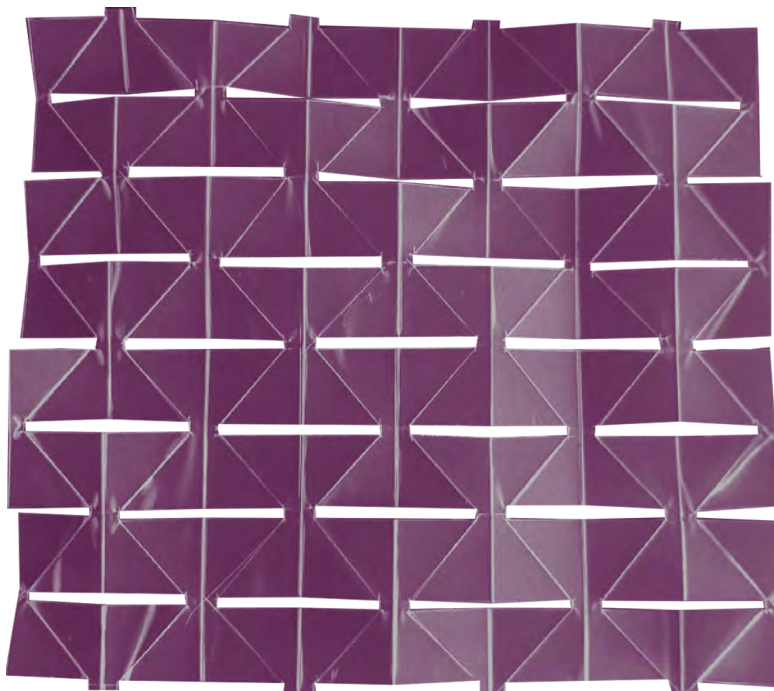
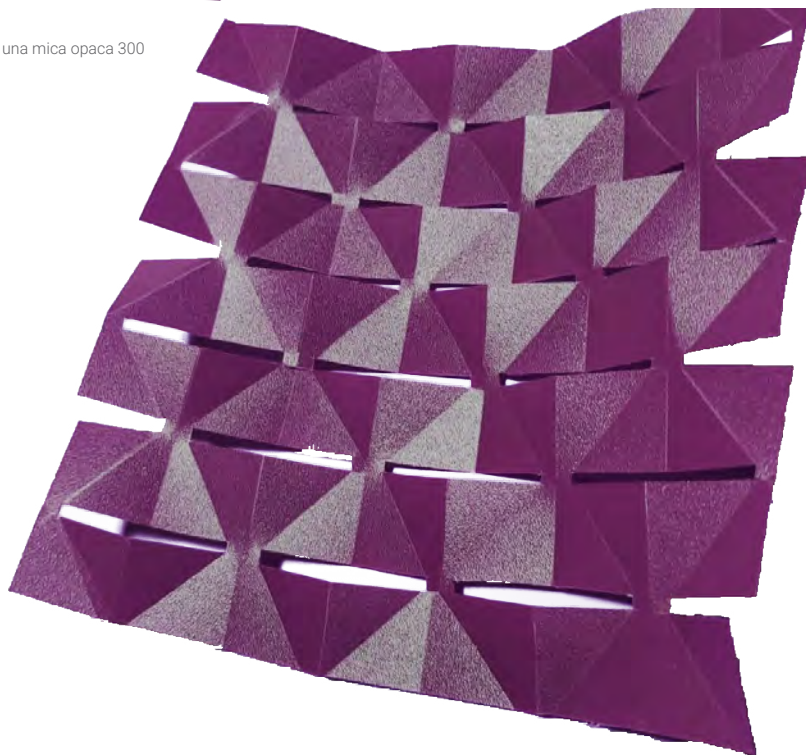


Fig. 56. 1ra prueba de plegado del patrón kirigami piramidal en una mica gofrada 200 μm . Fuente: Elaboración propia (2026).



Fig. 57. Segunda prueba de corte del patrón kirigami piramidal en una mica opaca 300 μm . Fuente: Elaboración propia (2026).

Fig. 58. Segunda prueba de plegado del patrón kirigami piramidal en una mica opaca 300 μm . Fuente: Elaboración propia (2026).



5.5 CONCLUSIONES DE LA FACTIBILIDAD CONSTRUCTIVA

El análisis del estudio de Li et al. (2021) permitió descomponer el funcionamiento del sistema kirigami en un conjunto de parámetros geométricos verificables, estableciendo la relación entre la configuración tridimensional del patrón y los mecanismos responsables de la captación atmosférica. La secuencia de cortes, la orientación de los pliegues, la geometría piramidal y la escala de la unidad constituyen un sistema integrado cuya interacción controla simultáneamente la generación de vórtices, la interceptación de microgotas y la conducción gravitacional del agua.

La traducción de estos principios hacia una aplicación arquitectónica requirió un proceso de reinterpretación geométrica más que una reproducción literal del modelo experimental. En este contexto, los parámetros originales fueron utilizados como referencia para definir un patrón equivalente, manteniendo las relaciones geométricas descritas mientras se evaluaba su compatibilidad con procesos de fabricación accesibles y con materiales disponibles para el desarrollo de un prototipo físico.

La fase de la factibilidad constructiva permitió caracterizar la influencia de la escala y de la materialidad del patrón kirigami. La dimensión propuesta en el estudio original impuso restricciones asociadas a la precisión del corte, la ejecución del plegado y la estabilidad de la configuración espacial. Por esta razón, el análisis incorporó un reajuste de la unidad geométrica dentro del rango máximo recomendado por los autores, preservando las proporciones funcionales del patrón y la lógica aerodinámica que gobierna la formación de vórtices y la conducción del flujo de agua.

Complementariamente, la evaluación comparativa de láminas de PET de distintos espesores permitió establecer criterios de selección material basados en el comportamiento mecánico durante el conformado. La comparación evidenció respuestas diferenciadas en términos de flexibilidad, rigidez y estabilidad geométrica, variables que condicionan directamente la capacidad del patrón para mantener su configuración tridimensional después del plegado y durante su manipulación. De esta manera, el patrón obtenido establece la base geométrica sobre la cual se desarrollan las siguientes etapas de prototipado y validación experimental de la presente investigación.

06

***CAPÍTULO
SEIS***

DESARROLLO DE PROTOTIPOS

6.1 INTEGRACIÓN DEL PATRÓN KIRIGAMI EN EL PROTOTIPO

6.2 CRITERIOS DE DISEÑO

6.3 DESARROLLO DEL PROTOTIPO 1

6.4 DESARROLLO DEL PROTOTIPO 2

06

DESARROLLO DEL PROTOTIPO

6.1 INTEGRACIÓN DEL PATRÓN KIRIGAMI EN EL PROTOTIPO

En esta investigación, el desarrollo se concentra en el componente responsable de la captación y conducción del agua atmosférica dentro del sistema atrapanieblas. En consecuencia, el panel kirigami se diseña para interceptar las microgotas, favorecer su coalescencia y dirigir el escurrimiento hacia un punto de recolección. Las etapas posteriores de recolección, almacenamiento y distribución del recurso hídrico corresponden a sistemas complementarios, cuyo desarrollo no forma parte del alcance del prototipo.

● ALCANCE DEL PROTOTIPO DENTRO DEL SISTEMA ATRAPANIEBLAS

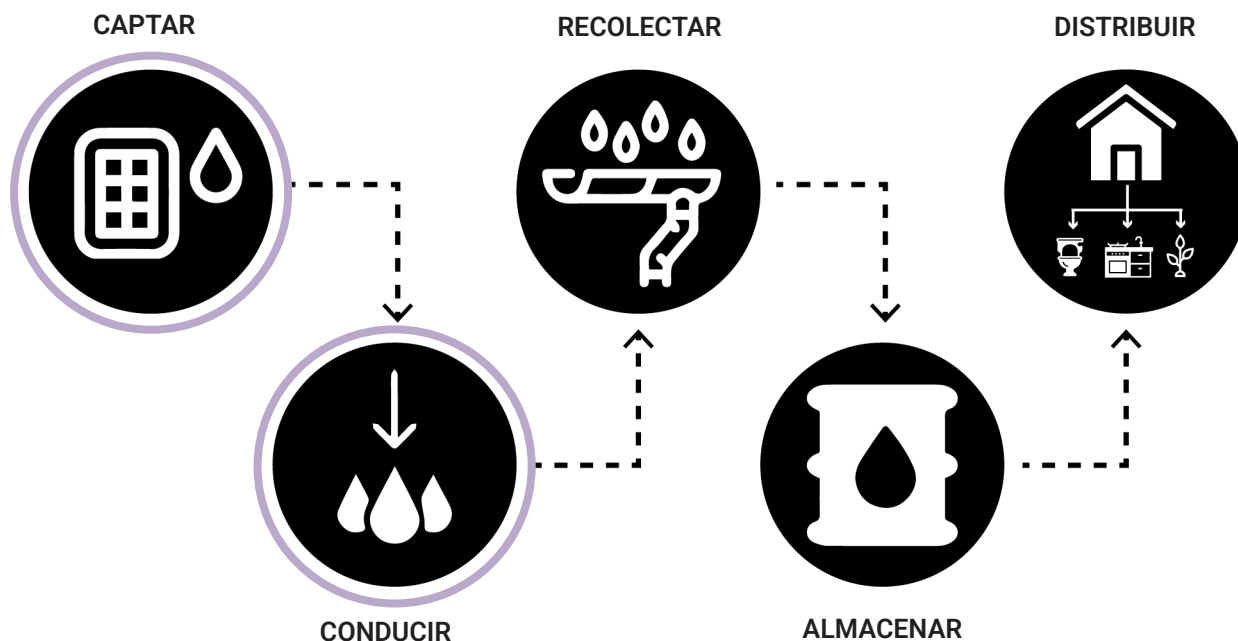


Fig. 59. Diagrama del alcance del prototipo dentro del sistema atrapanieblas. Fuente: Elaboración propia (2026).

6.2 CRITERIOS DE DISEÑO DEL PANEL

La adaptación del patrón kirigami a un componente arquitectónico implicó trasladar una geometría optimizada experimentalmente hacia un sistema constructivo compatible con una envolvente de edificio.

Como parte del proceso de desarrollo del prototipo, se identificaron las condiciones mínimas que debía cumplir el patrón kirigami para ser incorporado como un componente constructivo. A partir de este análisis se establecieron criterios de diseño relacionados con la integración a la envolvente, la modulación del sistema, la protección del cerramiento y la compatibilidad con procesos constructivos convencionales.

1 - INTEGRACIÓN CON LA ENVOLVENTE

El sistema se concibe como un panel independiente que puede incorporarse a una envolvente arquitectónica sin modificar el funcionamiento del cerramiento principal. Esta estrategia permite adaptar el módulo a distintos soportes constructivos, facilita su instalación y posibilita el reemplazo individual de cada panel durante su vida útil.

3 - SEPARACIÓN RESPECTO AL CERRAMIENTO

El sistema considera una cámara de aire entre el panel captador y la envolvente, evitando el contacto directo del agua con el muro. Esta separación favorece la ventilación posterior, reduce la acumulación de humedad y protege el cerramiento frente al escurrimiento continuo generado durante la captación.

2 - PROTOTIPO MODULAR

El panel se desarrolla a partir de una unidad modular repetible, permitiendo conformar superficies continuas mediante la agregación de múltiples elementos. Esta condición favorece la panelización, la escalabilidad del sistema y su adaptación a distintas dimensiones de fachada, simplificando además los procesos de fabricación, transporte y montaje.

4 - COMPATIBILIDAD CONSTRUCTIVA

El sistema se desarrolla, privilegiando soluciones compatibles con procesos convencionales de fabricación, montaje y mantenimiento. Además, considera el empleo de componentes y fijaciones estandarizadas de disponibilidad comercial, permitiendo el reemplazo individual de piezas sin intervenir el conjunto del sistema.

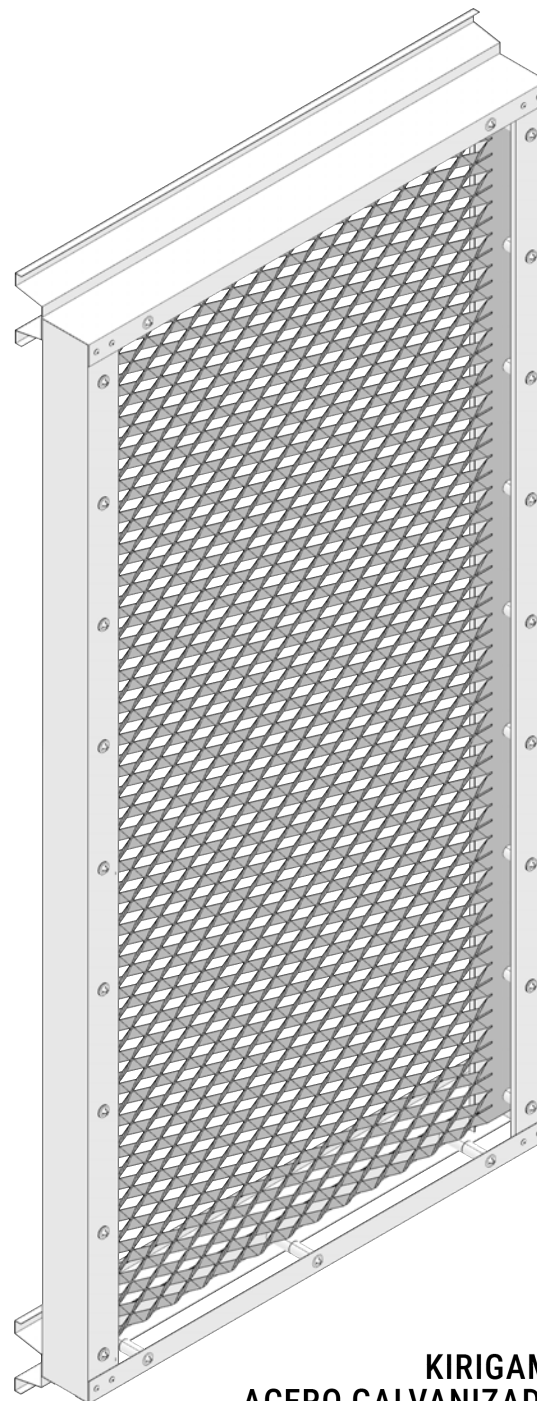
6.3 DESARROLLO DEL PROTOTIPO I

El primer prototipo corresponde a la primera materialización del sistema constructivo propuesto, desarrollada con el propósito de verificar la viabilidad de trasladar el patrón kirigami a un panel arquitectónico de escala real. En esta etapa se definió una estructura portante metálica fabricada con perfiles Metalcon y una superficie activa de captación conformada por una plancha de acero galvanizado de 0,5 mm de espesor.

El diseño adopta una configuración perimetral que aporta rigidez al conjunto y permite incorporar la lámina kirigami como un elemento independiente de la estructura resistente. Esta disposición mantiene la geometría activa del patrón sin comprometer su capacidad de deformación, diferenciando la función estructural del panel de la superficie captadora.

Como parte de esta primera aproximación, el sistema incorpora un mecanismo de anclaje para su instalación sobre una superficie, manteniendo una separación respecto al cerramiento que evita el contacto directo del agua con el muro y favorece la ventilación posterior.

Finalmente, esta primera versión concentra su desarrollo en la captación atmosférica, resolviendo la conducción del agua mediante escurrimiento gravitacional libre desde el borde inferior del panel hacia un elemento colector independiente.



**KIRIGAMI
ACERO GALVANIZADO**

Fig. 60. Isométrica general Prototipo 1 - Kirigami
Acero. Fuente: Elaboración propia (2026).

CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL DEL PANEL

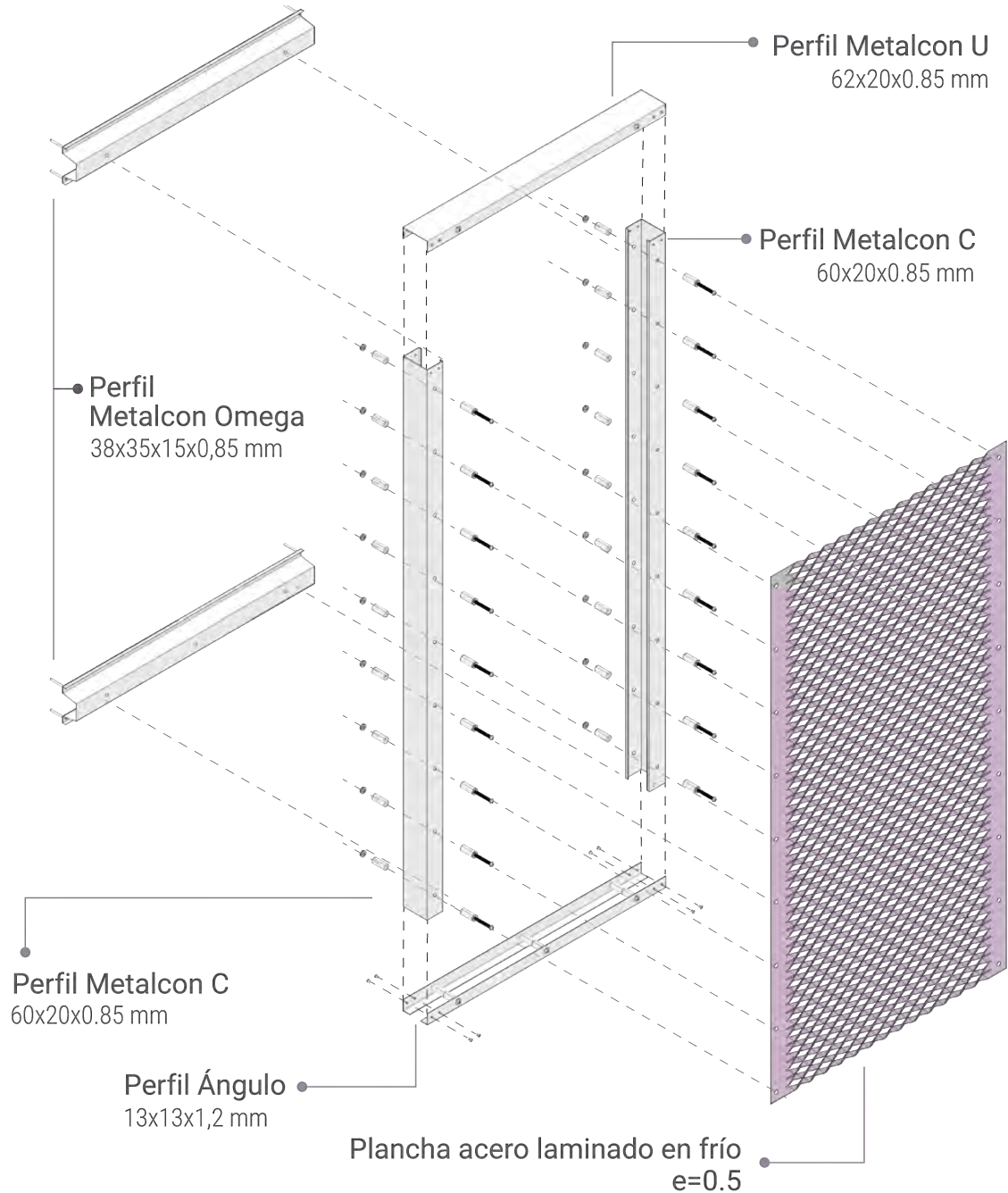


Fig. 61. Isométrica explotada estructural prototipo 1 - Kirigami Acero. Fuente: Elaboración propia (2026).

DOCUMENTACIÓN TÉCNICA DEL PROTOTIPO

PLANOS GENERALES

VISTA FRONTAL Esc 1:10

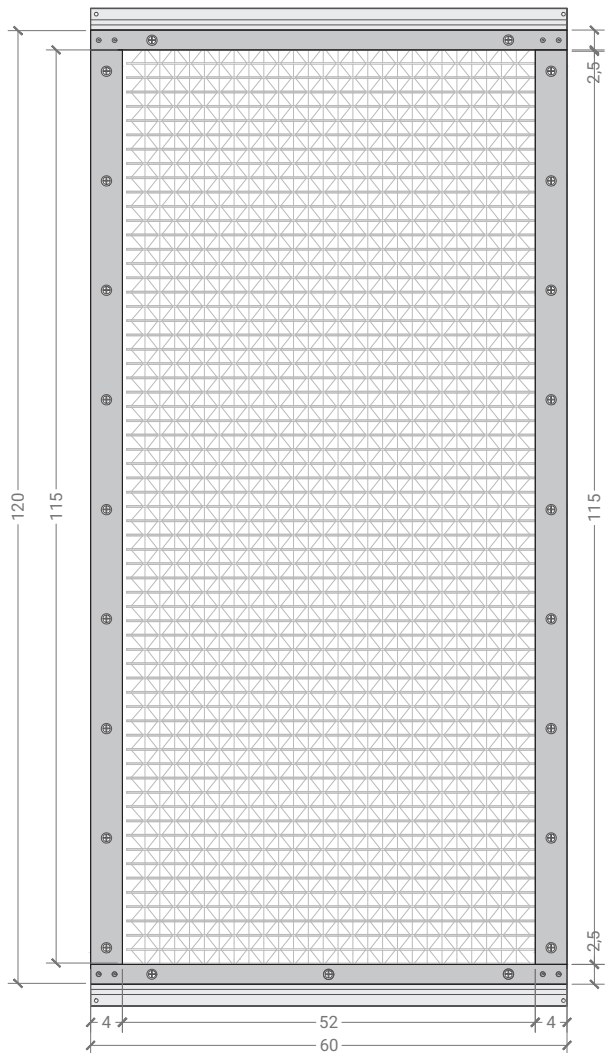


Fig. 62. Vista frontal - planimetría.
Fuente: Elaboración propia (2026).

VISTA LATERAL Esc 1:10

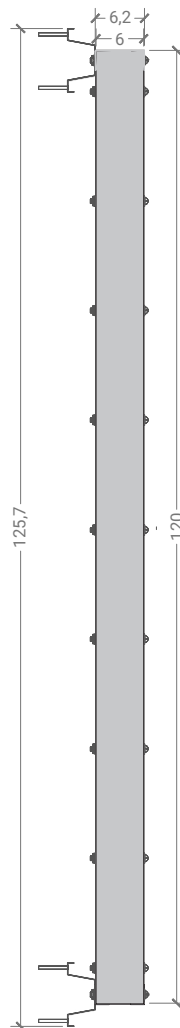


Fig. 63. Vista lateral - planimetría.
Fuente: Elaboración propia (2026).

VISTA POSTERIOR Esc 1:10

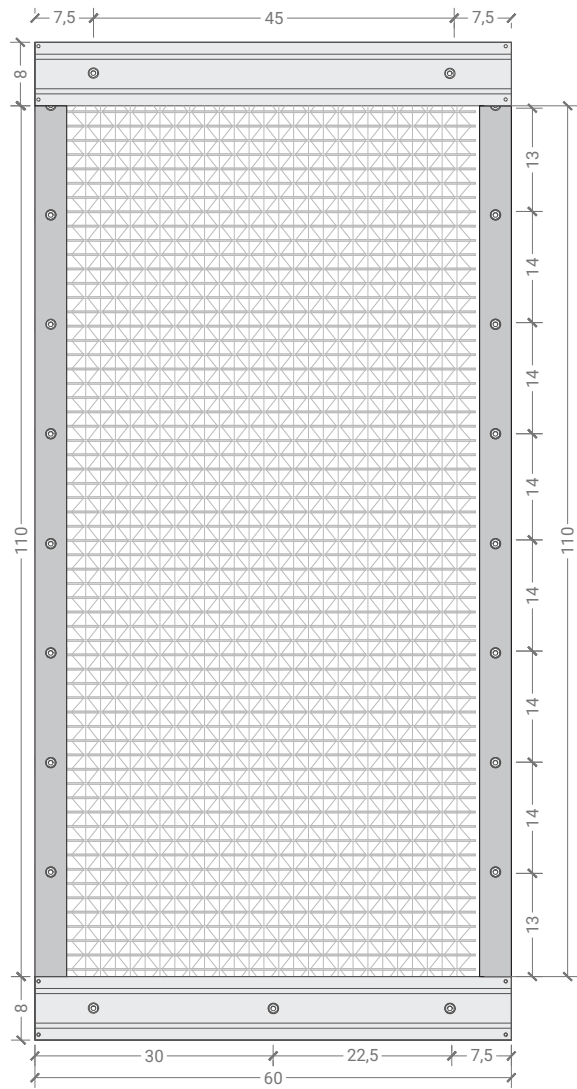


Fig. 64. Vista posterior - planimetría.
Fuente: Elaboración propia (2026).

VISTA SUPERIOR Esc 1:10

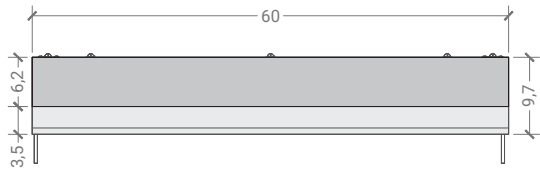


Fig. 65. Vista superior - planimetría.
Fuente: Elaboración propia (2026).

VISTA INFERIOR Esc 1:10

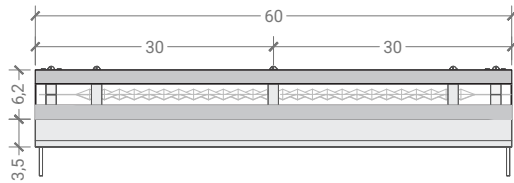


Fig. 66. Vista inferior - planimetría.
Fuente: Elaboración propia (2026).

DETALLES DE FIJACIÓN

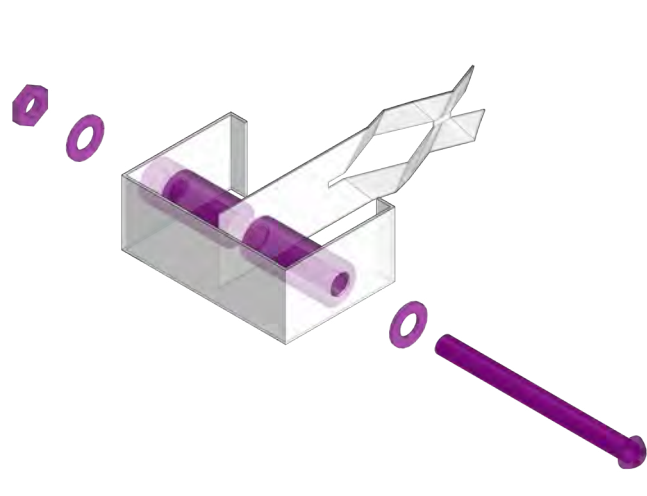


Fig. 67. Detalle de fijaciones prototipo 1 kirigami acero
Fuente: Elaboración propia (2026).

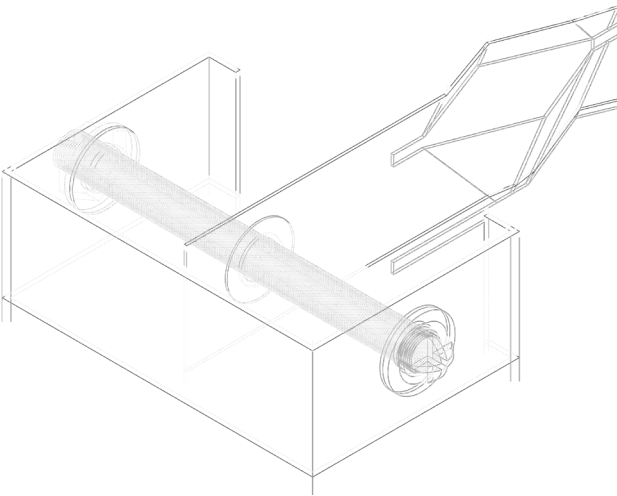


Fig. 68. Detalle de fijaciones prototipo 1 kirigami acero
Fuente: Elaboración propia (2026).

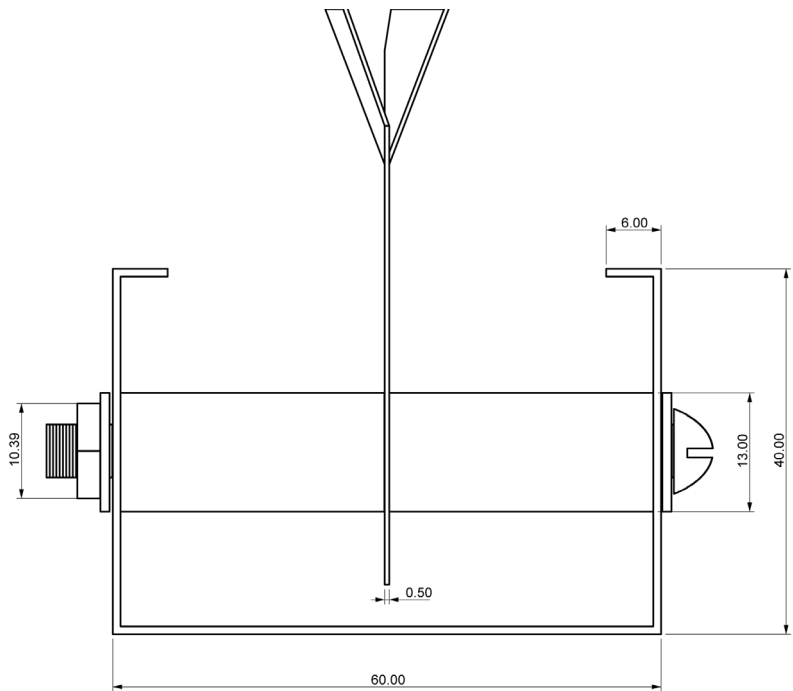
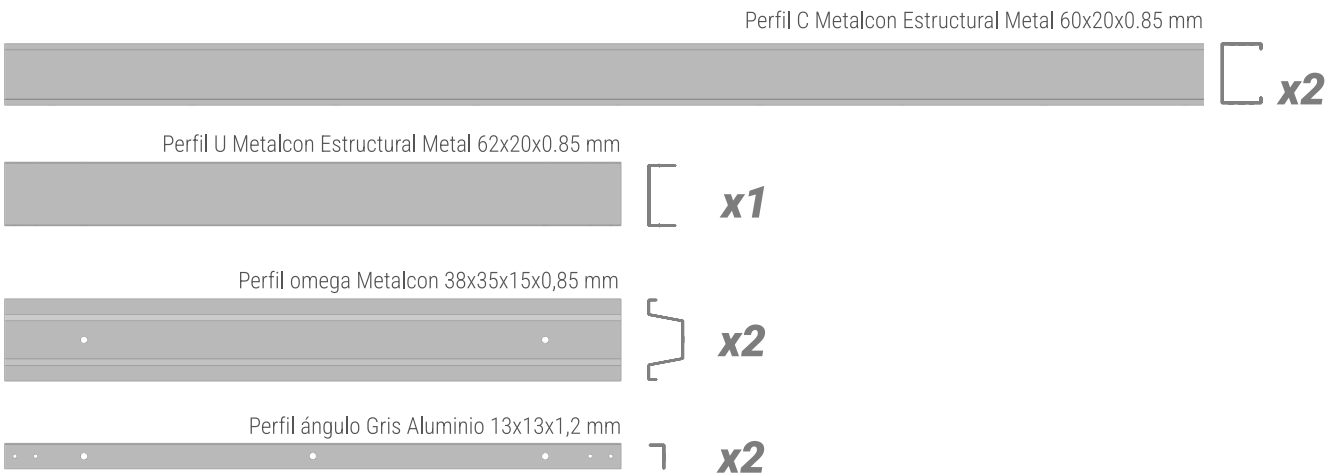


Fig. 69. Detalle de fijaciones prototipo 1 kirigami acero
Fuente: Elaboración propia (2026).

DESPIECE DEL PANEL

PERFILES ESTRUCTURALES



FIJACIONES

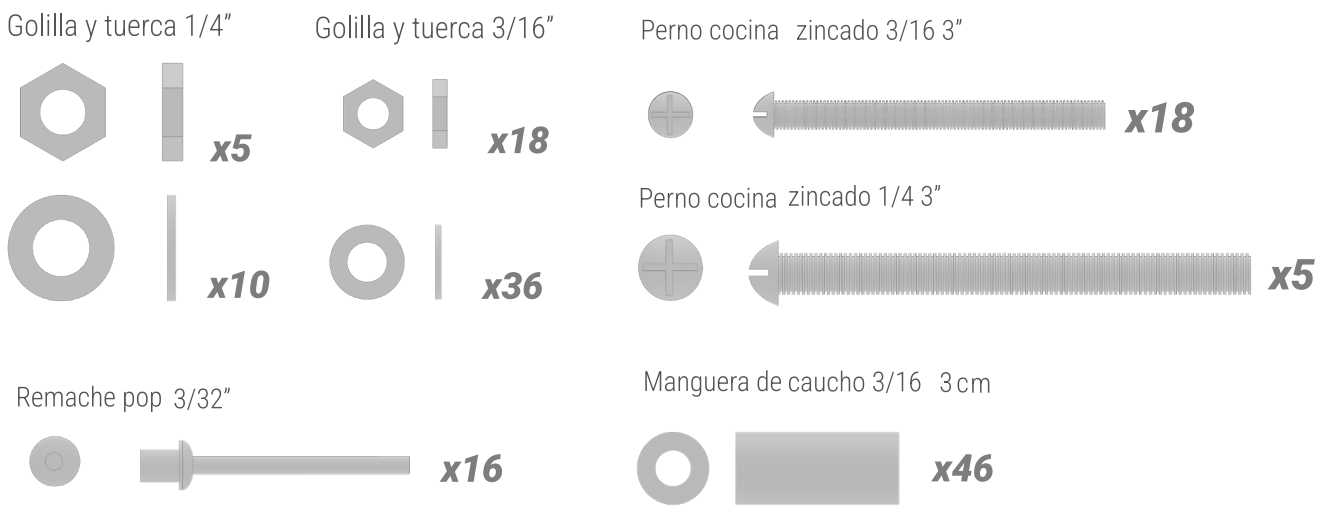


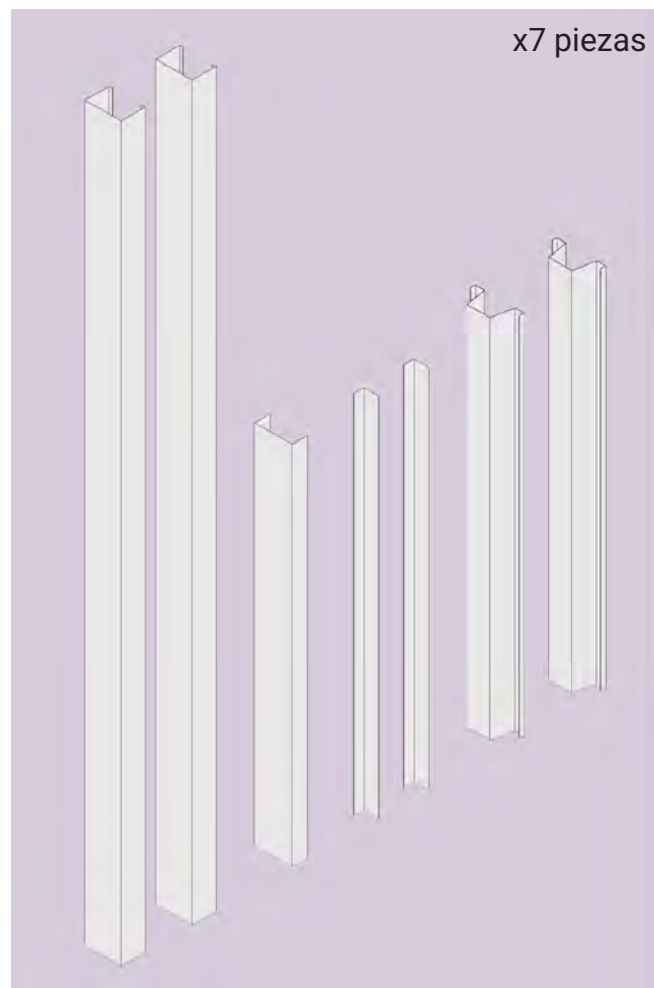
Fig. 70. Despiece prototipo 1 Kirigami Acero
Fuente: Elaboración propia (2026).

FABRICACIÓN Y ENSAMBLAJE

PREPARACIÓN DE PERFILES



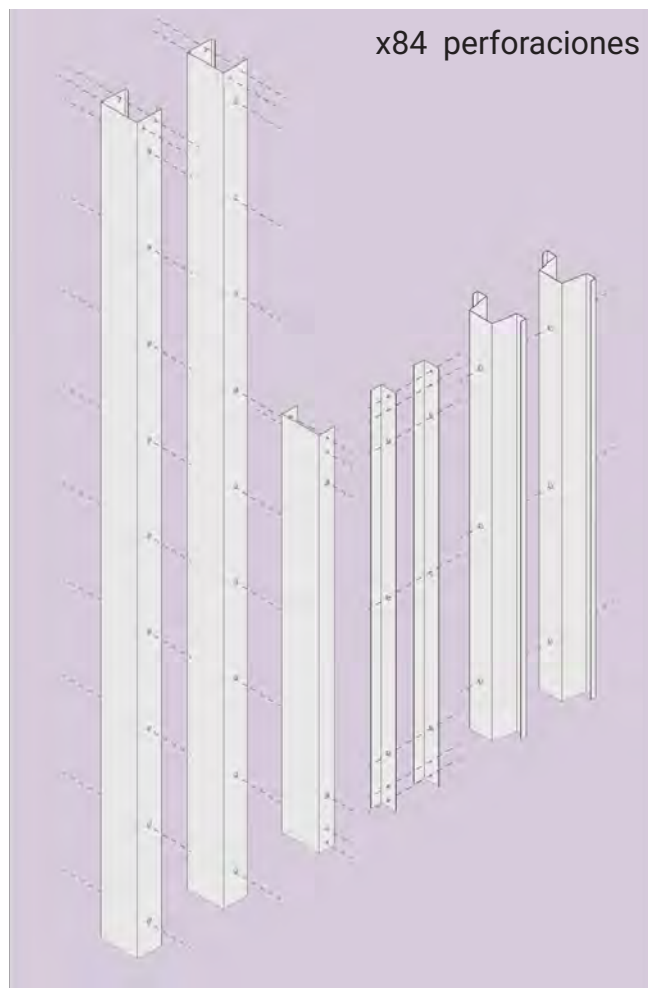
CORTE DE PERFILES



Los perfiles se cortan según las dimensiones definidas en los planos de fabricación, obteniendo siete componentes: dos perfiles Omega, dos tipo C, dos ángulo y un perfil U, que conforman la estructura portante del panel.



PERFORACIÓN DE PERFILES

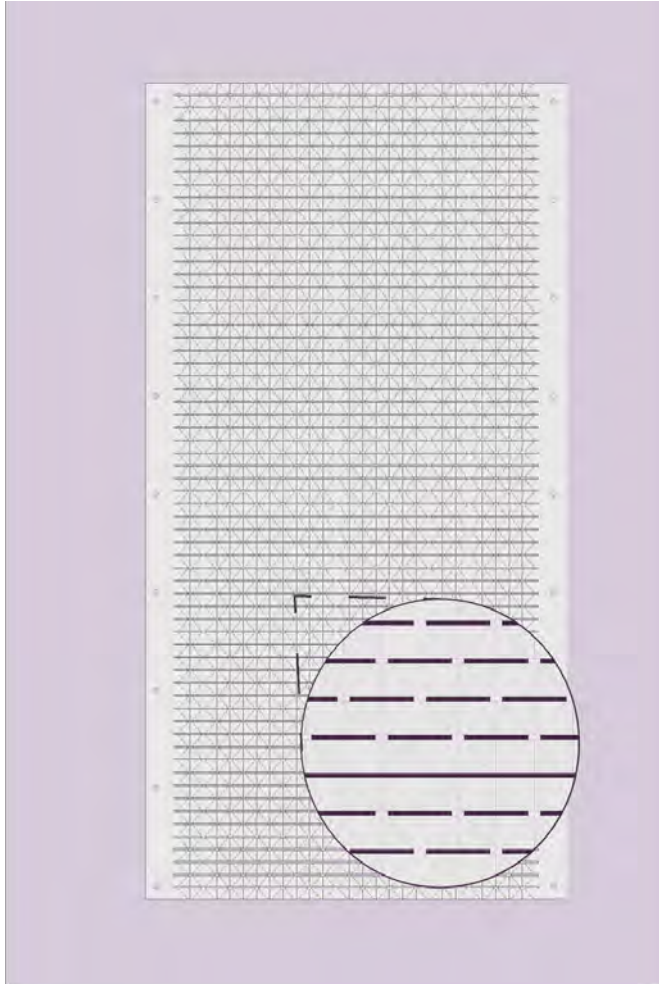


Posteriormente se ejecutan las perforaciones para las uniones mecánicas y el montaje de la superficie captadora. Su distribución asegura la correcta alineación y el ensamblaje de todos los componentes del sistema.

PREPARACIÓN DE LÁMINAS

3

CORTE DE LÁMINA



La superficie captadora se obtiene mediante corte láser sobre una plancha de acero galvanizado de 1200 × 600 mm y 0,5 mm de espesor, reproduciendo el patrón kirigami definido durante la etapa de diseño.

4

PLEGADO DE LÁMINA

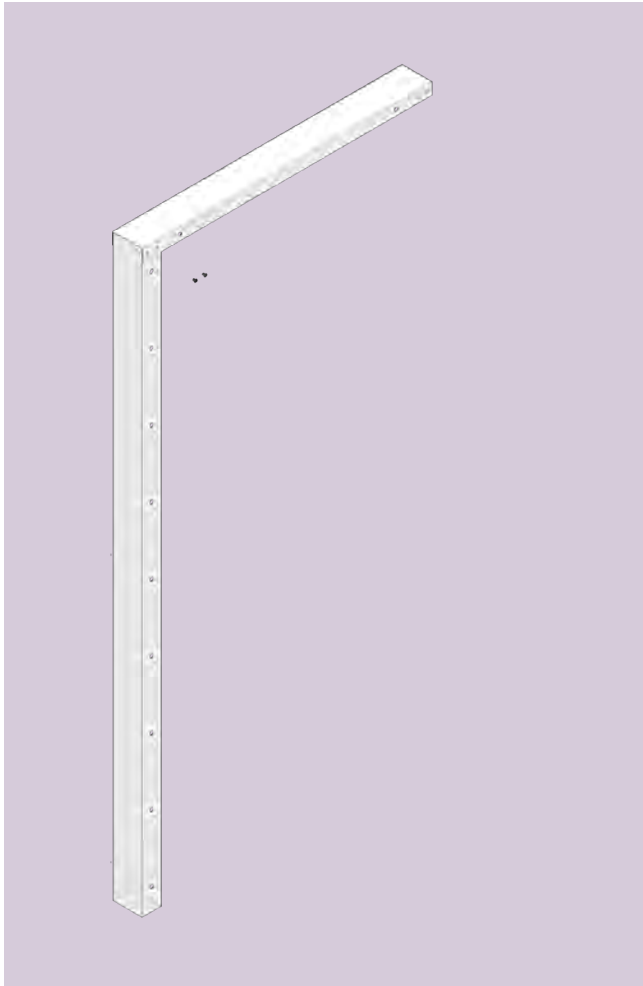


Finalmente, la lámina se pliega siguiendo las líneas previamente definidas para conformar la geometría tridimensional del patrón kirigami, responsable de generar la superficie activa de captación y conducción del agua.

PREPARACIÓN DE PERFILES

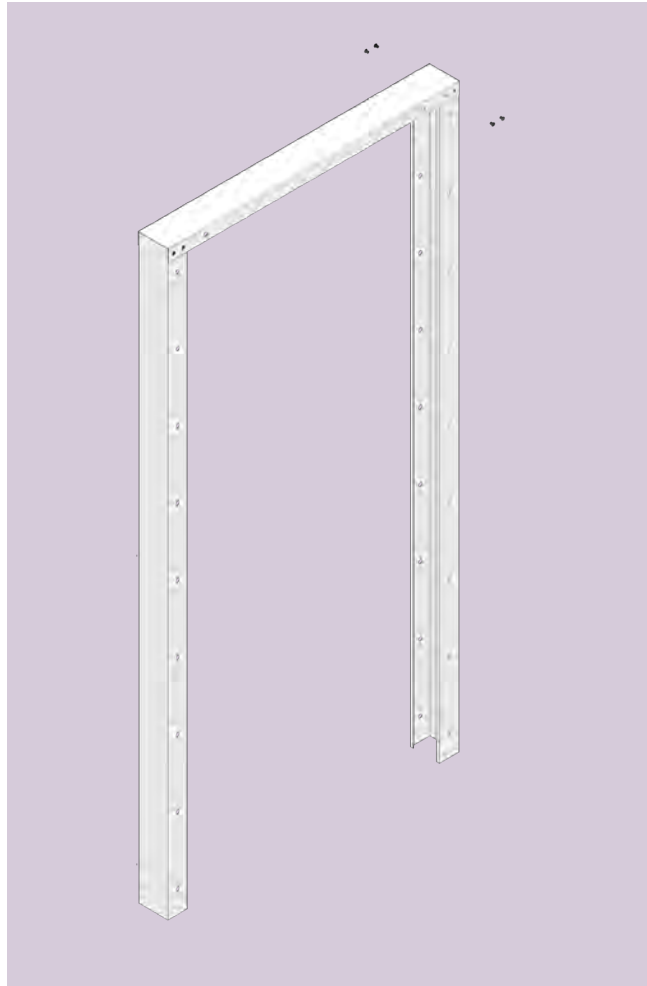
5

ENSAMBLAJE PERFIL C Y U

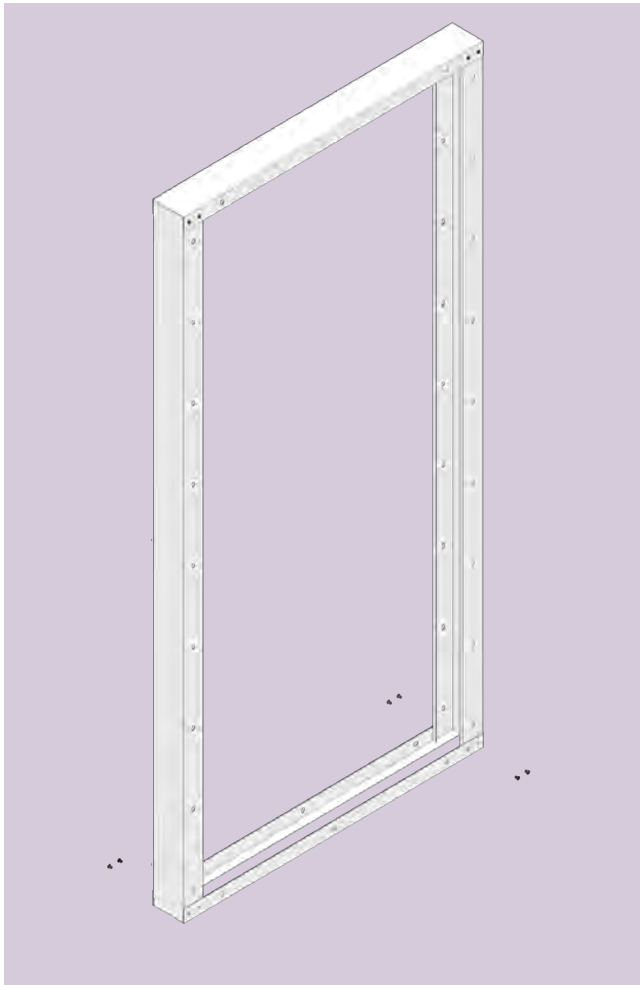


6

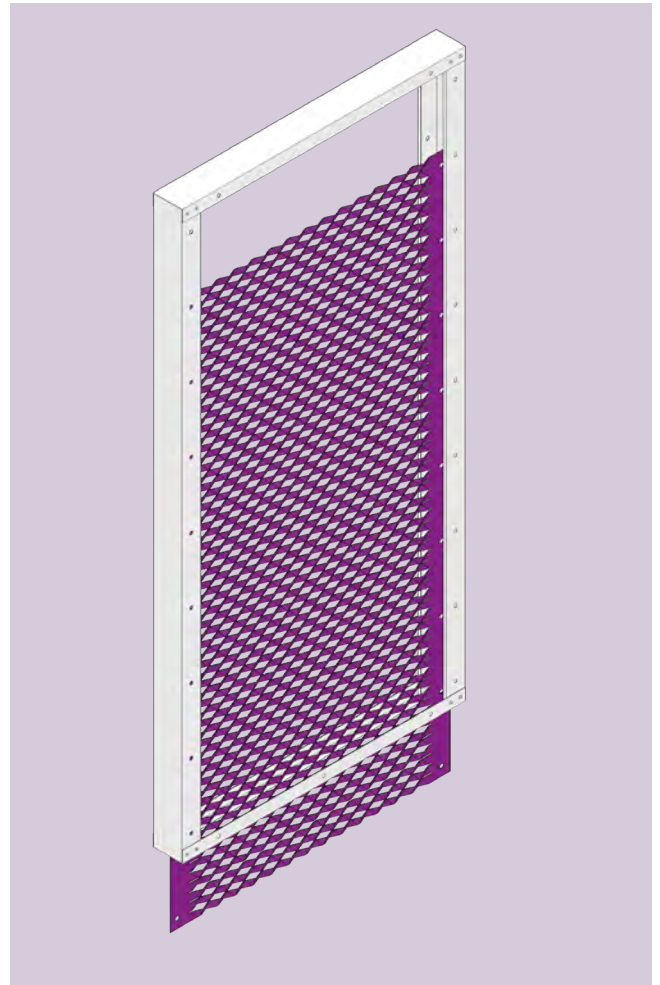
ENSAMBLAJE PERFIL C



7 ENSAMBLAJE PERFILES ÁNGULO

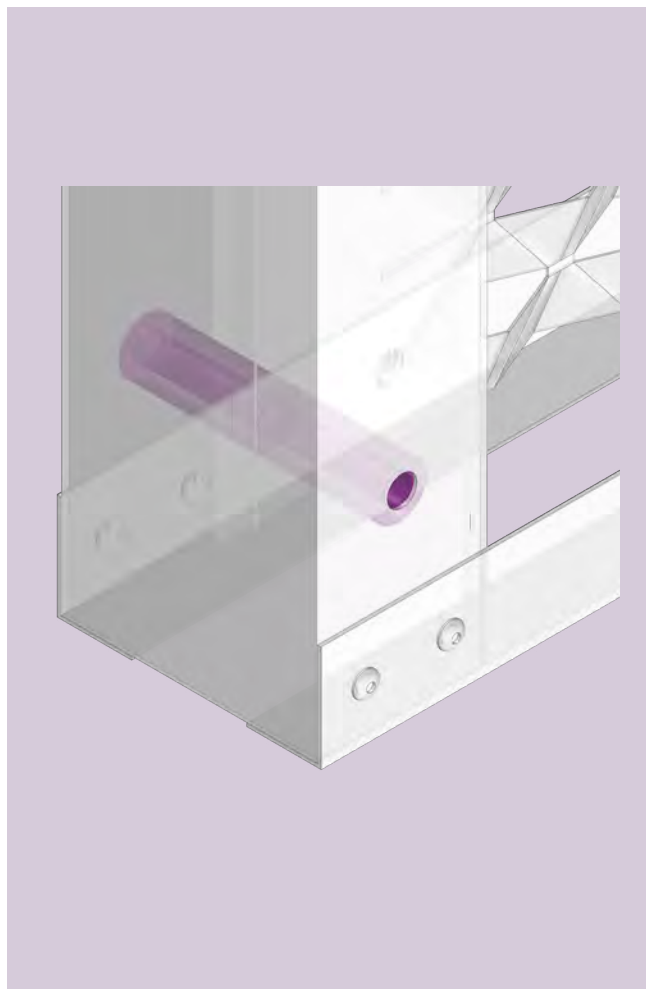


8 ENSAMBLAJE LÁMINA



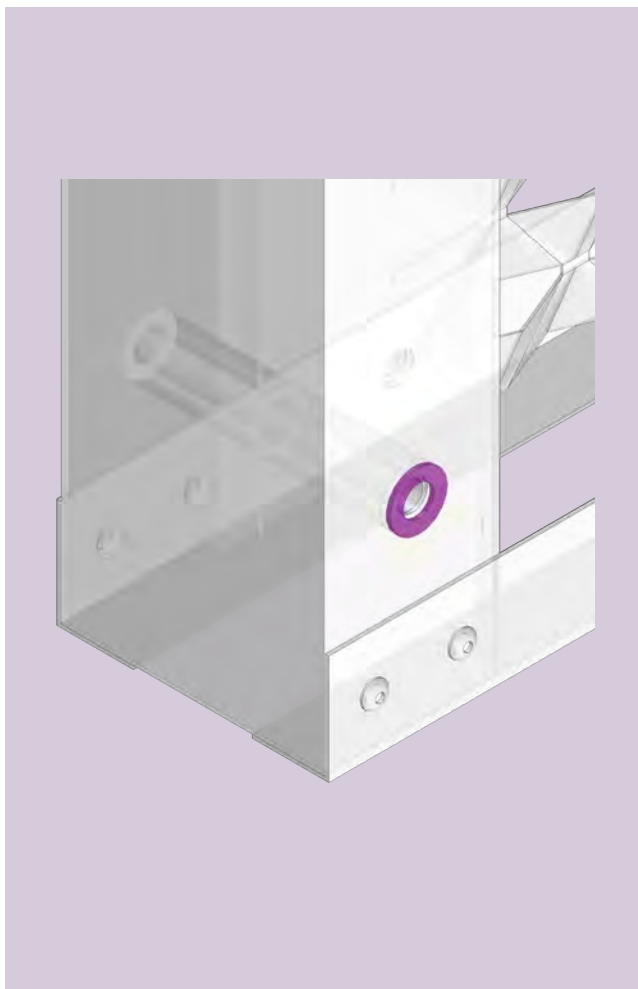
9

POSICIONAR MANGUERAS DE CAUCHO



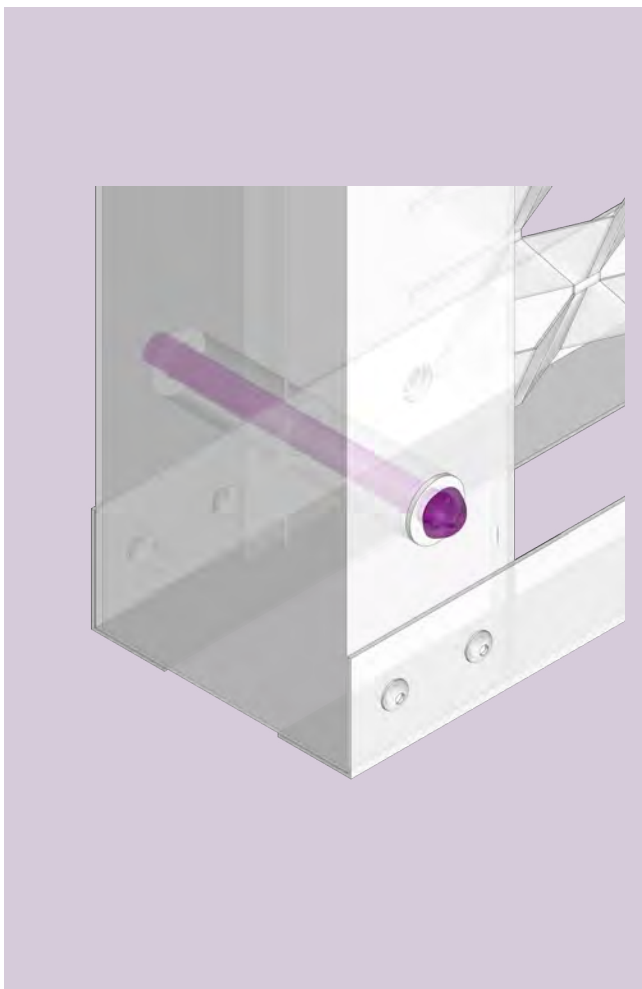
10

POSICIONAR GOLILLA

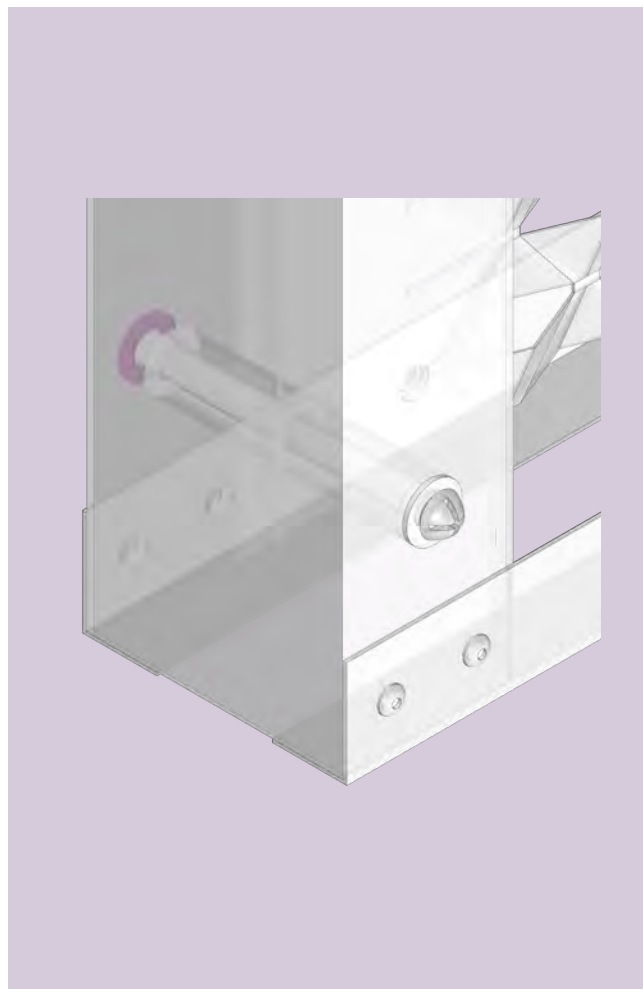




ENSAMBLAJE DE PERNO COCINA

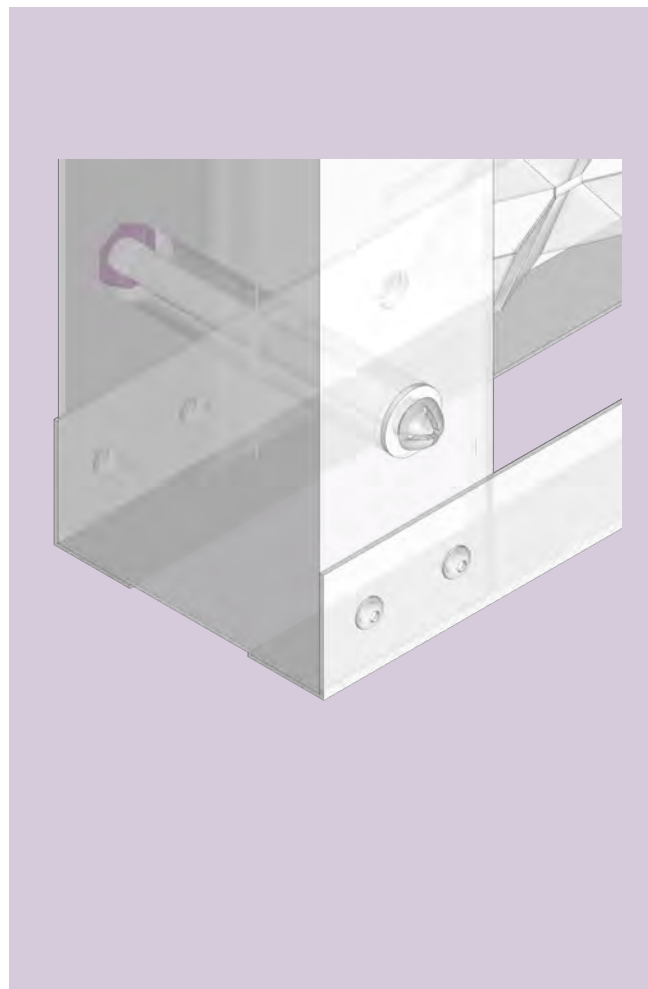


POSICIONAR GOLILLA



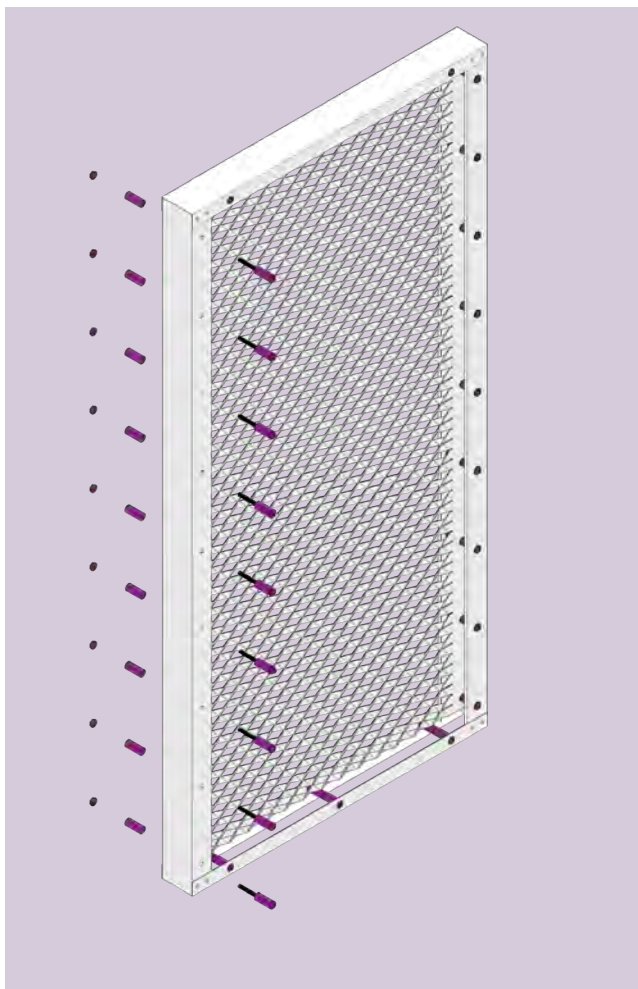
13

FIJACIÓN DE TUERCA



14

REPETIR PASO 9 AL 13 EN LAS 22
FIJACIONES RESTANTES



15

MONTAJE DE PERFILES OMEGA

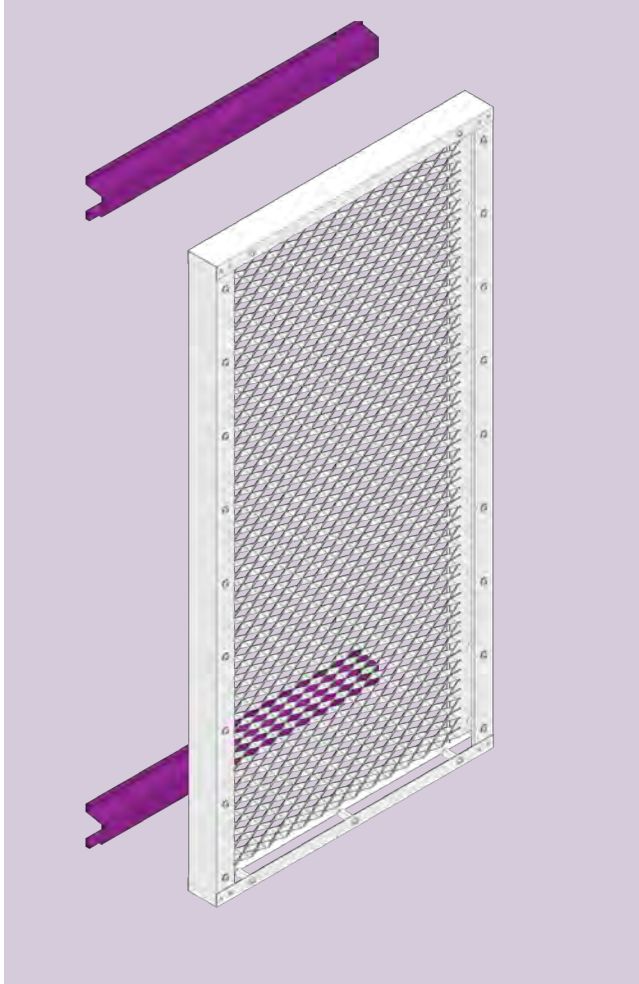
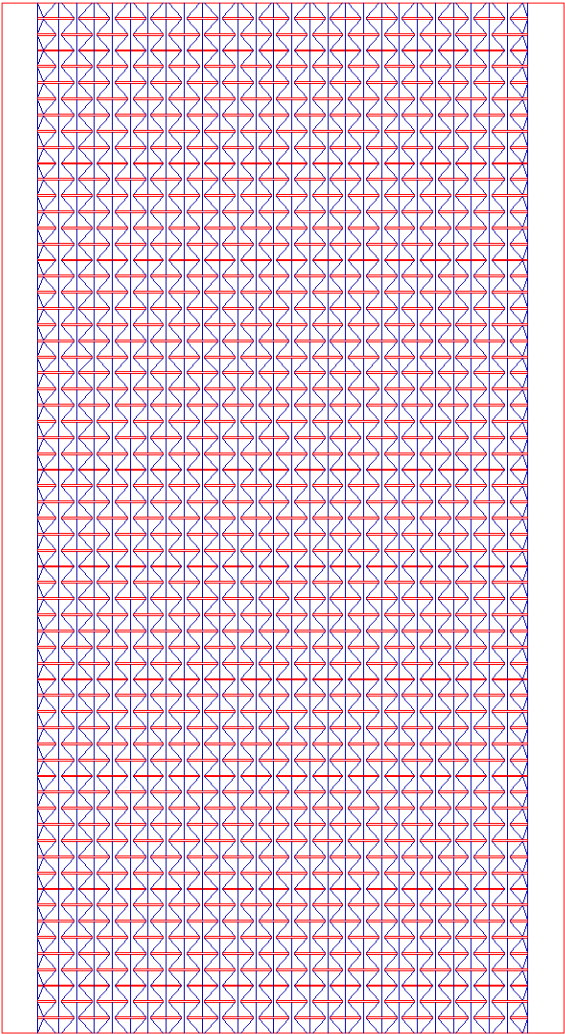


Fig. 71. Proceso de fabricación y montaje del prototipo 1 Kirigami acero
Fuente: Elaboración propia (2026).

REGISTRO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

Una vez definidos los procedimientos de fabricación, se ejecutó el ensamblaje del primer prototipo mediante la secuencia descrita anteriormente. El registro fotográfico documenta las principales etapas constructivas, permitiendo verificar la materialización del sistema y la factibilidad de los procesos de corte, plegado, perforación y unión empleados durante su fabricación.



ARCHIVO DIGITAL DEL PATRÓN KIRIGAMI

Para la fabricación de la lámina kirigami, el archivo digital fue enviado a corte láser; sin embargo, debido a las limitaciones del equipo disponible, únicamente se ejecutaron las líneas de corte correspondientes al patrón (indicadas en rojo), ya que las líneas de pliegue no pudieron ser grabadas sobre la superficie del material. En consecuencia, el plegado de la geometría debió realizarse posteriormente de forma manual.

Fig. 72 Archivo digital patrón kirigami piramidal.
Fuente: Elaboración propia (2026)

LÁMINA POSTERIOR AL CORTE LÁSER



Resultado del proceso de corte láser sobre la plancha de acero galvanizado de 0,5 mm. La fabricación consideró únicamente las líneas de corte del patrón kirigami

Fig. 73 Lámina acero cortada.
Fuente: Elaboración propia (2026)

PLEGADO MANUAL DE LA LÁMINA KIRIGAMI



Fig. 74 Lámina acero laminado plegada con geometría kirigami piramidal.
Fuente: Elaboración propia (2026)

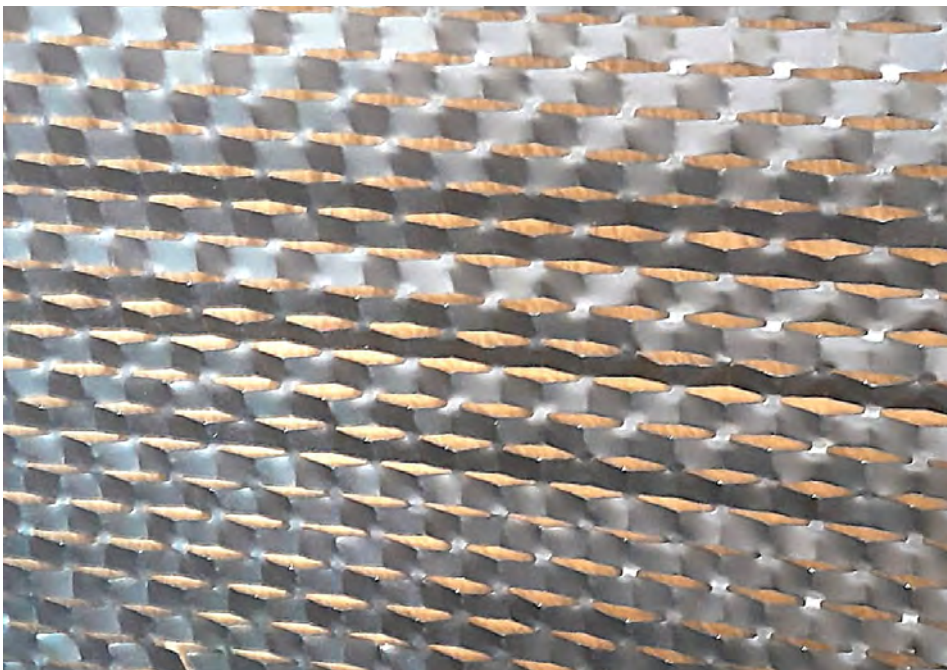


Fig. 75 Lámina acero laminado plegada con geometría kirigami piramidal.
Fuente: Elaboración propia (2026)



Fig. 76 Proceso de plegado con cincel de la plancha de acero laminado.
Fuente: Elaboración propia (2026)

Una vez obtenida la lámina mediante corte láser, la conformación tridimensional del patrón se realizó manualmente, siguiendo la secuencia de pliegues mountain y valley definida en el diseño geométrico desarrollado en el Capítulo 5. Debido a que las líneas de plegado no fueron grabadas durante el proceso de fabricación, cada unidad geométrica se conformó individualmente mediante el uso de cincel y martillo, reproduciendo la configuración piramidal propuesta. Este procedimiento permitió materializar la geometría del patrón.

ENSAMBLAJE DEL MARCO ESTRUCTURAL

Una vez preparados los perfiles, se ensambló el marco mediante uniones mecánicas con remaches, conformando la estructura resistente del panel.



Fig. 77 Detalle de fijaciones con remaches y pernos
Fuente: Elaboración propia (2026)

Fig. 78 Marco estructural de perfiles de metalcon para prototipo 1 kirigami acero laminado. Fuente: Elaboración propia (2026)

ENSAMBLAJE DE LA LÁMINA KIRIGAMI AL MARCO

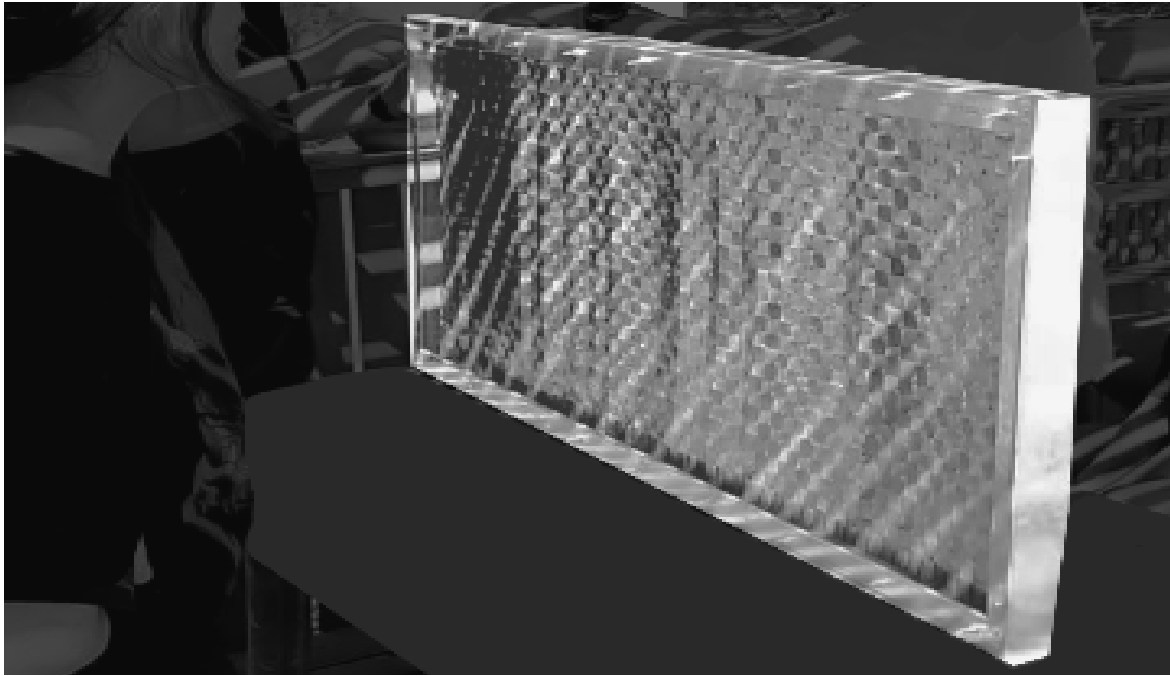


Fig. 79 Montaje de la lámina al marco
Fuente: Elaboración propia (2026)

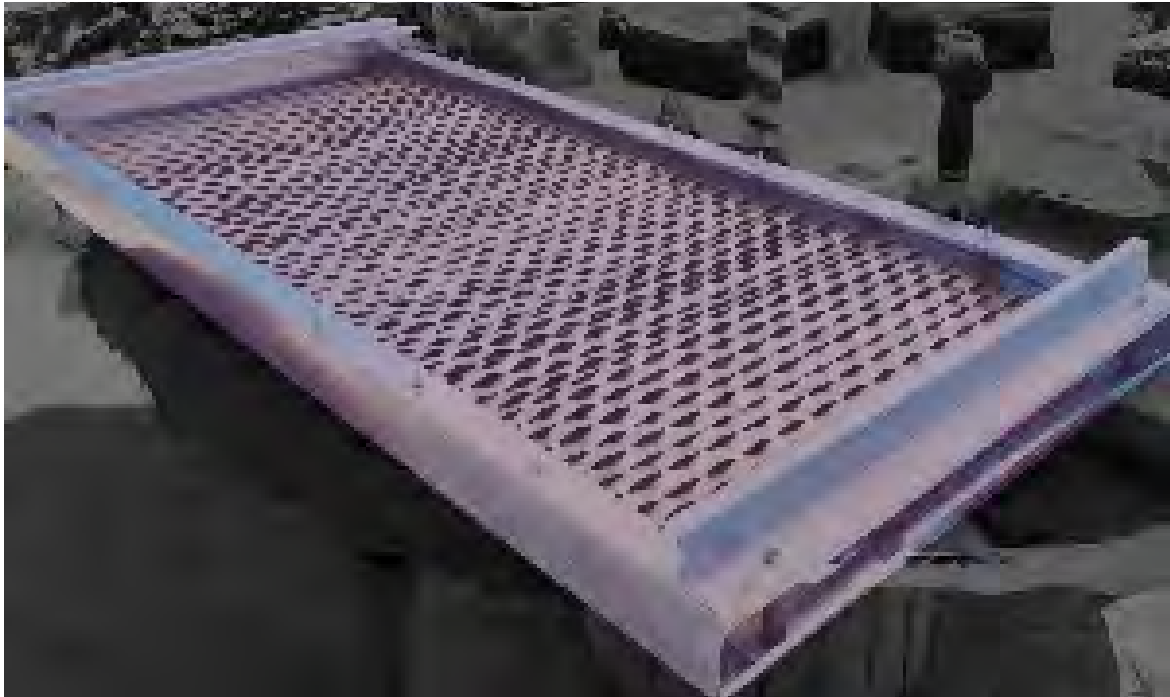


Fig. 80 Montaje de la lámina al marco
Fuente: Elaboración propia (2026)



Fig. 81. Fotografía detalle de fijación prototipo 1
Fuente: Elaboración propia (2026)

El ensamblaje de la lámina kirigami representó una de las etapas más complejas del proceso constructivo. La fijación requirió un elevado número de uniones mecánicas distribuidas en todo el perímetro del panel, incrementando significativamente el tiempo de montaje. Adicionalmente, cada punto de fijación debía incorporar un sistema de protección mediante mangueras de caucho ubicadas a ambos lados de la lámina para evitar el contacto directo entre el acero y la estructura metálica. Esta configuración exigía posicionar simultáneamente el perno, las golillas, la lámina y las dos piezas de caucho dentro del perfil tipo C antes de instalar la tuerca, dificultando considerablemente el proceso de ensamblaje y la manipulación de los componentes.

6.3 EVALUACIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

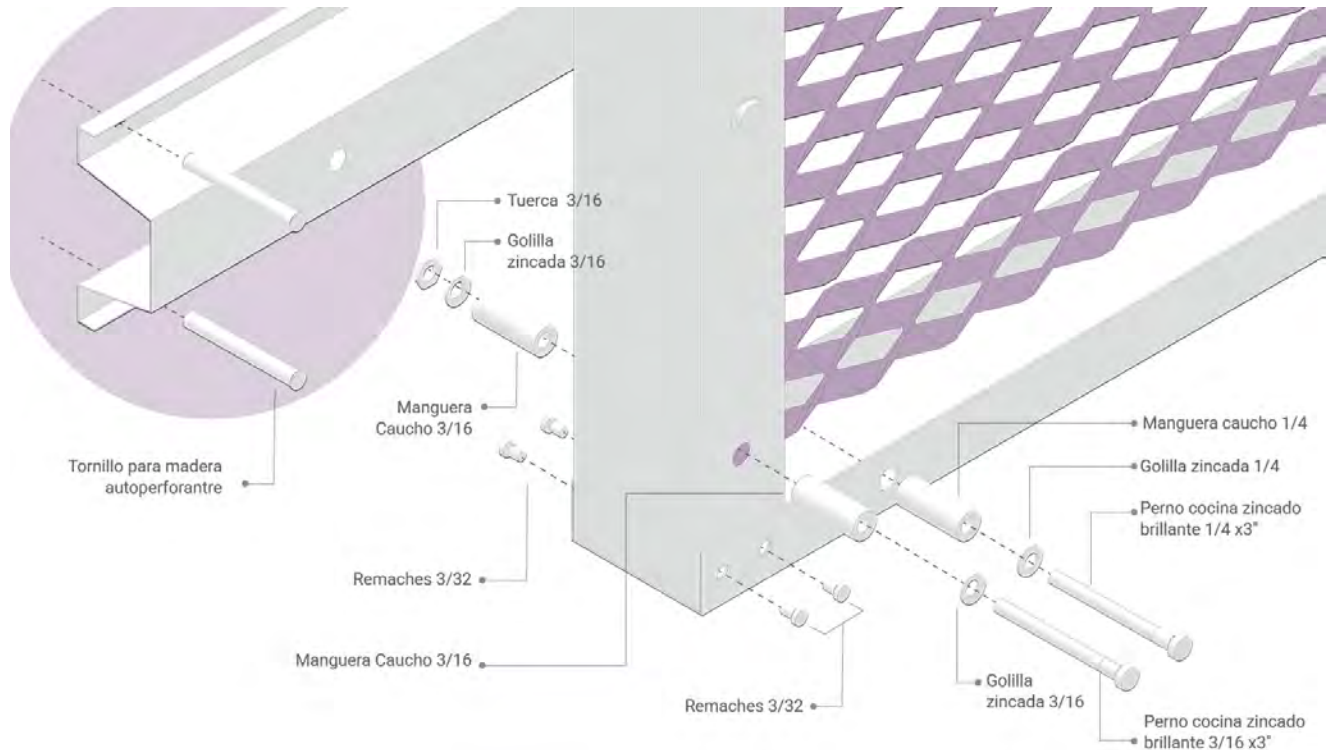


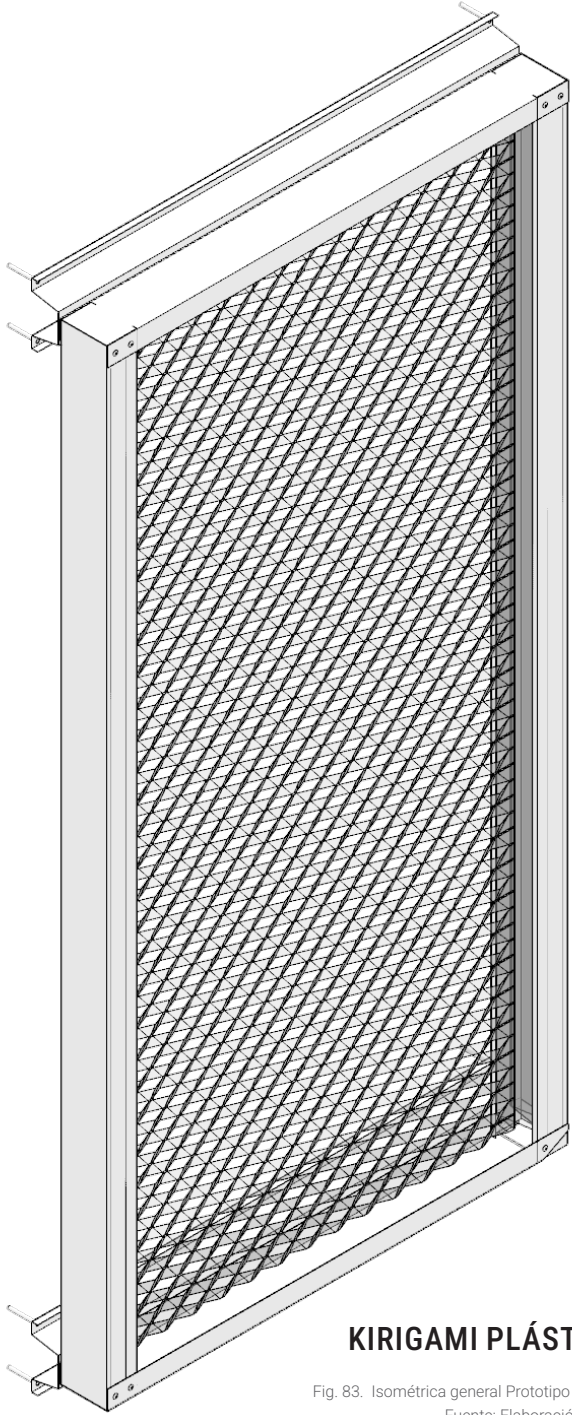
Fig 82. Detalle de fijaciones prototipo 1 kirigami acero.
Fuente: Elaboración propia (2026)

La fabricación del primer prototipo permitió validar la factibilidad constructiva del sistema e identificar las principales limitaciones del diseño. El sistema de fijaciones resultó excesivamente complejo, debido al elevado número de componentes requeridos y a las dificultades de alineación derivadas de la perforación manual de la estructura, aumentando los tiempos de ensamblaje. Asimismo, cada perforación y fijación mecánica constituye un potencial punto de ingreso de humedad y, por consiguiente, un posible foco de oxidación de la estructura metálica.

Estas observaciones orientaron el desarrollo del segundo prototipo, enfocado en simplificar el sistema de fijación y reducir los potenciales puntos de corrosión.

6.4 DESARROLLO DEL PROTOTIPO II

El segundo prototipo corresponde a una evolución del sistema constructivo desarrollado en la etapa anterior, incorporando una serie de modificaciones orientadas a optimizar la fabricación, el ensamblaje y la integración del panel captador. Manteniendo las dimensiones generales del marco estructural, la principal variación consiste en el reemplazo de la lámina kirigami de acero galvanizado por una lámina de PET de 0,5 mm de espesor, permitiendo evaluar experimentalmente la influencia del material sobre la eficiencia de captación sin alterar la geometría kirigami previamente definida.



KIRIGAMI PLÁSTICO PET

Fig. 83. Isométrica general Prototipo 2 - Kirigami PET.
Fuente: Elaboración propia (2026).

CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL DEL PANEL

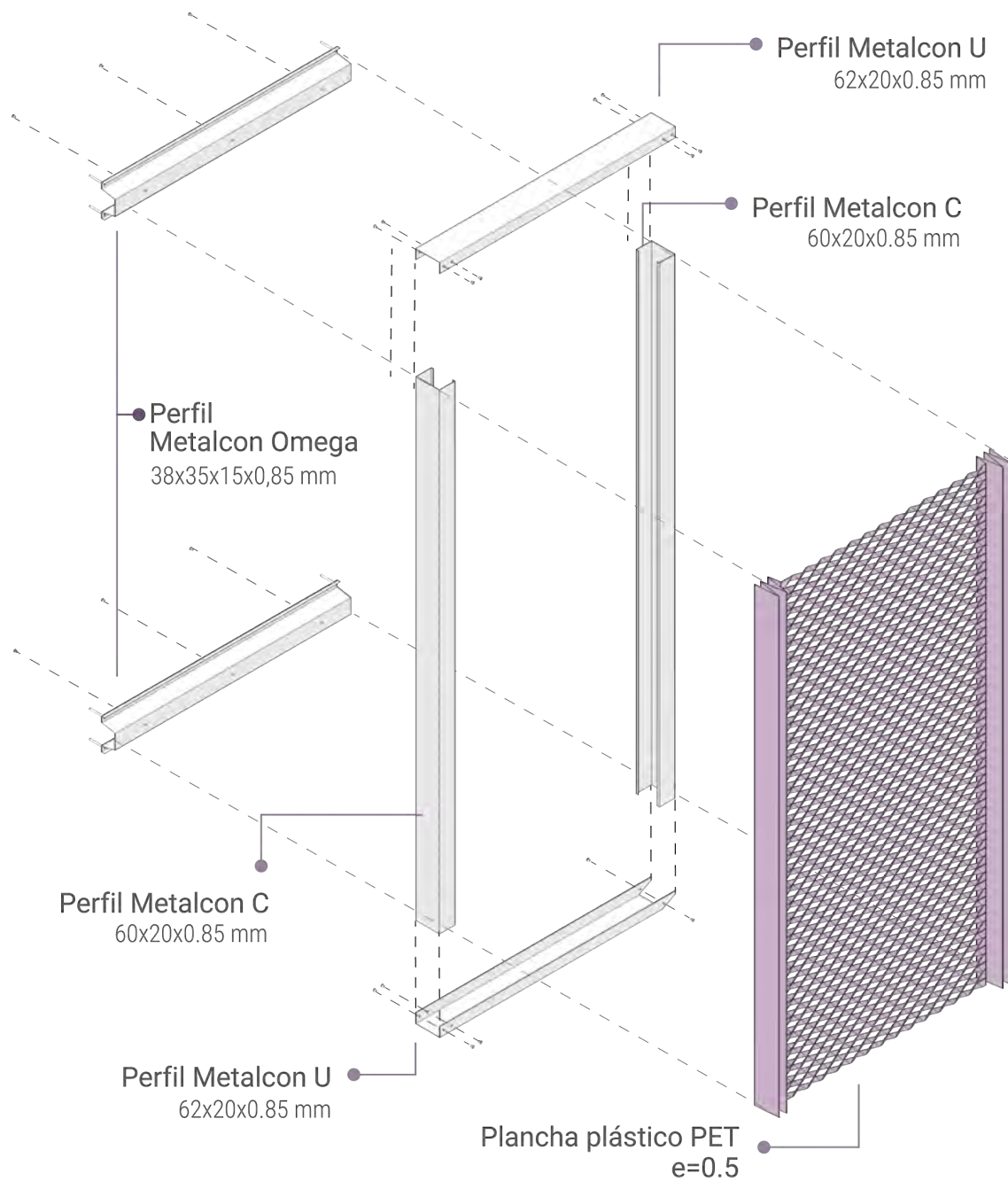


Fig. 84. Isométrica explotada estructural prototipo 2 - Kirigami PET. Fuente: Elaboración propia (2026).

DOCUMENTACIÓN TÉCNICA DEL PROTOTIPO

PLANOS GENERALES

VISTA FRONTAL Esc 1:10

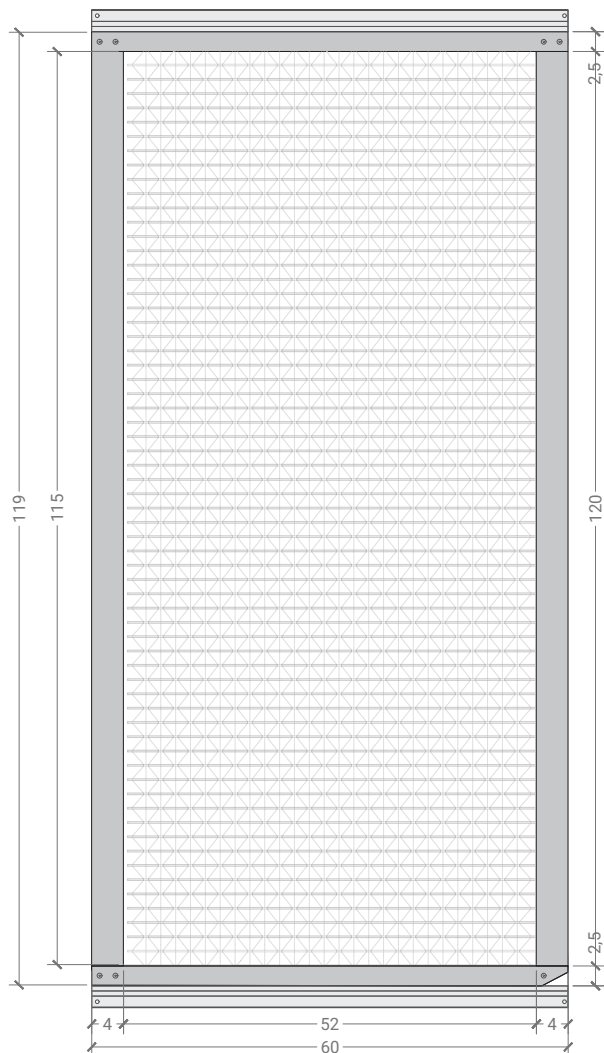


Imagen 85. Planimetría - vista frontal prototipo 2
Fuente: Elaboración propia

VISTA LATERAL Esc 1:10

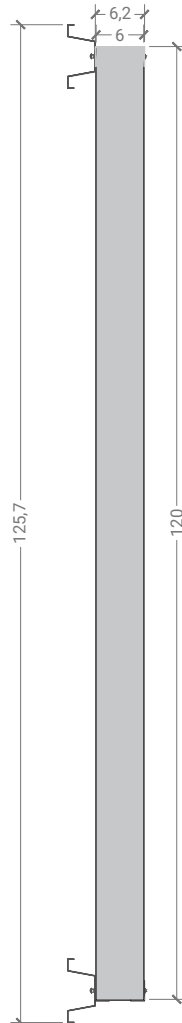


Imagen 86. Planimetría - vista lateral prototipo 2
Fuente: Elaboración propia

VISTA POSTERIOR Esc 1:10

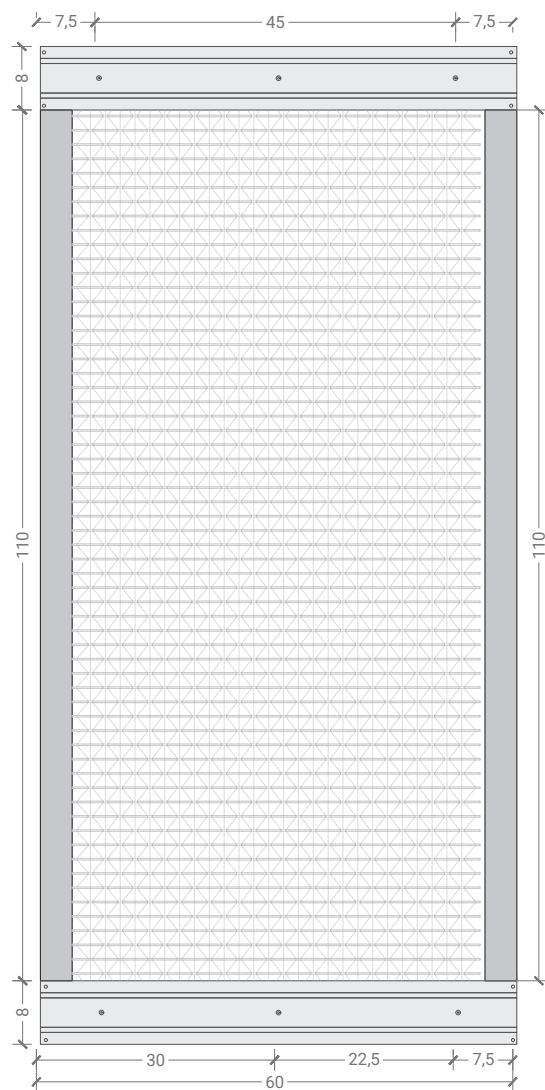


Imagen 87. Planimetría - vista lateral prototipo 2
Fuente: Elaboración propia

VISTA SUPERIOR Esc 1:10

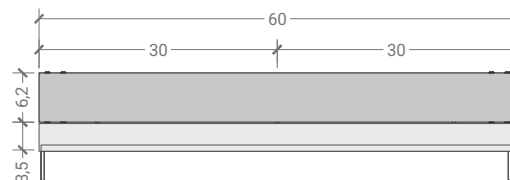


Imagen 88. Planimetría - vista lateral prototipo 2
Fuente: Elaboración propia

VISTA INFERIOR Esc 1:10

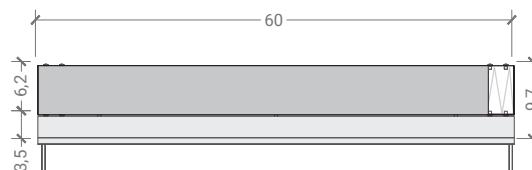


Imagen 89. Planimetría - vista lateral prototipo 2
Fuente: Elaboración propia

DETALLES DE FIJACIONES

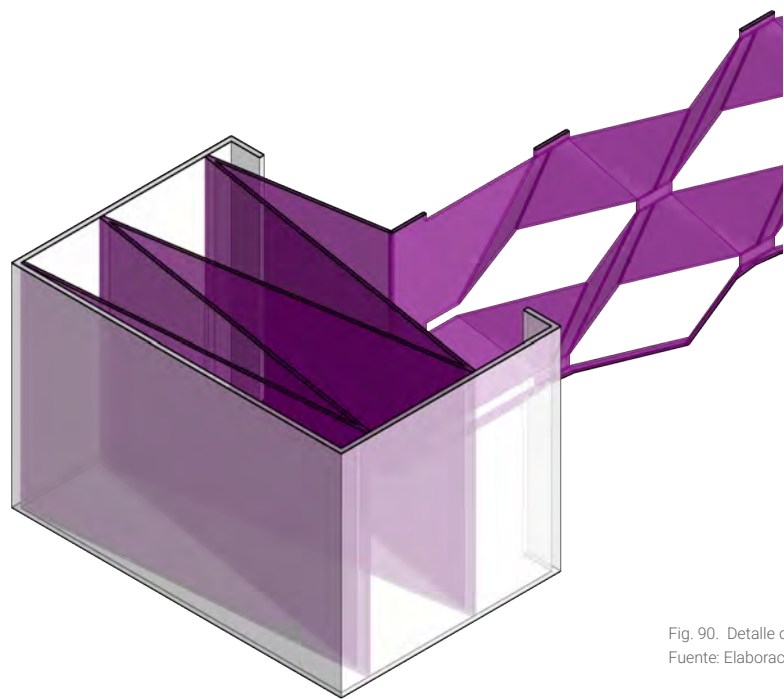


Fig. 90. Detalle de fijaciones prototipo 2 kirigami PET
Fuente: Elaboración propia (2026).

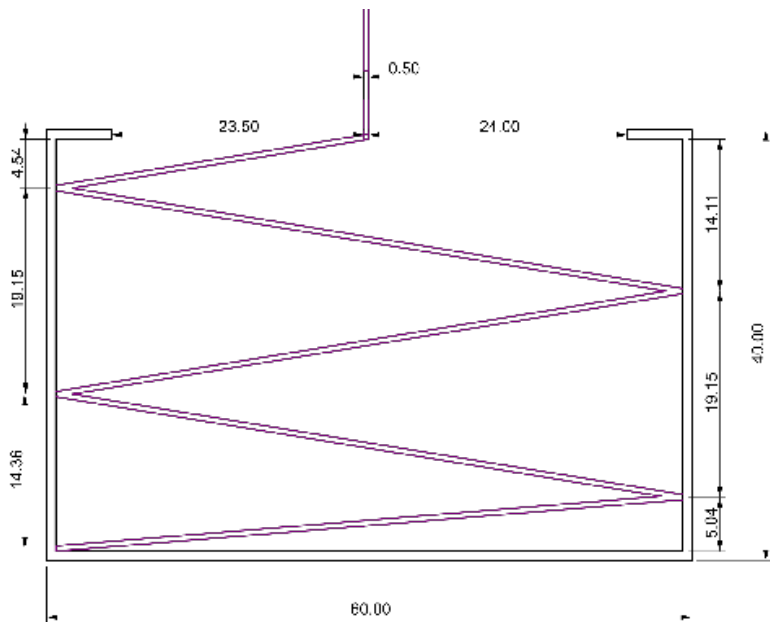
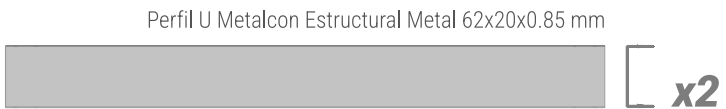
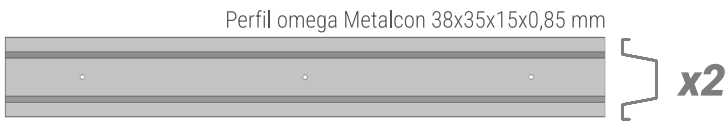


Fig. 91. Plano detalle de fijaciones prototipo 2 kirigami PET
Fuente: Elaboración propia (2026).

DESPIECE DEL PANEL

PERFILES ESTRUCTURALES



FIJACIONES

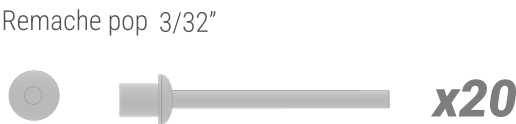
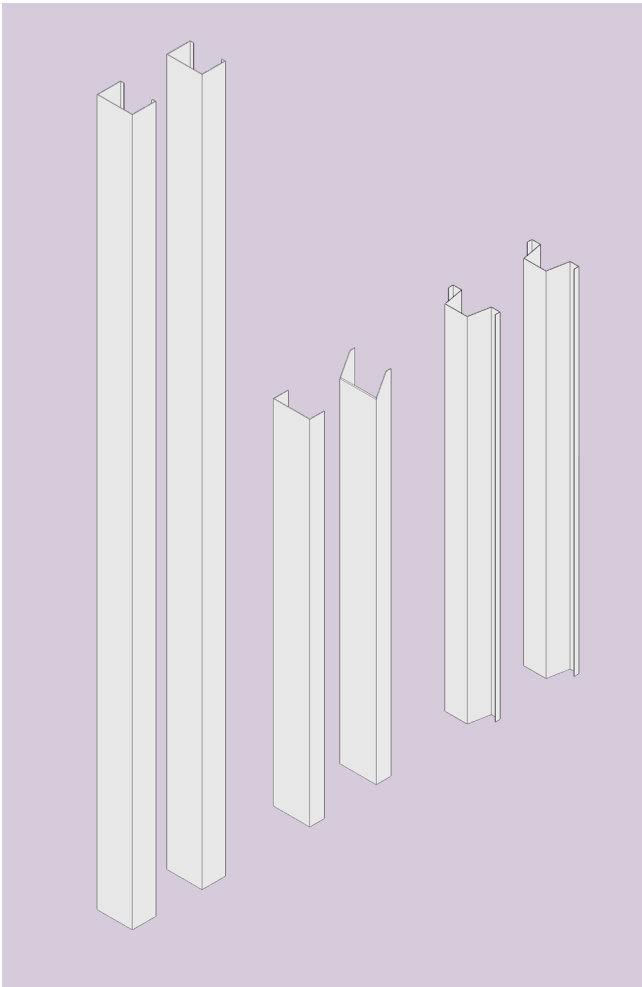


Fig. 92. Despiece prototipo 2 Kirigami PET
Fuente: Elaboración propia (2026).

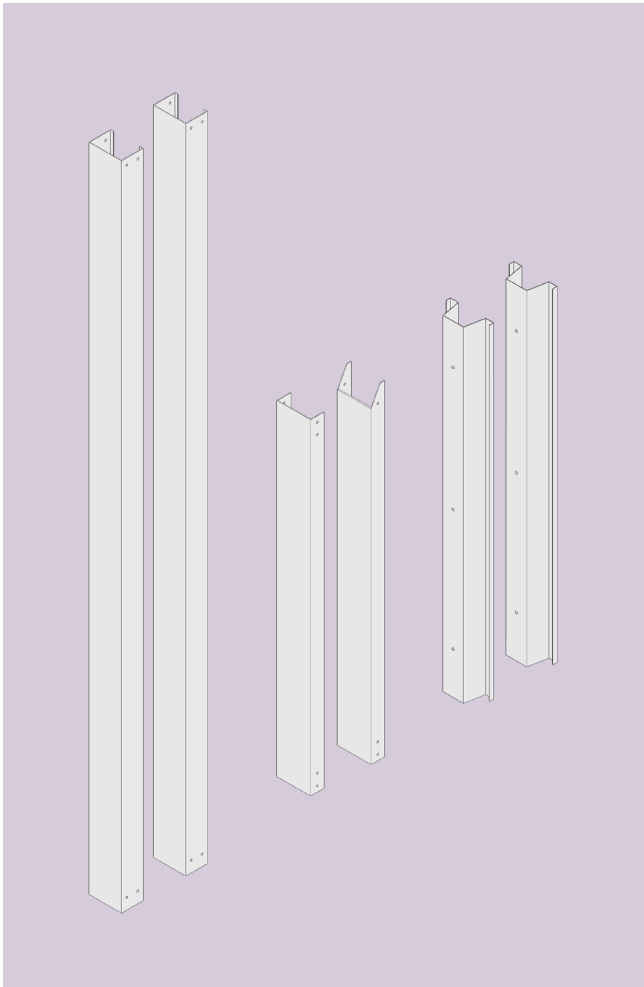
PREPARACIÓN DE PERFILES



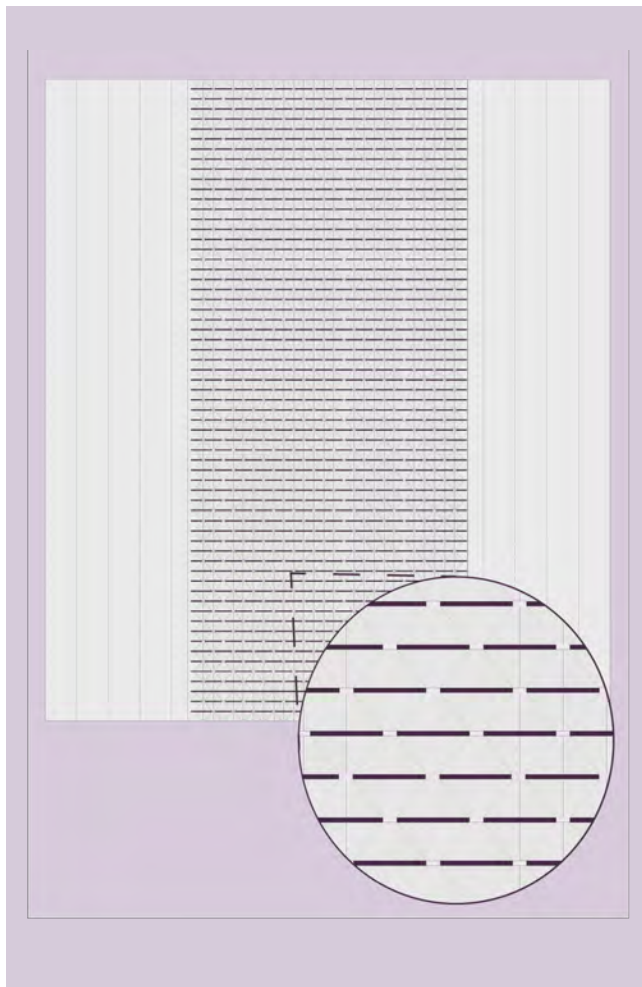
CORTE DE PERFILES



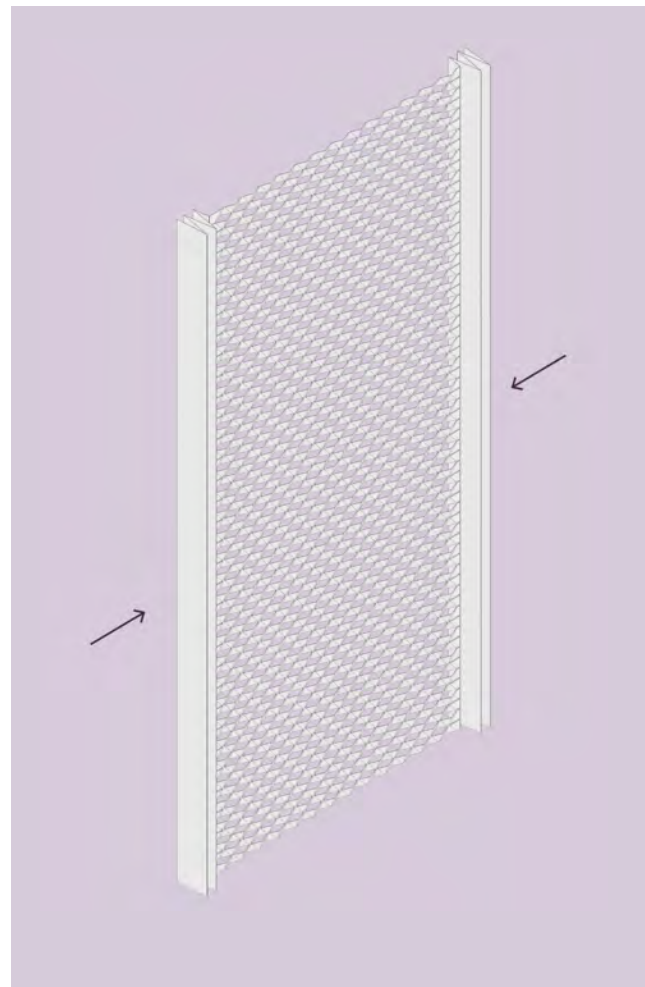
PERFORACIÓN DE PERFILES



3 CORTE DE LÁMINA



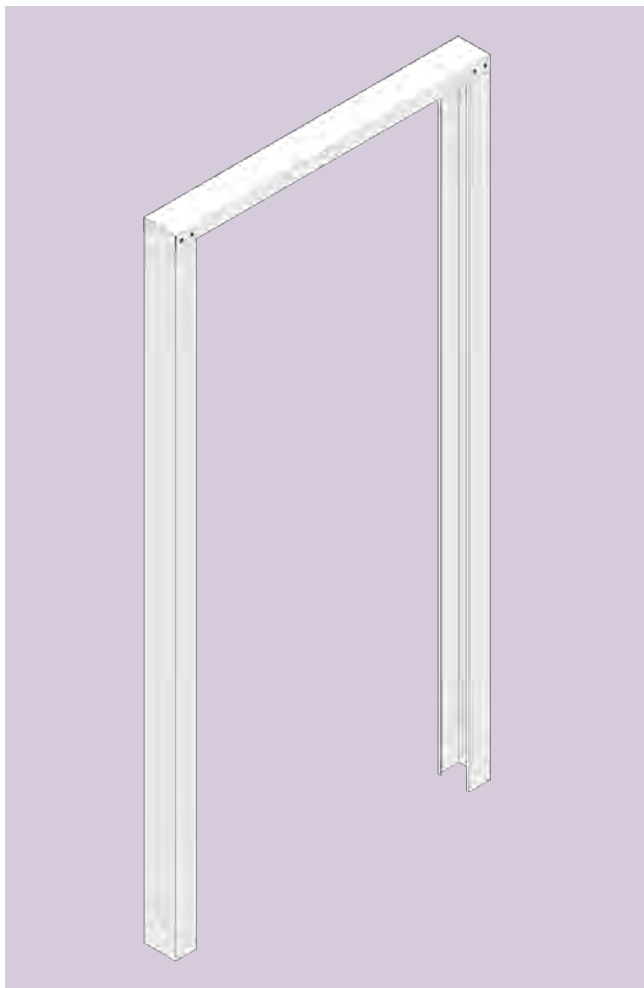
4 PLEGADO DE LÁMINA



PREPARACIÓN DE PERFILES

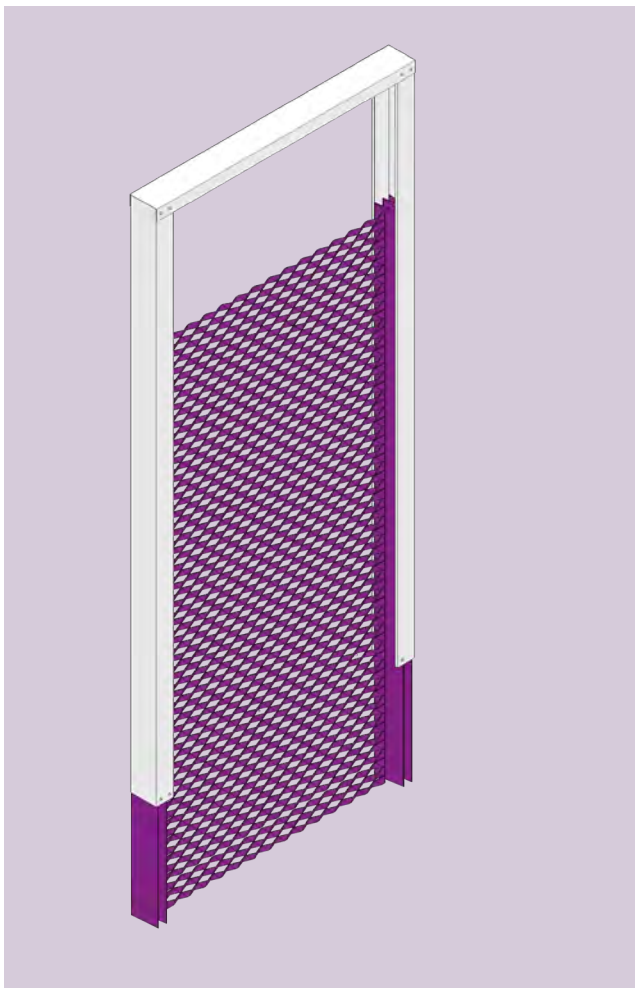
1

ENSAMBLAJE PERFILES C CON PERFIL
U SUPERIOR

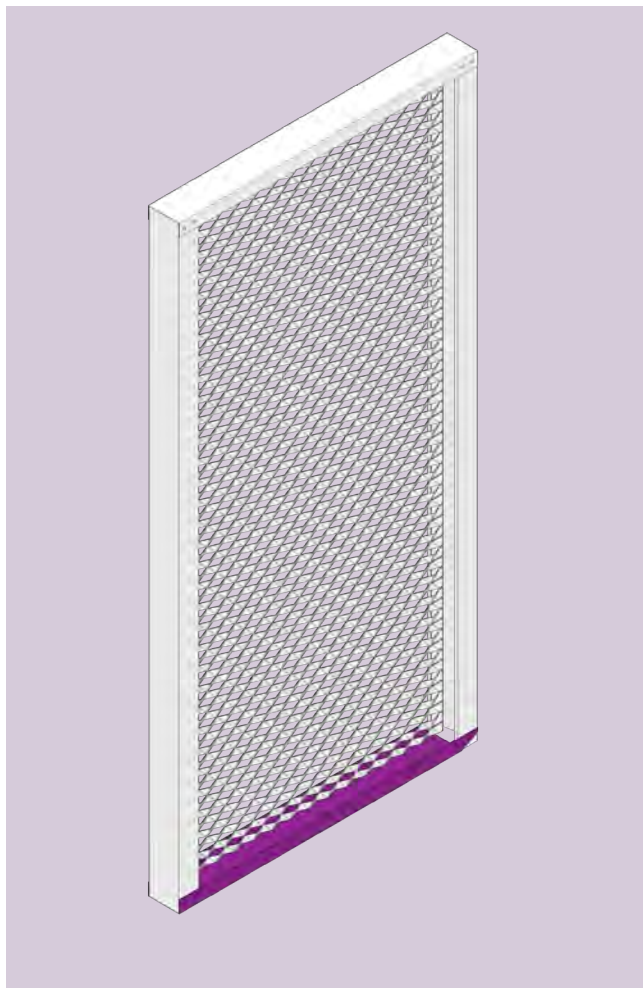


2

ENSAMBLAJE LÁMINA KIRIGAMI



3 FIJACIÓN PERFIL U INFERIOR



4 MONTAJE DE PERFILES OMEGA

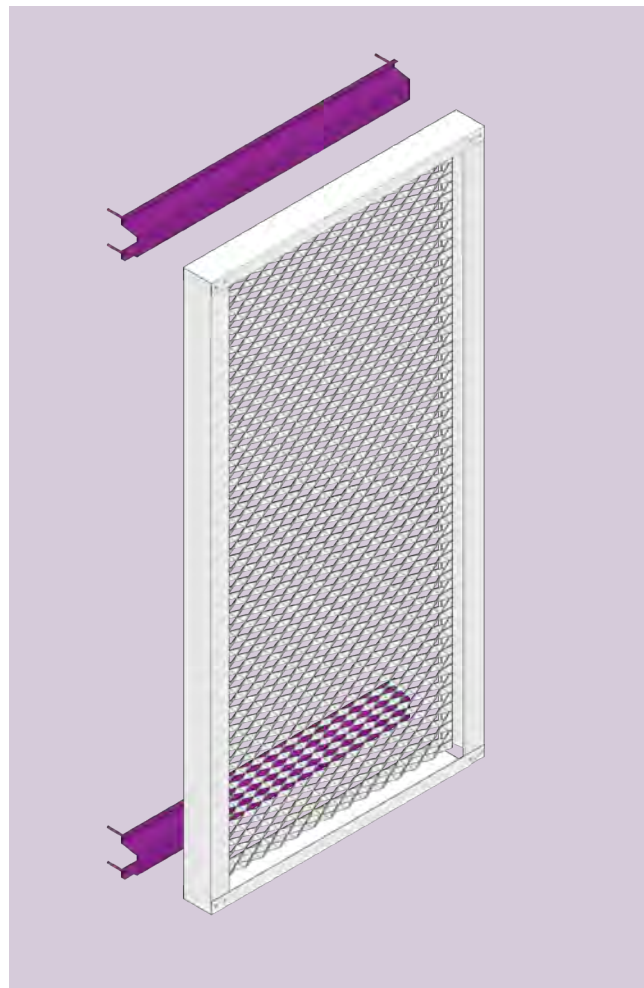


Fig. 93. Proceso de fabricación y montaje prototipo 2 Kirigami PET
Fuente: Elaboración propia (2026).

REGISTRO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

ARCHIVO DIGITAL DEL PATRÓN KIRIGAMI

En el segundo prototipo, el archivo digital del patrón kirigami fue adaptado para incorporar pliegues laterales que permiten el encaje de la lámina dentro del perfil C del sistema estructural. Esta modificación responde exclusivamente a requerimientos de ensamblaje, manteniendo sin variaciones la geometría kirigami y los parámetros definidos durante la etapa de diseño experimental.

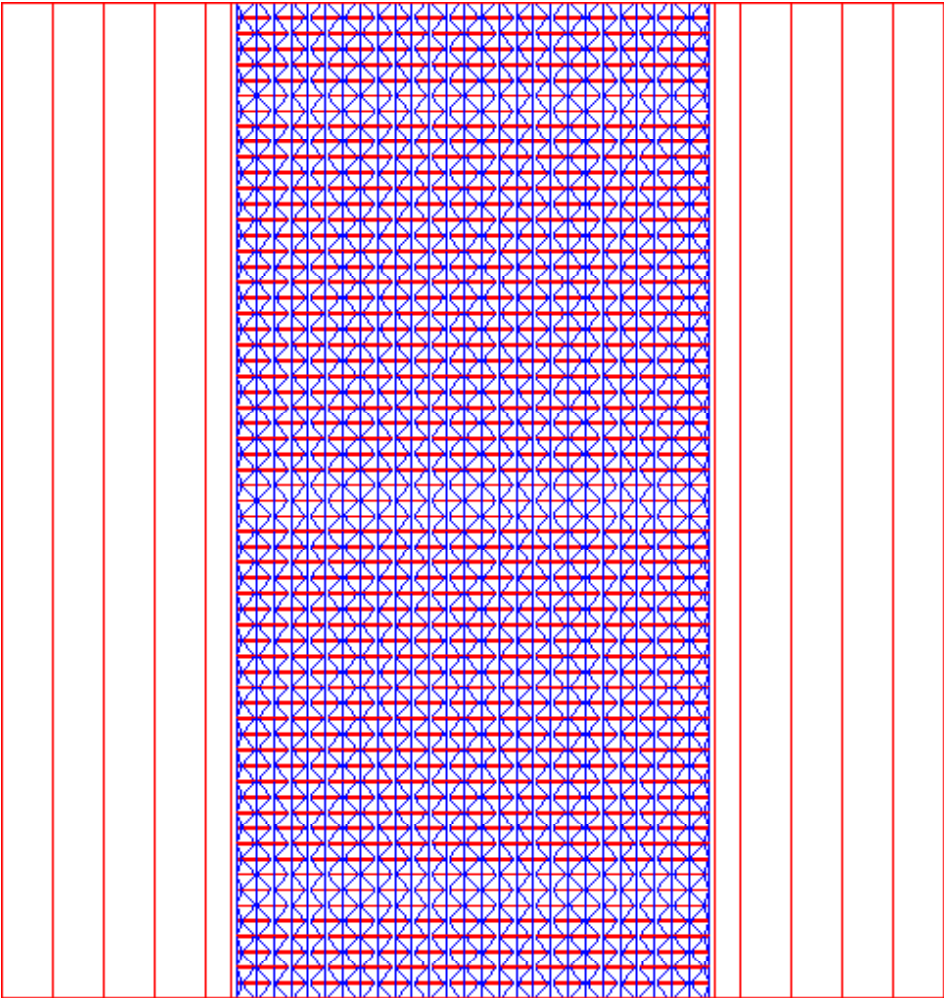


Fig. 94. Archivo digital patrón kirigami piramidal.
Fuente: Elaboración propia (2026)

Previo a la fabricación del panel en PET de 0,5 mm de espesor, fue necesario realizar una serie de ensayos para calibrar los parámetros de operación de la máquina de corte láser. Las primeras pruebas evidenciaron distintas dificultades, entre ellas el sobrecalentamiento del material, que provocaba deformaciones y zonas quemadas, así como configuraciones de baja potencia que impedían obtener un corte completo o un grabado suficientemente definido para facilitar los pliegues posteriores. A partir de estas pruebas iterativas se determinaron los parámetros de operación más adecuados, estableciendo una intensidad de 12 y velocidad de 100 para el grabado, y una intensidad de 30 y velocidad de 100 para el corte. Esta calibración permitió obtener piezas con cortes limpios y líneas de pliegue claramente definidas, asegurando la repetibilidad del proceso de fabricación y la calidad dimensional del prototipo.

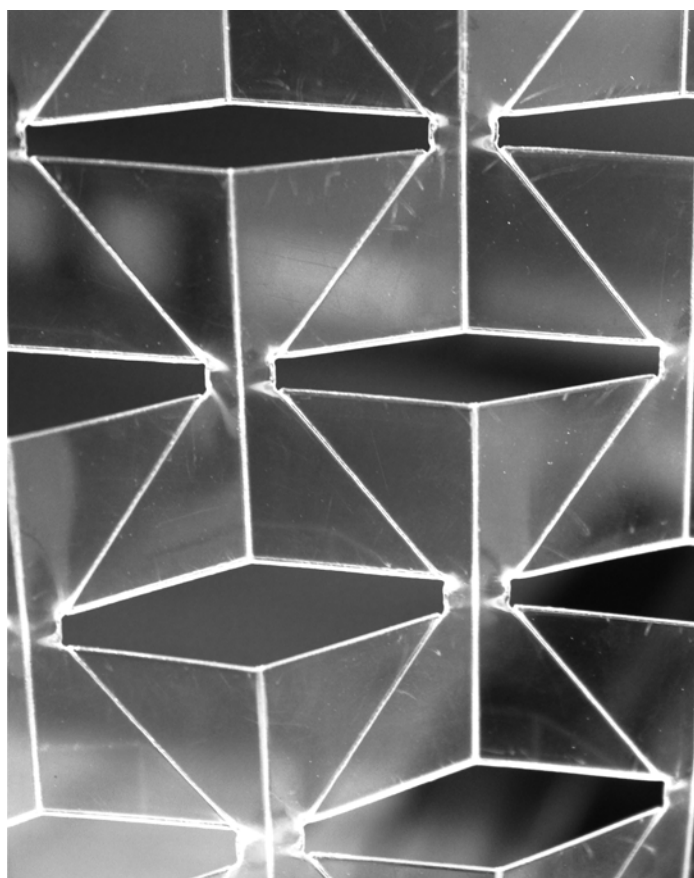


Fig. 95. Archivo digital patrón kirigami piramidal.
Fuente: Elaboración propia (2026)



Fig. 96 Archivo digital patrón kirigami piramidal.
Fuente: Elaboración propia (2026)

La incorporación de pliegues laterales en el patrón digital permitió que la lámina quedara contenida dentro de los perfiles estructurales, simplificando el proceso de montaje, reduciendo el número de componentes y disminuyendo los potenciales puntos de corrosión asociados a uniones mecánicas expuestas. De esta manera, la geometría kirigami se mantuvo inalterada, modificándose únicamente los elementos destinados a su integración con el marco estructural.



Fig. 97 Archivo digital patrón kirigami piramidal.
Fuente: Elaboración propia (2026)

Como parte de esta optimización también se rediseñó el sistema recolector inferior. En reemplazo de los perfiles ángulo utilizados en el primer prototipo, se incorporó un perfil U galvanizado modificado mediante un corte en uno de sus extremos, permitiendo conformar una canaleta integrada para la conducción del agua hacia el punto de descarga. El funcionamiento del sistema se basa en una ligera pendiente generada por la diferencia de longitud entre los perfiles verticales tipo C, de 120 cm y 119 cm, respectivamente, produciendo una inclinación suficiente para favorecer el escurrimiento gravitacional del agua recolectada sin requerir elementos adicionales de conducción.

6.5 COSTOS Y FACTIBILIDAD DE FABRICACIÓN

PRESUPUESTO 1 - KIRIGAMI ACERO

Nº	PRODUCTO	Dimensiones c/u			PRECIO	Unidades A Comprar	Dimension material Comprado	Dimension material Utilizado	Merma	Valor TOTAL	Valor Unitario Panel
		Ancho	Alto	Largo							
1	MARCO DE PANEL										
1.1	Perfil C Metalcon Estructural Metal			2,4	\$ 2.990	1	2,4	2,4	0	\$2.990	\$2.990
1.2	Estructura Omega Metal			3	\$ 3.620	1	3	1,2	1,8	\$3.620	\$1.448
1.3	Perfil U Metalcon Estructural Metal			3	\$ 2.650	1	3	0,6	2,4	\$2.650	\$530
1.4	Perfil Angulo Acero			2	\$ 1.480	1	2	1,2	0,8	\$1.480	\$888
2	ATRAPANIEBLAS KIRIGAMI										
2.1	Plancha Acero laminado en frio	0,5	1	3	\$ 10.000	1	3	0,72	2,28	\$10.000	\$2.400

Nº	PRODUCTO	PRECIO UNITARIO	PRECIO caja	caja A Comprar	CANTIDAD caja	Unidades utilizadas	Merma	Valor TOTAL	Valor Unitario Panel
3	FIJACIONES								
3.1	Perno cocina zincado brillante 1/4x3"	\$ 70,9	\$ 7.090	1	100	5	95	\$7.090	\$355
3.2	Golilla zincada 1/4	\$ 43,8	\$ 2.190	1	50	10	40	\$2.190	\$438
3.3	Tuerca cocina 1/4 hexagonal	\$ 30,9	\$ 3.090	1	100	5	95	\$3.090	\$155
3.4	Remaches 3/32	\$ 20	\$ 20	16	1	16	0	\$320	\$320
3.5	Perno cocina zincado brillante 3/16x3"	\$ 50,9	\$ 5.090	1	100	18	82	\$5.090	\$916
3.6	Golilla zincada 3/16"	\$ 14,9	\$ 1.490	1	100	36	64	\$1.490	\$536
3.7	Tuerca cocina 3/16" hexagonal	\$ 26,9	\$ 2.690	1	100	18	82	\$2.690	\$484
3.8	Tornillo madera 1 1/4"	\$ 61,6	\$ 1.540	1	25	8	17	\$1.540	\$493

Nº	PRODUCTO	Dimensiones c/u			PRECIO	Unidades A Comprar	Dimension material Comprado	Dimension material Utilizado	Merma	Valor TOTAL	Valor Unitario Panel
		Ancho	Alto	Largo							
4											
1.1	Manguera de caucho 3/16			1	\$ 2.500	1	2	1,8	0,2	\$2.500	\$2.250
1.2	Manguera de caucho 1/4			1	\$ 3.800	1	1	0,5	0,5	\$3.800	\$1.900

TOTAL	\$50.540	\$16.103
-------	----------	----------

Tabla 8 . Presupuesto prototipo 1 panel kirigami acero
Fuente: Elaboración propia (2026)

PRESUPUESTO 2 - KIRIGAMI PET

Nº	PRODUCTO	Dimensiones c/u			PRECIO	Unidades A Comprar	Dimension material Comprado	Dimension material Utilizado	Merma	Valor TOTAL	Valor Unitario Panel
		Ancho	Alto	Largo							
1	MARCO DE PANEL										
1.1	Perfil C Metalcon Estructural Metal			2,4	\$ 2.990	1	2,4	2,4	0	\$2.990	\$2.990
1.2	Estructura Omega Metal			3	\$ 3.620	1	3	1,2	1,8	\$3.620	\$1.448
1.3	Perfil U Metalcon Estructural Metal			3	\$ 2.650	1	3	1,2	2,4	\$2.650	\$1.060
2	ATRAPANIEBLAS KIRIGAMI										
2.1	Plancha Acero laminado en frio	0,5	1	3	\$ 10.000	1	3	0,72	2,28	\$10.000	\$2.400

Nº	PRODUCTO	PRECIO UNITARIO	PRECIO caja	caja A Comprar	CANTIDAD caja	Unidades utilizadas	Merma	Valor TOTAL	Valor Unitario Panel
3	FIJACIONES								
3.1	Perno cocina zincado brillante 1/4x3"	\$ 70,9	\$ 7.090	1	100	4	96	\$7.090	\$284
3.2	Golilla zincada 1/4	\$ 43,8	\$ 2.190	1	50	8	42	\$2.190	\$350
3.3	Tuerca cocina 1/4 hexagonal	\$ 30,9	\$ 3.090	1	100	4	96	\$3.090	\$124
3.4	Remaches 3/32	\$ 20	\$ 20	16	1	16	0	\$320	\$320
3.8	Tornillo madera 1 1/4"	\$ 61,6	\$ 1.540	1	25	8	17	\$1.540	\$493

TOTAL	\$33.490	\$9.468
-------	----------	---------

Tabla 9 . Presupuesto prototipo 2 panel kirigami PET
Fuente: Elaboración propia (2026)

Los presupuestos presentados corresponden a una estimación del costo de los materiales necesarios para fabricar un panel de cada una de las alternativas desarrolladas: kirigami en acero galvanizado y kirigami en PET. Estos valores consideran únicamente el costo de adquisición de perfiles, láminas, fijaciones y demás componentes comerciales, sin incorporar costos asociados a procesos de fabricación, corte, plegado, mano de obra, maquinaria, transporte o montaje.

A partir de esta estimación preliminar es posible observar que la propuesta basada en kirigami PET presenta una reducción significativa del costo respecto al prototipo de acero, disminuyendo desde \$16.103 hasta \$9.468 por panel. Esta diferencia se explica principalmente por la racionalización del sistema de fijaciones y la simplificación de algunos componentes, evidenciando que las decisiones de diseño tienen una incidencia directa en la factibilidad económica del sistema.

Sin embargo, estos presupuestos representan una primera aproximación y no constituyen una propuesta definitiva de fabricación. La selección de la alternativa más conveniente depende también de su desempeño experimental, por lo que en el capítulo siguiente se evalúa comparativamente la eficiencia de captación de los distintos prototipos desarrollados. Los resultados obtenidos permitirán determinar qué material ofrece el mejor equilibrio entre costo, desempeño y factibilidad constructiva

En función de dicha evaluación, es posible que la solución final no corresponda íntegramente a ninguno de los dos prototipos presupuestados, sino a una configuración que combine los elementos con mejor comportamiento de cada uno. En ese escenario, será necesario elaborar un nuevo presupuesto que refleje la composición definitiva del sistema constructivo validado experimentalmente.

07

***CAPÍTULO
SIETE***

EVALUACIÓN Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

7.1 ESTRATEGIA DE VALIDACIÓN (TRL 4)

7.2 ENSAYO PRELIMINAR EXPLORATORIO

7.3 PROTOCOLO EXPERIMENTAL

7.4 ENSAYO PILOTO

7.5 ENSAYO COMPARATIVO CONTROLADO

07

EVALUACIÓN Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

7.1 ESTRATEGIA DE VALIDACIÓN (TRL 4)

El presente desarrollo corresponde a un Nivel de Madurez Tecnológica TRL 4, orientado a la validación de un componente tecnológico en condiciones controladas de laboratorio. En esta etapa se busca comprobar experimentalmente el funcionamiento del principio de captación propuesto mediante un protocolo reproducible y controlado.

La validación del prototipo se estructuró mediante la formulación de una hipótesis nula (H_0) y una hipótesis alternativa (H_1), las cuales establecen el criterio de comparación para interpretar los resultados experimentales. Mientras la hipótesis nula asume que la incorporación de la geometría kirigami no modifica significativamente la eficiencia de captación, la hipótesis alternativa plantea que dicha geometría produce un incremento medible en el desempeño del sistema debido a su comportamiento aerodinámico y morfológico.

HIPÓTESIS NULA



H0

La incorporación de una geometría kirigami en una superficie captadora no produce diferencias significativas en la eficiencia de captación y conducción de agua atmosférica respecto de una malla raschel convencional.

HIPÓTESIS ALTERNATIVA



H1

H1 - La incorporación de una geometría kirigami en una superficie captadora incrementa la eficiencia de captación de agua atmosférica respecto a una malla raschel convencional, favoreciendo el comportamiento aerodinámico del flujo de aire, la intercepción de microgotas y su posterior conducción por gravedad.

INDICADOR DE DESEMPEÑO

Para evaluar cuantitativamente el comportamiento de los distintos prototipos se utilizó como indicador la eficiencia de captación, definida como el volumen de agua recolectado por unidad de superficie efectiva y por unidad de tiempo. Este parámetro permite comparar el desempeño de sistemas con diferentes configuraciones geométricas bajo las mismas condiciones experimentales.

$$E = \frac{V}{A \times t} \quad [mL \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}]$$

V = Volumen captado

A = Área efectiva

t = Tiempo

Este indicador constituye la variable de respuesta principal de la investigación y se emplea para comparar el desempeño de los tres sistemas evaluados: panel kirigami en acero galvanizado, panel kirigami en PET y malla Raschel convencional como grupo control.

7.2 ENSAYO PRELIMINAR EXPLORATORIO

Objetivo: verificar el comportamiento inicial del panel.

Con el fin de observar el comportamiento, se realizó un primer experimento de carácter exploratorio utilizando el panel kirigami en acero galvanizado y un sistema de pulverización manual.

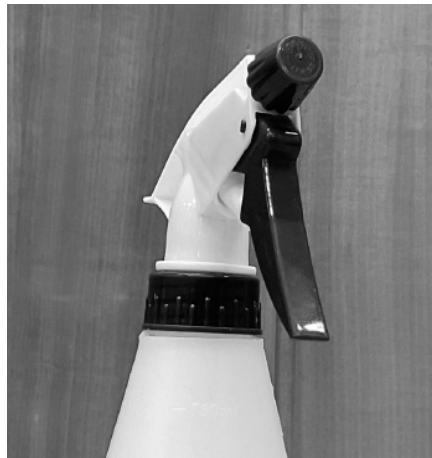


Fig. 98. Fotografía atomizador
Fuente: Elaboración propia (2026)

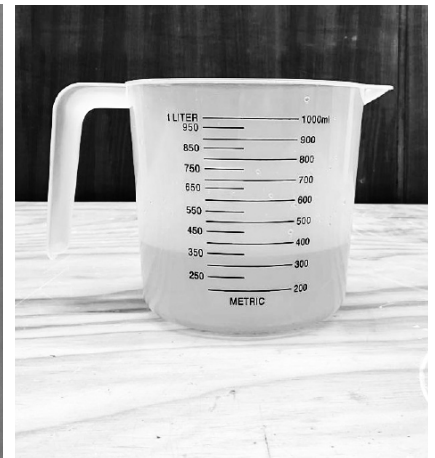


Fig. 99. Fotografía Vaso atomizador
Fuente: Elaboración propia (2026)

El ensayo consistió en la aplicación de un volumen total de 750 mL de agua atomizada sobre el panel, bajo condiciones ambientales aproximadas de 20 °C y en ausencia de viento. Como resultado, se recolectaron 350 mL de agua, lo que corresponde a una eficiencia de captación aproximada de $0,49 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, calculada en función del área efectiva del panel ($0,72 \text{ m}^2$) y un tiempo de ensayo de 60 minutos. En términos relativos, el volumen recuperado equivale aproximadamente al 47 % del agua aplicada. En esta etapa, los prototipos de malla Raschel y kirigami en PET aún no se encontraban fabricados, por lo que no fue posible realizar una comparación entre sistemas.

Por lo tanto, este ensayo tuvo un carácter exclusivamente exploratorio, orientado a comprender el comportamiento inicial de la geometría y a definir los parámetros necesarios para el desarrollo de un protocolo experimental comparativo.



Fig. 100. Fotografía experimento exploratorio
Fuente: Elaboración propia (2026)

Durante el ensayo se observó que la mayor captación ocurría en los primeros minutos de exposición, mientras que una cantidad importante de agua permanecía adherida a la superficie del panel durante un período prolongado, evidenciando una limitada capacidad de drenaje en ausencia de flujo de aire. Al incorporar una corriente de aire perpendicular, se produjo el desprendimiento de las gotas acumuladas, incrementando inmediatamente el volumen recolectado. Este comportamiento confirmó la influencia del viento sobre el escurrimiento del agua y permitió identificar dos fenómenos complementarios: una elevada capacidad inicial de captación y una evacuación limitada bajo condiciones estáticas. Estas observaciones constituyeron la base para diseñar un ensayo comparativo posterior con un montaje más controlado, mayor precisión en la medición y condiciones experimentales reproducibles.



Fig. 101. Fotografía experimento exploratorio - gotas suspendidas
Fuente: Elaboración propia (2026)

7.3 PROTOCOLO EXPERIMENTAL

SIMULACIÓN DE NIEBLA

Con el propósito de reproducir condiciones controladas de niebla para la evaluación comparativa de los prototipos, se desarrolló un sistema de generación artificial basado en módulos de nebulización ultrasónica integrados en equipos Air Cooler. Cada módulo transforma el agua en una niebla compuesta por microgotas de reducido diámetro, permitiendo obtener un flujo continuo y homogéneo de humedad sin alterar significativamente la temperatura del ambiente.

GENERADORES DE NIEBLA ULTRASÓNICO



Fig. 102. Air cooler fan
Fuente: powerhouse express



Fig. 103. Módulo de un generador de niebla ultrasónico
Fuente: VHF módulos electrónicos

Cada generador presenta una capacidad de atomización aproximada de 225 mL/h por unidad, lo que permite escalar el sistema mediante la operación simultánea de múltiples dispositivos. Para el desarrollo de los ensayos experimentales se utilizaron seis generadores de niebla ultrasónica (Air Cooler Fan) funcionando de manera paralela, con el propósito de incrementar el caudal de niebla y obtener una distribución más homogénea sobre la superficie de los paneles evaluados.

MONTAJE DE VENTILADORES AIR COOLER

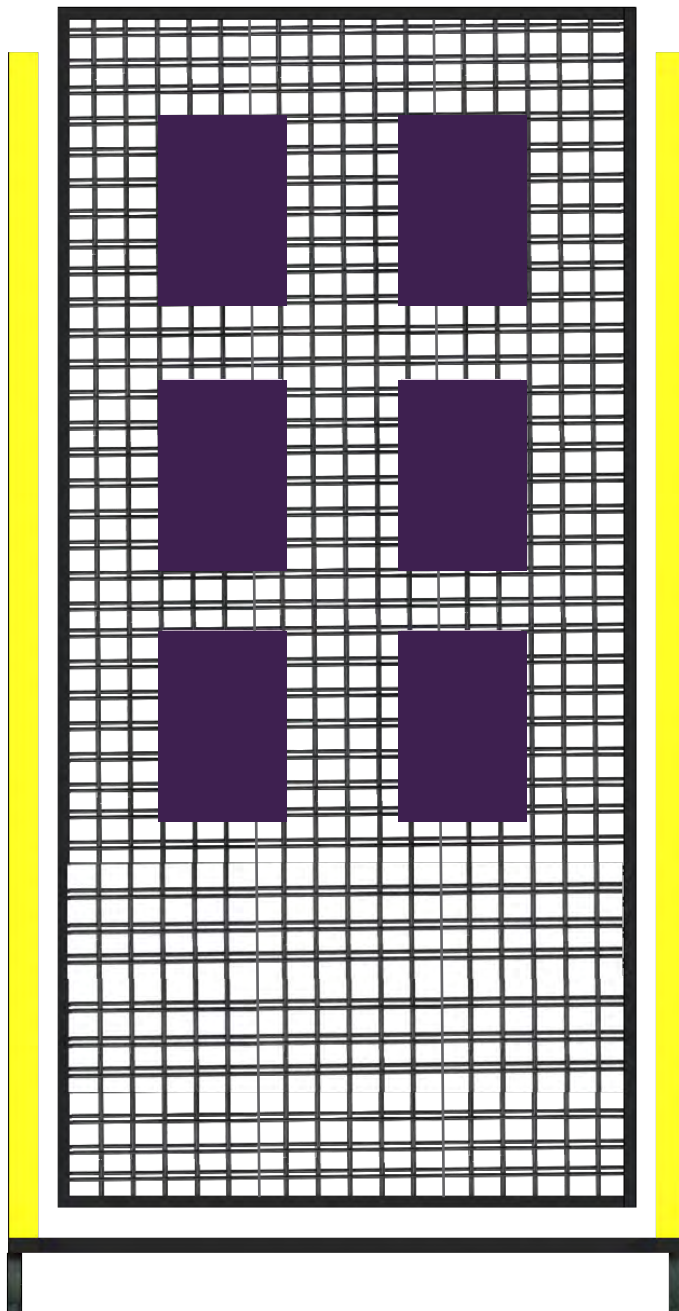


Fig. 104. Modelo del montaje de los ventiladores air cooler
Fuente: Elaboración propia (2026)

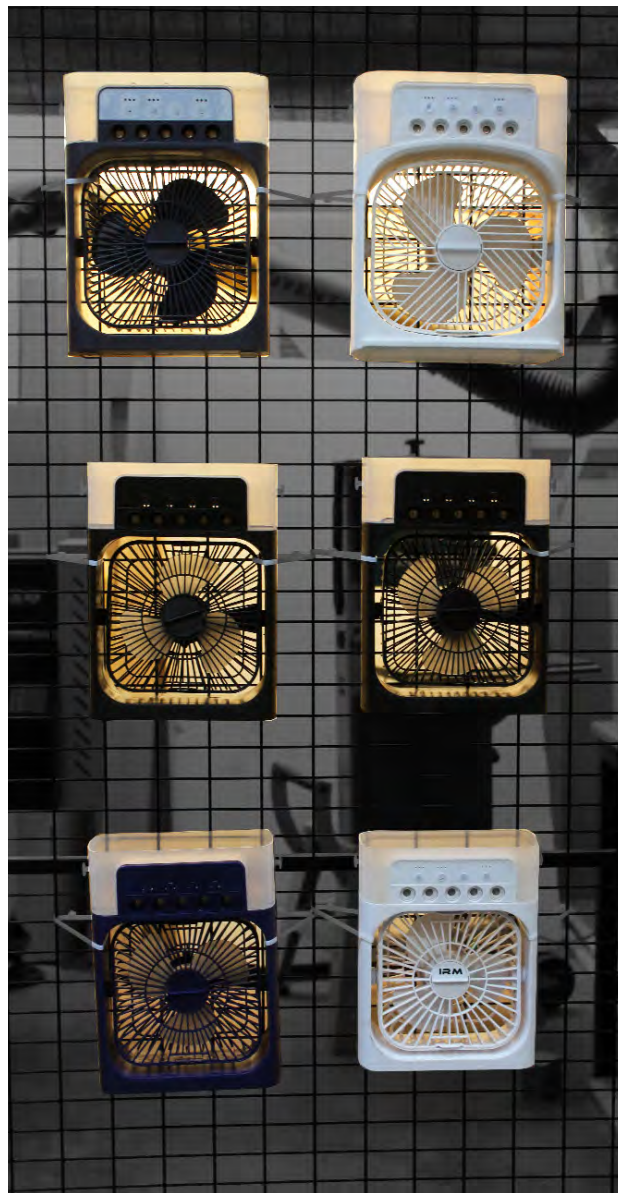


Fig. 105. Fotografía del montaje de los ventiladores air cooler
Fuente: Elaboración propia (2026)

SOPORTE DE PANELES



Con el fin de reproducir una condición de instalación representativa de una envolvente arquitectónica, se construyó un soporte experimental compuesto por un entramado estructural de listones de madera de 2x3 y un revestimiento exterior de pino tinglado Seco cepillado 3/4x5 y barnizado, montado sobre una estructura metálica autoportante

Este sistema permitió montar los paneles, replicando las condiciones de fijación previstas para una fachada de madera, manteniendo una separación respecto del cerramiento.

Fig. 106. Fotografía del soporte de los prototipos
Fuente: Elaboración propia (2026)

ESTRUCTURA DE SOPORTE DE PANELES

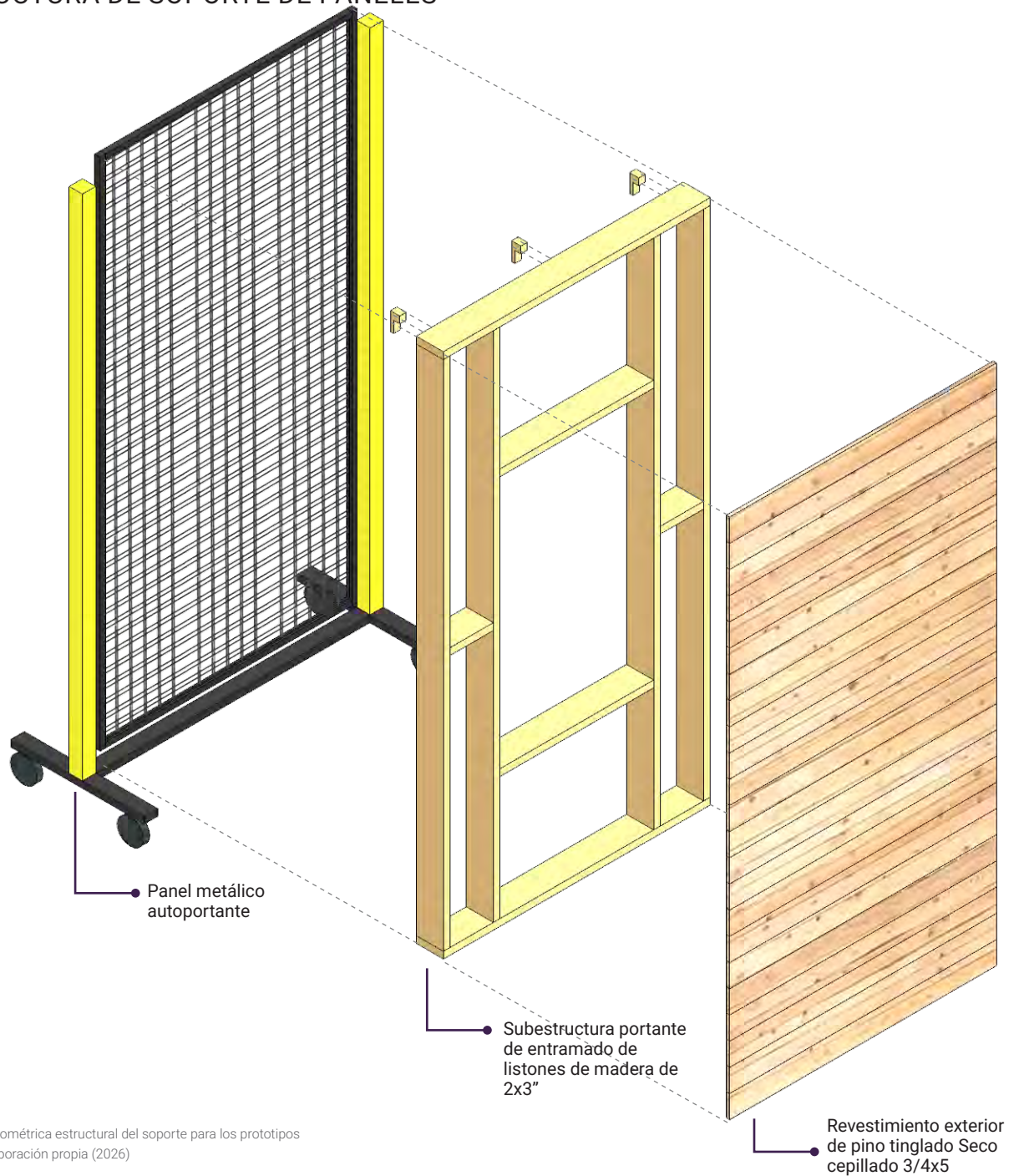


Fig. 107. Isométrica estructural del soporte para los prototipos
Fuente: Elaboración propia (2026)

MONTAJE EXPERIMENTAL



Fig. 108. Fotografía del montaje para los experimentos
Fuente: Elaboración propia (2026)

El montaje experimental se configuró manteniendo una separación fija de 20 cm entre los generadores de niebla y la superficie de captación. La disposición de los equipos permitió cubrir homogéneamente el área efectiva del panel, estableciendo una condición de exposición constante y reproducible para todos los ensayos realizados.

Asimismo, el soporte experimental permitió intercambiar los distintos prototipos sin modificar la posición del sistema ni las condiciones de ensayo, manteniendo constantes la orientación, la distancia de exposición y la distribución del flujo de niebla. De esta manera, se redujo la influencia de variables externas, asegurando que las diferencias observadas durante la experimentación respondieran principalmente al desempeño de cada configuración evaluada.

- Distancia generador-panel: 20 cm
- Orientación del flujo: Perpendicular a la superficie
- Posición del panel: Vertical
- Área expuesta: 120×60 cm

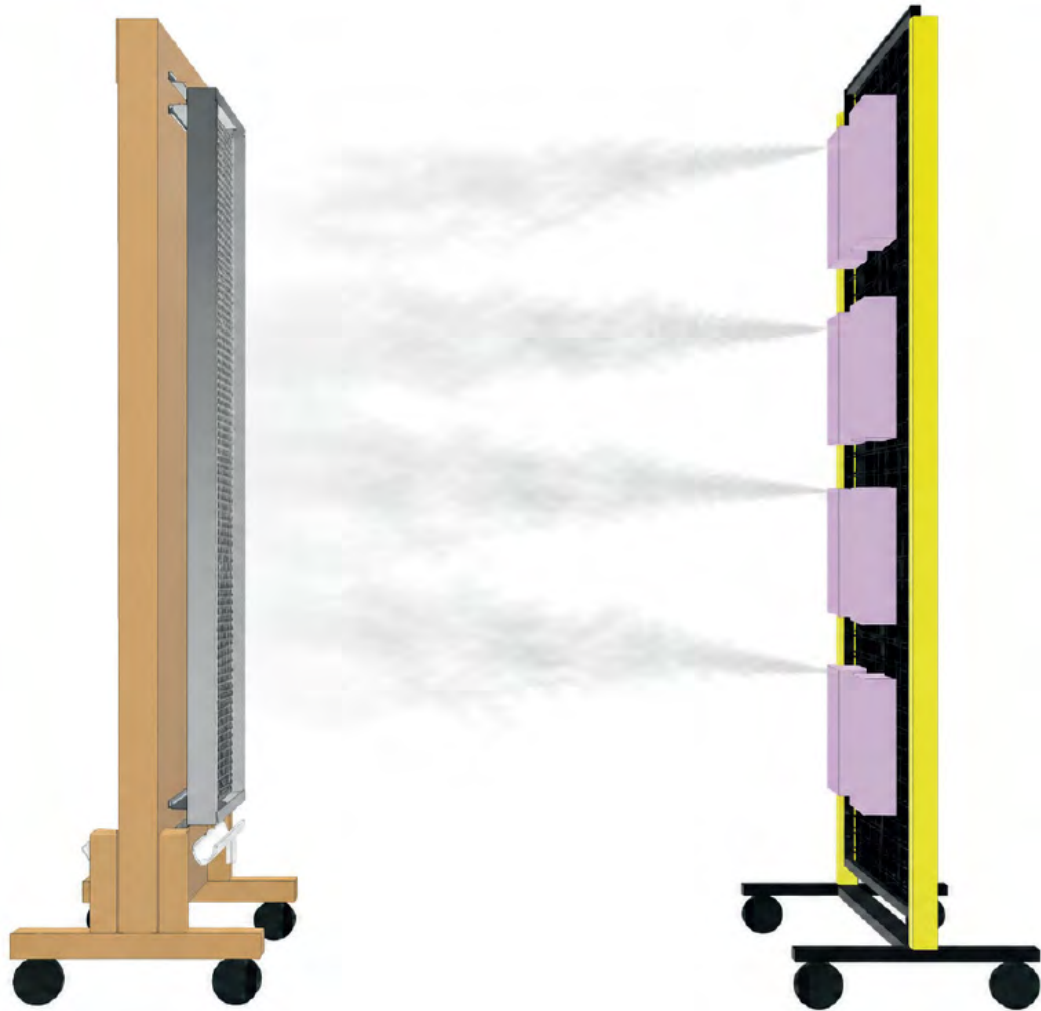


Fig. 109. Esquema del montaje del experimento.
Fuente: Elaboración propia (2026)

7.4 ENSAYO PILOTO

PROTOTIPOS EVALUADOS

PANEL KIRIGAMI ACERO LAMINADO



PANEL KIRIGAMI PLÁSTICO PET



GRUPO CONTROL
PANEL MALLA RASCHEL

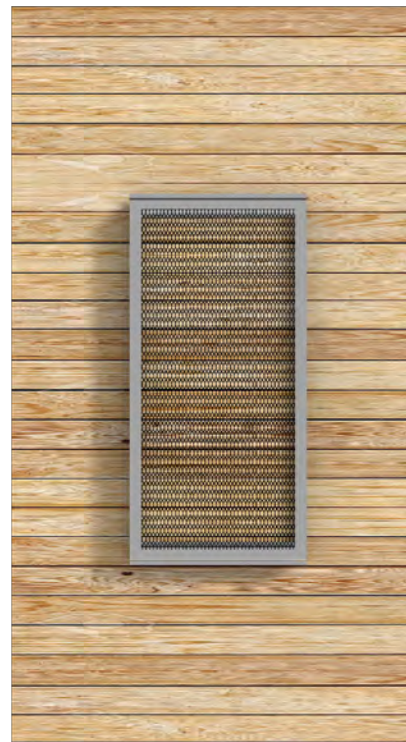


Fig. 110. Esquema de los paneles evaluados en el experimento
Fuente: Elaboración propia (2026)

El ensayo piloto constituyó la primera evaluación comparativa de los prototipos desarrollados: el panel kirigami de acero laminado, el panel kirigami de PET y un panel convencional de malla Raschel 50% de sombra, utilizado como grupo control. Cada panel fue evaluado individualmente, reemplazándolo sucesivamente sobre el mismo soporte experimental con el propósito de mantener constantes las condiciones de exposición. Esta etapa tuvo como objetivo verificar la factibilidad del montaje, observar el comportamiento preliminar de cada superficie captadora e identificar los ajustes metodológicos necesarios antes de ejecutar el ensayo definitivo.

La cuantificación del agua recolectada se realizó mediante jarros medidores graduados de 200 mL, cuya resolución resultó insuficiente para registrar con precisión las diferencias de volumen obtenidas entre los prototipos. Debido a la baja tasa de captación generada por la niebla artificial, fue necesario extender la duración de cada ensayo hasta tres horas para alcanzar volúmenes que pudieran ser leídos en estos recipientes, aun cuando su nivel de precisión seguía siendo limitado. Asimismo, se observó que una fracción del agua continuaba escurriendo desde el panel una vez finalizada la generación de niebla, evidenciando la necesidad de incorporar un tiempo de decantación previo al registro final. Por otra parte, surgió la interrogante de si el flujo de aire generado por los ventiladores influía en la capacidad de captación y drenaje del sistema, incorporándose posteriormente como una variable de análisis. En conjunto, estos antecedentes permitieron optimizar el protocolo experimental, reemplazando la medición volumétrica por un sistema de pesaje de mayor precisión e incorporando un período de decantación y la evaluación del efecto del viento, aumentando la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados obtenidos.

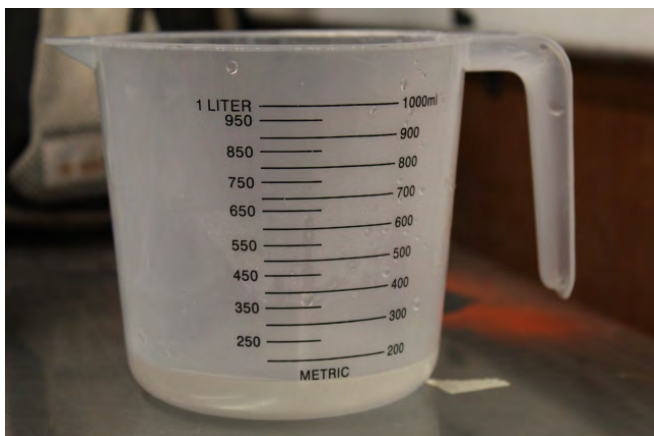


Fig. 111. Fotografía del vaso medidor en el 1er experimento
Fuente: Elaboración propia (2026)

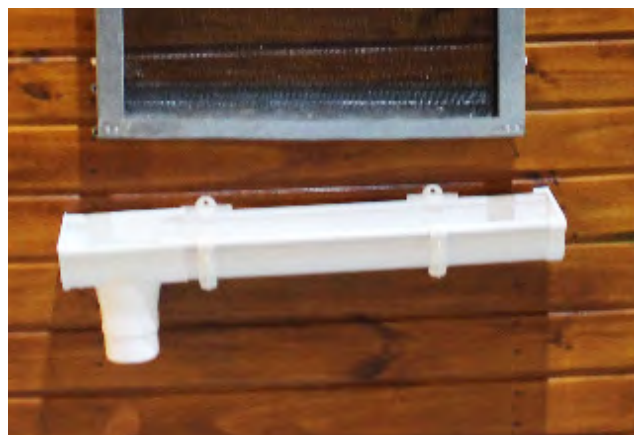


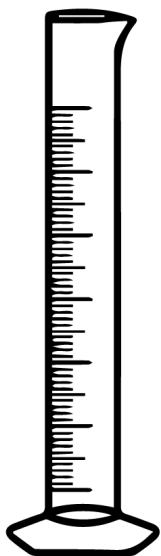
Fig. 112. Fotografía de la canaleta para la recolección del agua captada
Fuente: Elaboración propia (2026)

7.5 ENSAYO COMPARATIVO CONTROLADO

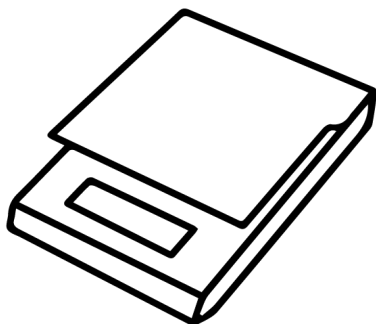
Las observaciones obtenidas durante el ensayo piloto permitieron ajustar el protocolo experimental con el objetivo de aumentar la precisión y reproducibilidad de las mediciones. En esta segunda etapa se reemplazaron los recipientes graduados por instrumentación de laboratorio, se incorporó un tiempo de decantación previo a la medición final y se estandarizaron las condiciones de exposición para cada uno de los prototipos evaluados. Estas modificaciones permitieron reducir las fuentes de incertidumbre detectadas previamente y obtener resultados comparables entre los distintos sistemas de captación.

INSTRUMENTACIÓN

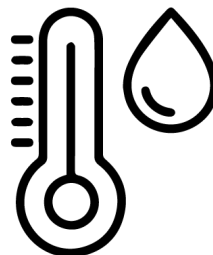
La instrumentación presentada corresponde a los equipos utilizados para el control y registro de las variables experimentales durante el ensayo. Estos elementos complementan el montaje experimental, conformado además por los prototipos evaluados, el soporte de ensayo y el sistema de generación de niebla artificial mediante seis generadores ultrasónicos.



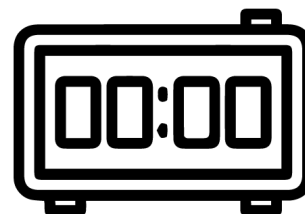
Probeta graduada (100 mL)
(resolución: 1 mL)



**Balanza digital
de precisión**



**Termohigrómetro
digital**



**Cronómetro
digital**

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Cada prototipo fue evaluado de manera independiente utilizando el mismo montaje experimental y manteniendo constantes todas las variables de ensayo. Para cada panel se realizaron dos condiciones experimentales: una sin flujo de aire y otra con flujo de aire generado por los ventiladores incorporados en los equipos de nebulización, con el objetivo de evaluar la influencia del viento sobre la captación y el drenaje del agua. Antes de iniciar cada medición se registró la masa del recipiente colector vacío y se instaló el panel correspondiente sobre el soporte experimental. Posteriormente, se cargaron los seis generadores ultrasónicos con 500 mL de agua cada uno y se inició simultáneamente la generación de niebla y el cronómetro.

Finalizado el período de exposición (1 hora), se interrumpió la generación de niebla y se dio inicio a una etapa de decantación de 1 hora, destinada a favorecer el escurrimiento del agua retenida sobre la superficie captadora. Durante todo el ensayo, tanto en la fase de exposición como en la de decantación, la masa de agua recolectada fue registrada cada 10 minutos, permitiendo caracterizar la evolución temporal de la captación y evaluar el aporte del drenaje posterior al cese de la generación de niebla.

Una vez finalizada la etapa de decantación, se efectuó el pesaje final del recipiente colector. La masa registrada fue convertida a volumen mediante la equivalencia $1 \text{ g} = 1 \text{ mL}$ de agua, obteniendo así el volumen total captado por cada prototipo. Este procedimiento se repitió para las dos condiciones de ensayo (con y sin viento) y para los tres sistemas evaluados.

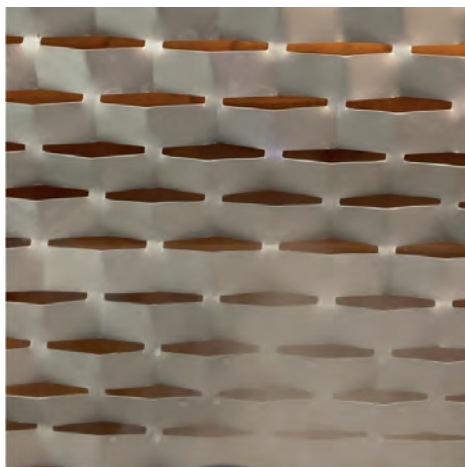
Con el propósito de complementar el análisis experimental, todos los ensayos fueron registrados en video, permitiendo documentar el comportamiento de la captación y el escurrimiento de agua. Estos registros se presentan en el Anexo 1.

RESULTADOS EXPERIMENTO

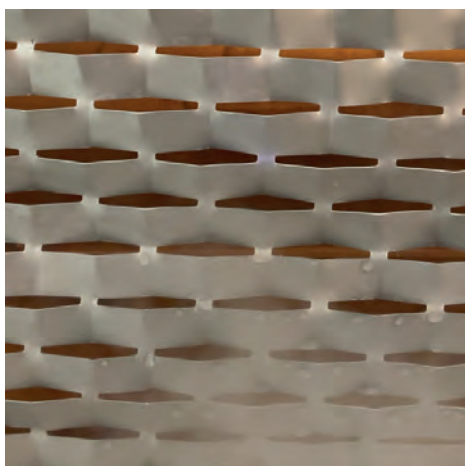
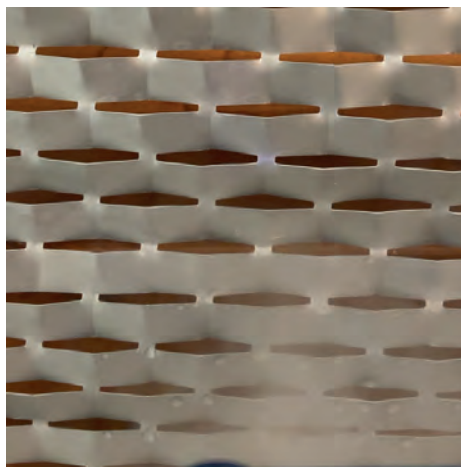
KIRIGAMI ACERO GALVANIZADO - SIN VIENTO

RESULTADOS CUALITATIVOS

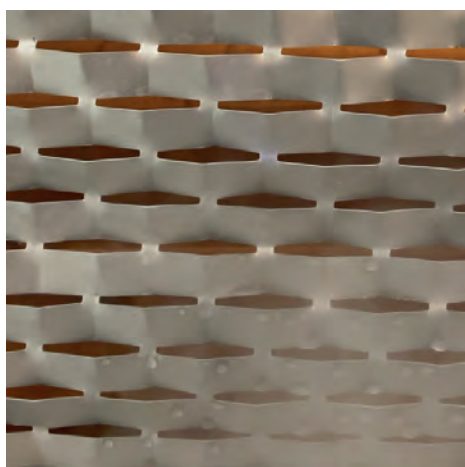
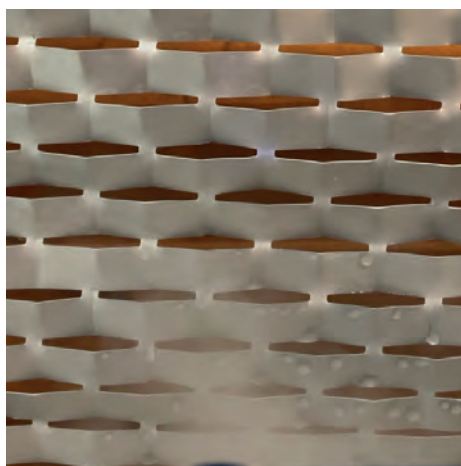
Durante la hora de exposición a la niebla se observó la formación progresiva de microgotas sobre la superficie del panel kirigami de acero. En los primeros minutos, la formación de gotas se distribuyó de manera relativamente uniforme sobre los pliegues de la geometría, aumentando gradualmente el tamaño de las gotas conforme avanzó el ensayo. Hacia el final del período de exposición se evidenció una mayor acumulación de agua en los sectores inferiores del panel, donde comenzaron a formarse gotas de mayor tamaño que, en algunos casos, se desprendieron por gravedad. Durante la etapa de decantación continuó el escurrimiento de parte del agua retenida, registrándose el desprendimiento progresivo de nuevas gotas. No obstante, una fracción del agua permaneció adherida a la superficie hasta el término del período de observación, disminuyendo gradualmente por secado sin alcanzar un drenaje completo.



10 min



30 min



50 min

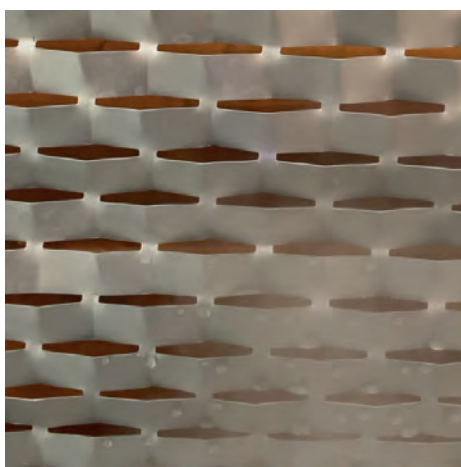
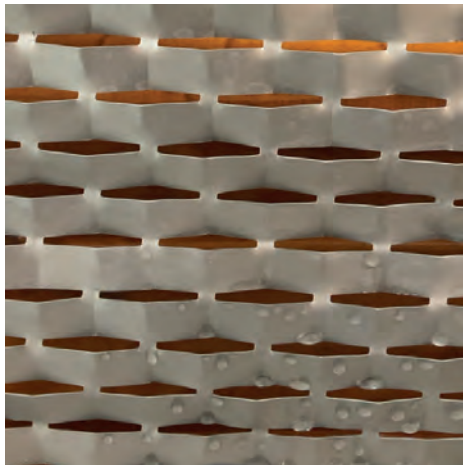
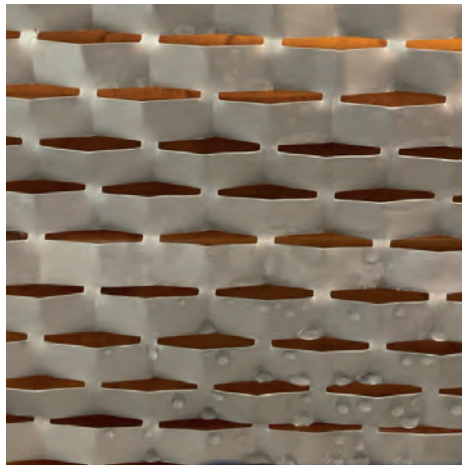


Fig. 113. Experimento kirigami
acero - sin viento (exposición)
Fuente: Elaboración propia
(2026)

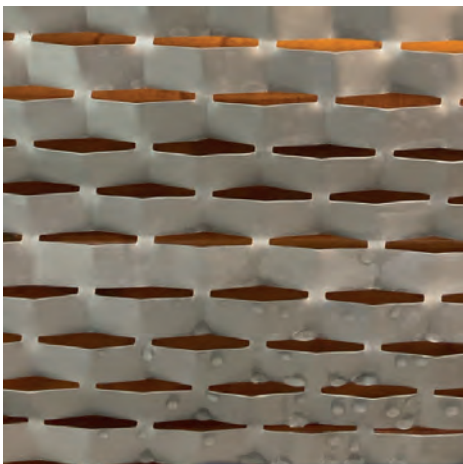
HORA DE DECANTACIÓN



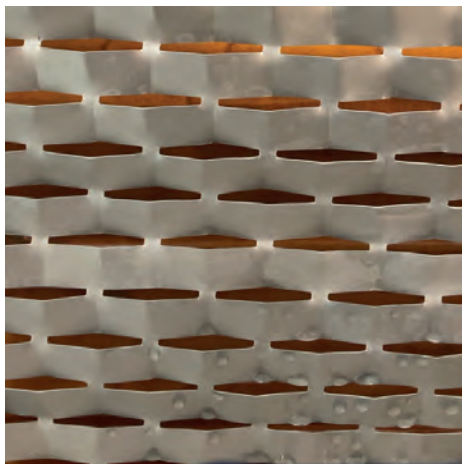
10 min



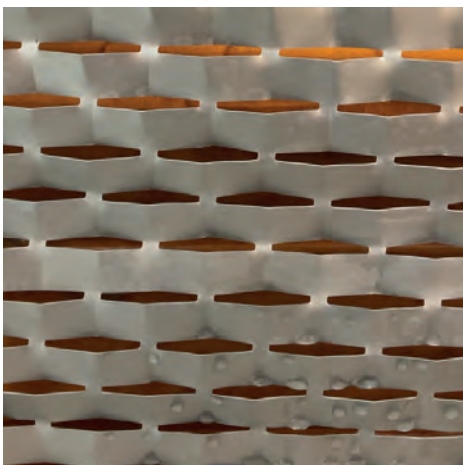
20 min



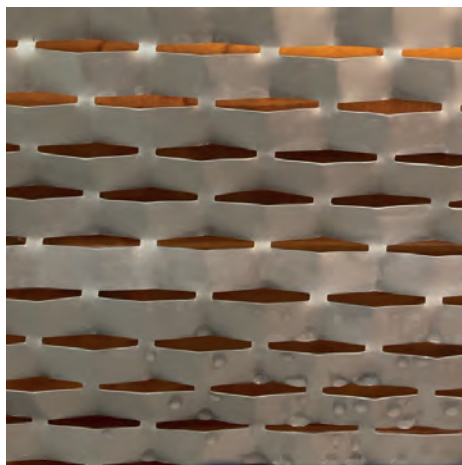
30 min



40 min



50 min



60 min

Fig. 114. Experimento kirigami
acero - sin viento (decantación)
Fuente: Elaboración propia
(2026)

RESULTADOS CUANTITATIVOS

Los registros muestran un incremento continuo de la masa recolectada durante la hora de exposición, alcanzando aproximadamente 12 g al finalizar este período. Durante la etapa de decantación, el sistema continuó aportando agua al recipiente colector hasta alcanzar aproximadamente 15 g al término del ensayo. Sin embargo, el mayor incremento se registró durante los primeros 10 minutos de decantación, mientras que en los intervalos posteriores la masa recolectada permaneció prácticamente constante. Este comportamiento indica que la mayor parte del agua susceptible de escurrir fue evacuada inmediatamente después de finalizar la generación de niebla, permaneciendo posteriormente una fracción de agua adherida a la superficie que no alcanzó a drenar hacia el recipiente colector durante el tiempo de observación.



Grafico 15. Resultados kirigami acero tiempo de exposición - sin viento
Fuente: Elaboración propia (2026)



Grafico 16. Resultados kirigami acero tiempo de decantación - sin viento
Fuente: Elaboración propia (2026)

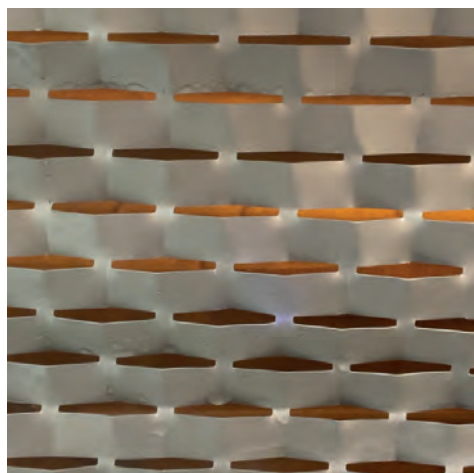
RESULTADOS EXPERIMENTO

KIRIGAMI ACERO GALVANIZADO - CON VIENTO

RESULTADOS CUALITATIVOS

Con la incorporación del flujo de aire se observó un cambio en el comportamiento de las microgotas sobre la superficie del panel. Las gotas que se formaban tendían a desprenderse con mayor rapidez, sin alcanzar el tamaño observado en el ensayo sin viento. Asimismo, la humedad se distribuyó de manera más homogénea sobre la geometría kirigami, evidenciando una menor acumulación localizada de agua durante el período de exposición. Durante la etapa de decantación no se registraron cambios apreciables en la superficie ni un escurrimiento significativo, manteniéndose prácticamente constante el estado observado al finalizar la generación de niebla.

HORA DE EXPOSICIÓN A NIEBLA



10 min



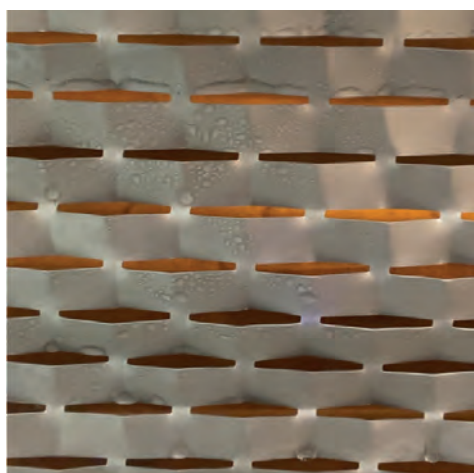
20 min



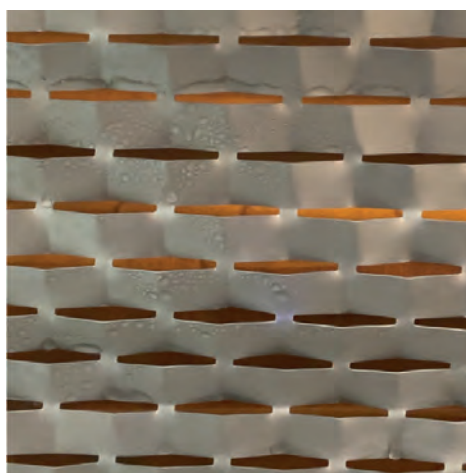
30 min



40 min

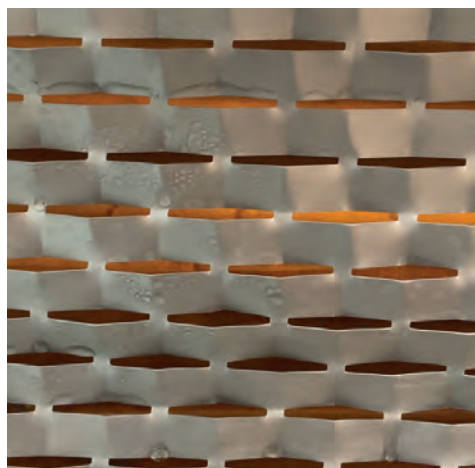


50 min

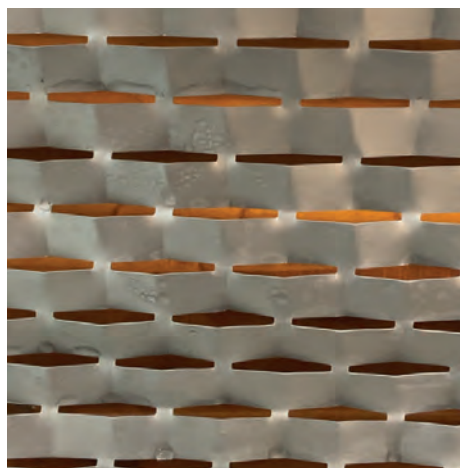


60 min

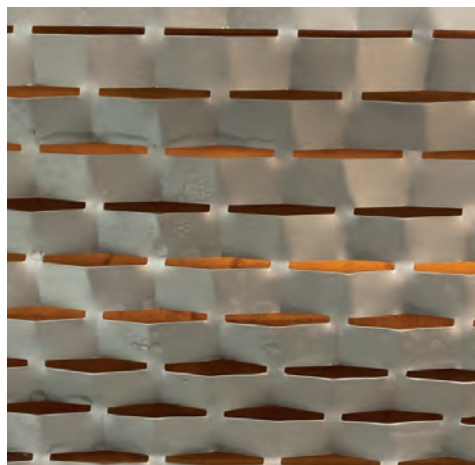
Fig. 115. Experimento kirigami
acero - con viento (exposición)
Fuente: Elaboración propia
(2026)



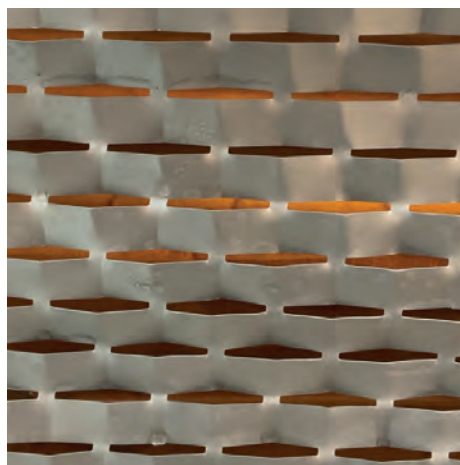
10 min



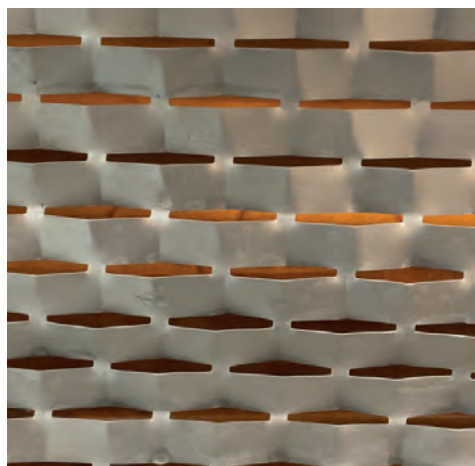
20 min



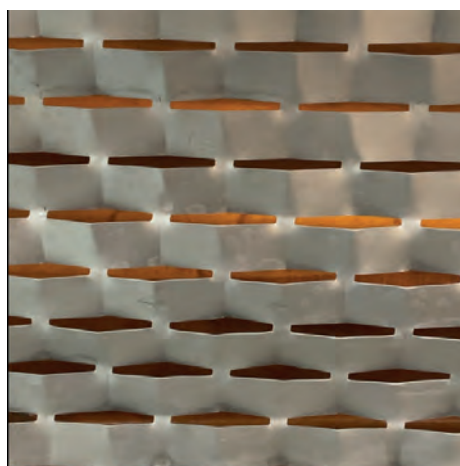
30 min



40 min



50 min



60 min

Fig. 116. Experimento kirigami
acero - con viento
(decantación)
Fuente: Elaboración propia
(2026)

RESULTADOS CUANTITATIVOS

La masa registrada permaneció cercana a cero durante prácticamente todo el período de exposición, presentando únicamente una variación muy reducida hacia los últimos minutos del ensayo. Durante la etapa de decantación, la masa recolectada se mantuvo prácticamente constante, sin incrementos significativos respecto del valor registrado al finalizar la exposición. Las observaciones cualitativas evidenciaron que las microgotas remanentes permanecieron adheridas a la superficie hasta desaparecer progresivamente, sin contribuir al escurrimiento hacia el recipiente colector. Este comportamiento podría estar asociado al menor tamaño de las gotas formadas bajo la condición con viento, las cuales no alcanzaron el volumen suficiente para desprenderse por gravedad. No obstante, cabe señalar que en la condición sin viento también se observó la permanencia de algunas gotas adheridas a la superficie al término de la decantación.

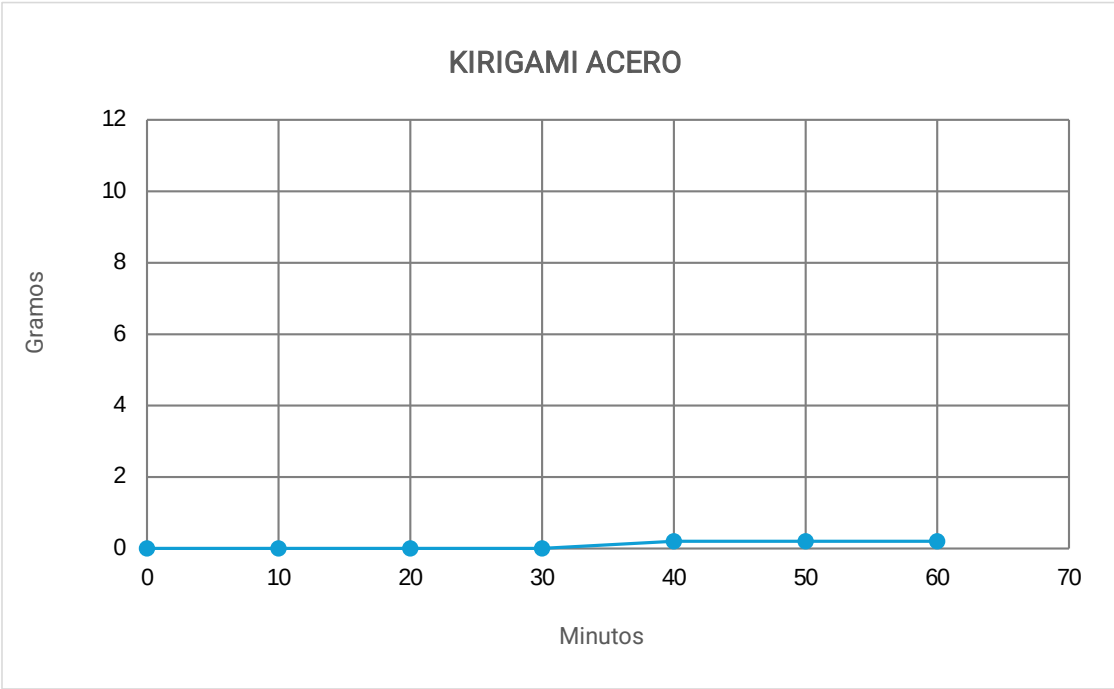


Grafico 17. Resultados kirigami acero tiempo de exposición - con viento
Fuente: Elaboración propia (2026)



Grafico 18. Resultados kirigami acero tiempo de decantación - con viento
Fuente: Elaboración propia (2026)

RESULTADOS EXPERIMENTO

KIRIGAMI PLÁSTICO PET - SIN VIENTO

RESULTADOS CUALITATIVOS

Durante la exposición se observó una formación limitada de microgotas sobre la superficie del panel kirigami de PET, concentradas principalmente en los cortes y pliegues de la geometría. Las gotas permanecieron adheridas a la superficie durante gran parte del ensayo, sin alcanzar un tamaño suficiente para desprenderse por gravedad. Al finalizar la exposición y durante la etapa de decantación no se observó un escurrimiento significativo hacia el recipiente colector, manteniéndose las gotas adheridas al panel hasta desaparecer progresivamente por secado.

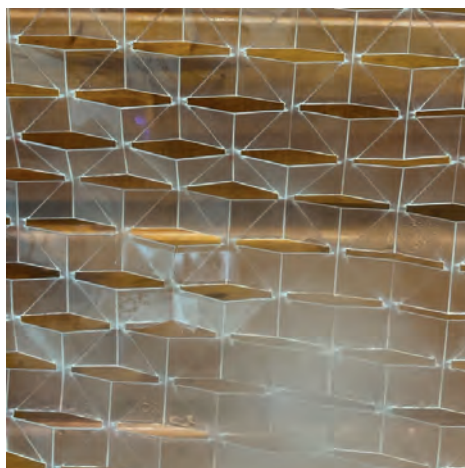
HORA DE EXPOSICIÓN A NIEBLA



10 min



30 min



50 min

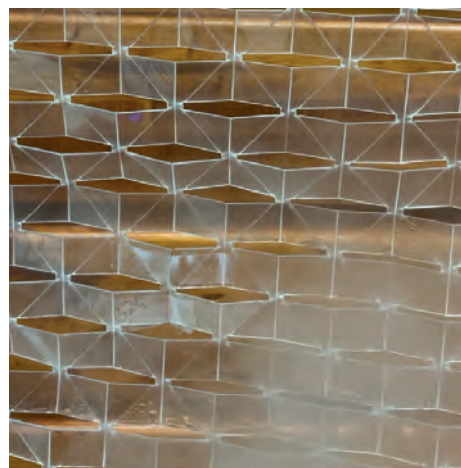
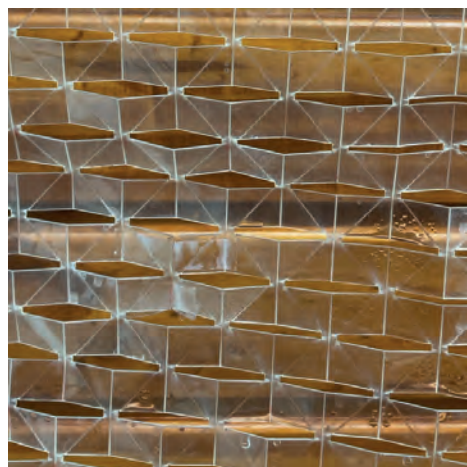
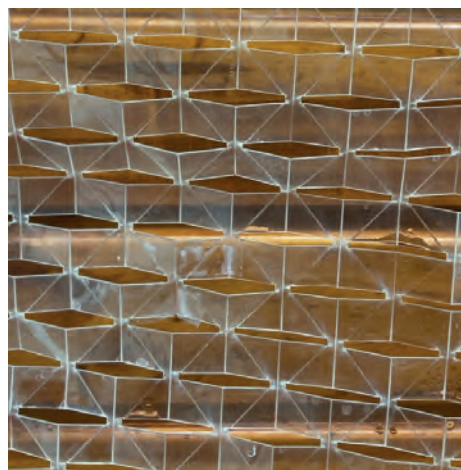


Fig. 117. Experimento kirigami
PET -SIN viento (exposición)
Fuente: Elaboración propia
(2026)

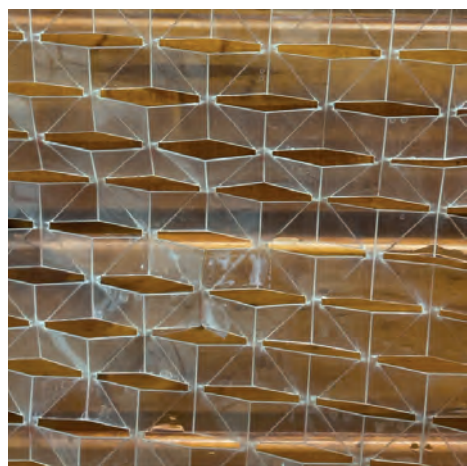
HORA DE DECATACIÓN



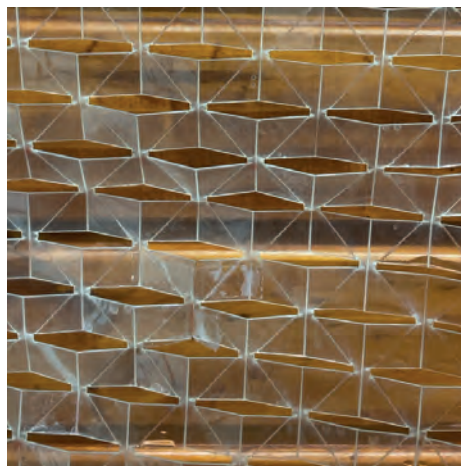
10 min



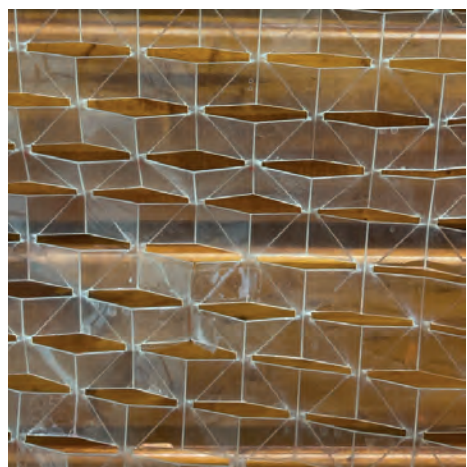
20 min



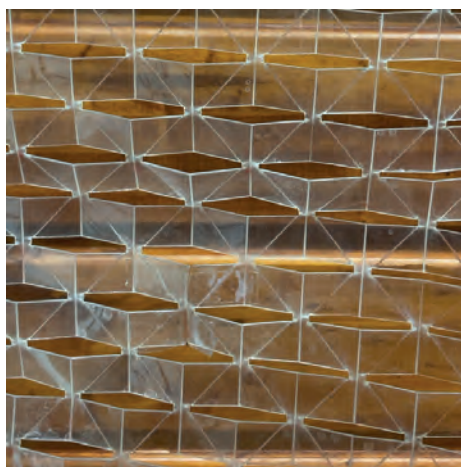
30 min



40 min



50 min



60 min

Fig. 118. Experimento kirigami PET - sin viento (decatación)
Fuente: Elaboración propia (2026)

RESULTADOS CUANTITATIVOS

La masa recolectada presentó un incremento progresivo durante la etapa de exposición, alcanzando aproximadamente 5 g al término de la primera hora. Durante la etapa de decantación, el volumen continuó aumentando hasta aproximadamente 8,3 g, concentrándose el mayor incremento en los primeros minutos posteriores al cese de la generación de niebla.

A partir de ese momento, la masa recolectada permaneció prácticamente constante hasta el término del ensayo, sin registrarse variaciones significativas. Asimismo, durante la etapa de exposición la mayor tasa de incremento se observó entre los 40 y 60 minutos, período en el que se registró la mayor acumulación de agua en el recipiente colector.

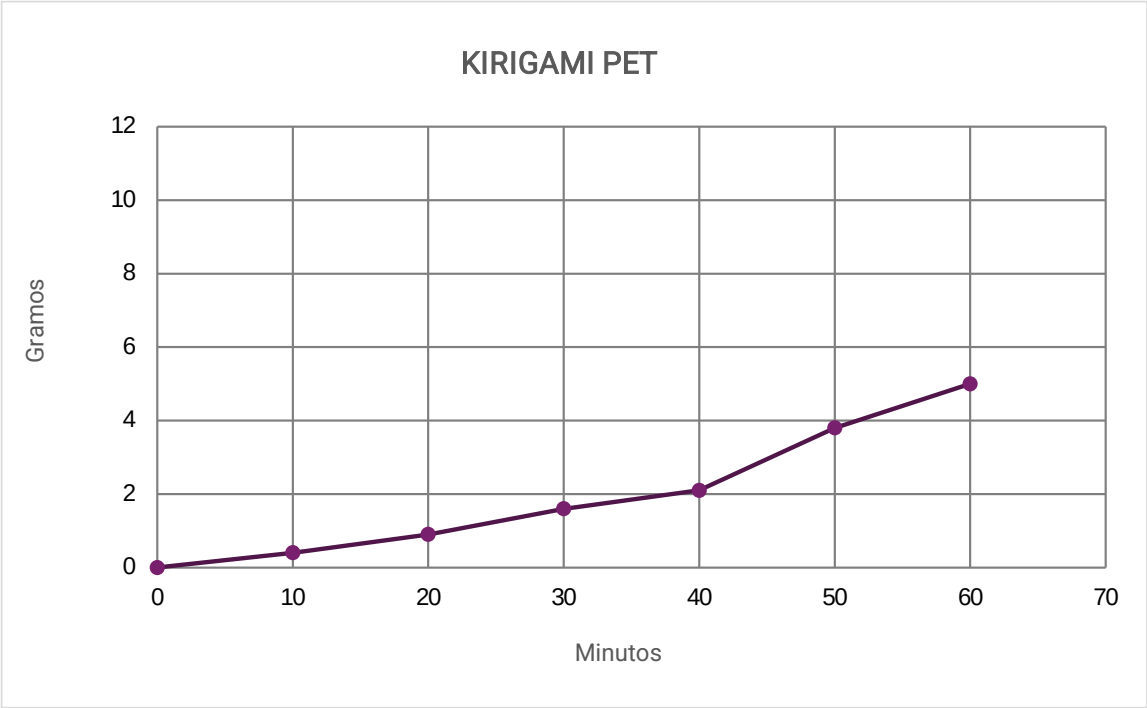


Grafico 19. Resultados kirigami PET tiempo de exposición - sin viento
Fuente: Elaboración propia (2026)

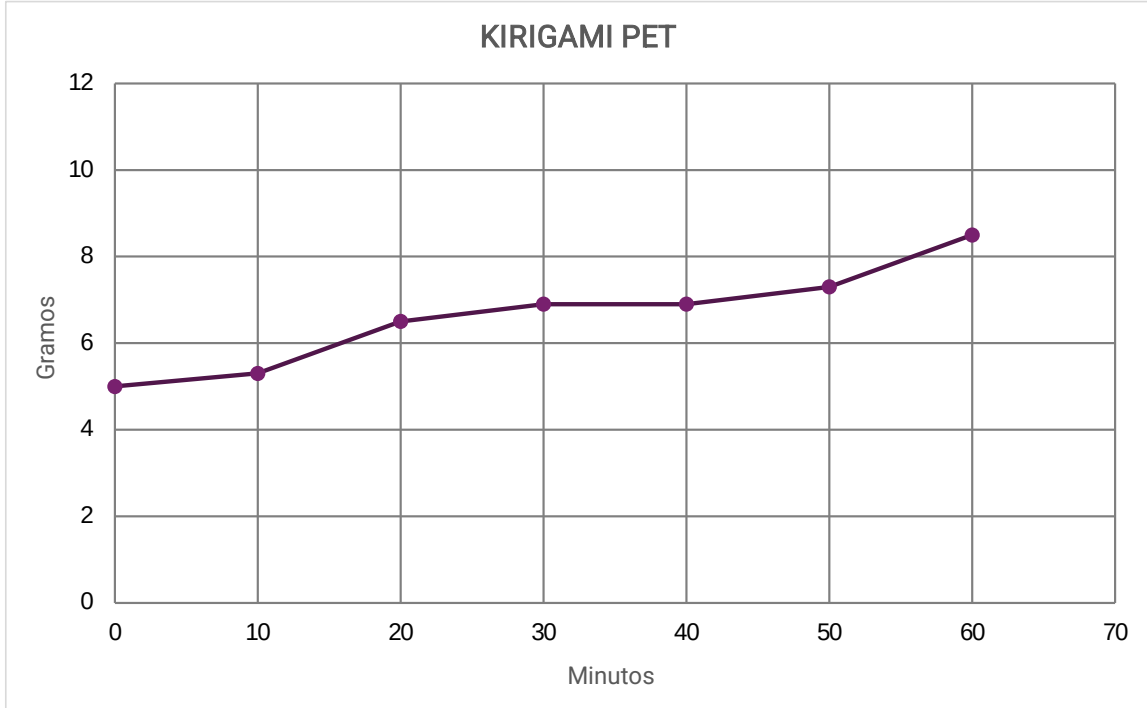


Grafico 20. Resultados kirigami PET tiempo de decantación - sin viento
Fuente: Elaboración propia (2026)

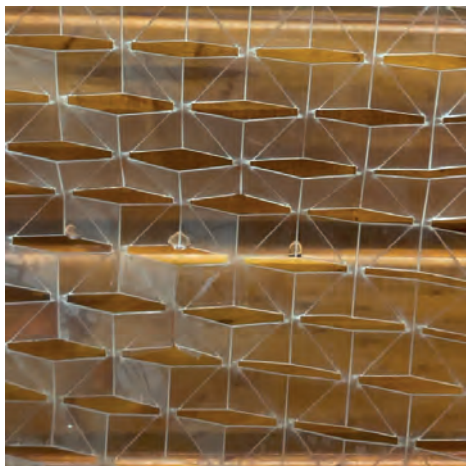
RESULTADOS EXPERIMENTO

KIRIGAMI PLÁSTICO PET - CON VIENTO

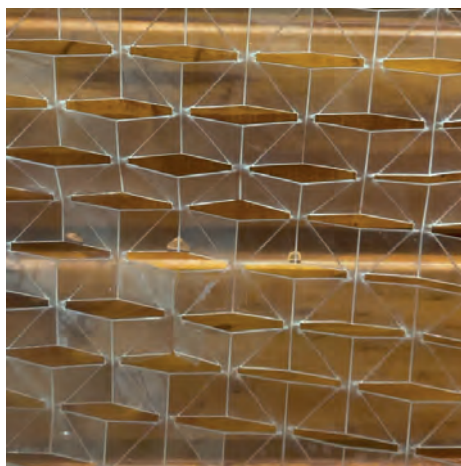
RESULTADOS CUALITATIVOS

A diferencia de la condición sin viento, la incorporación del flujo de aire favoreció la formación de microgotas sobre la superficie del panel kirigami de PET, aunque la acumulación total de agua continuó siendo reducida. Las gotas se desplazaban a lo largo de los pliegues de la geometría durante toda la etapa de exposición, manteniendo un tamaño menor y presentando desprendimientos frecuentes. Durante la etapa de decantación el panel mostró escasas variaciones visuales, observándose únicamente pequeñas gotas aisladas adheridas a la superficie, las cuales no alcanzaron a escurrir hacia el recipiente colector y desaparecieron progresivamente por secado.

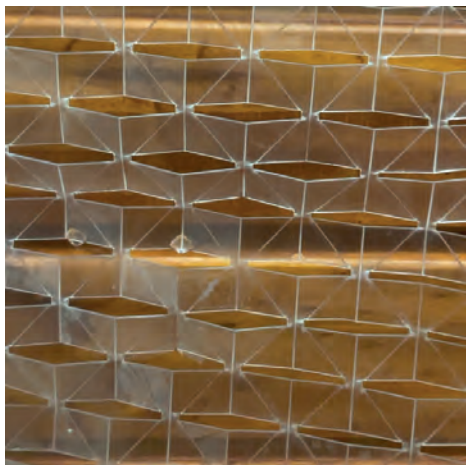
HORA DE EXPOSICIÓN A NIEBLA



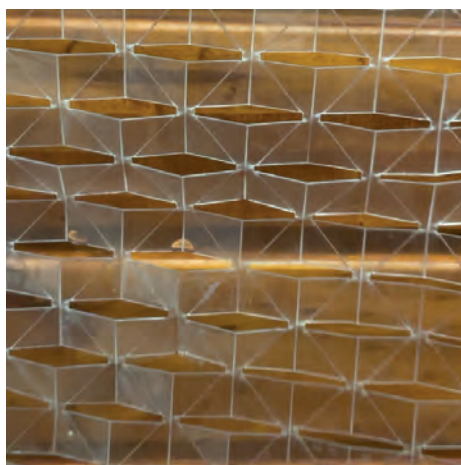
10 min



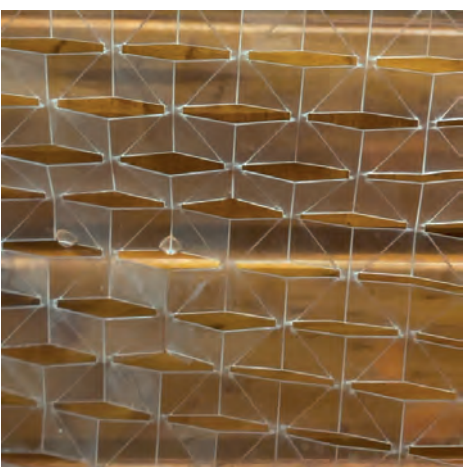
20 min



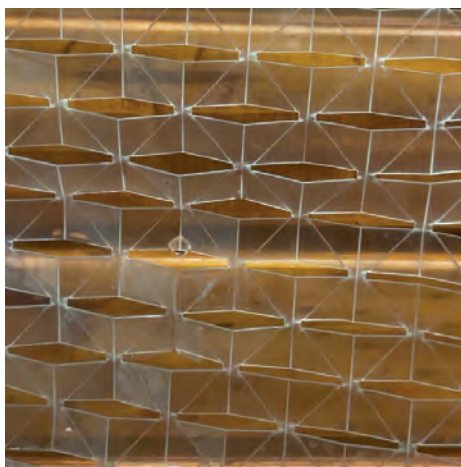
30 min



40 min



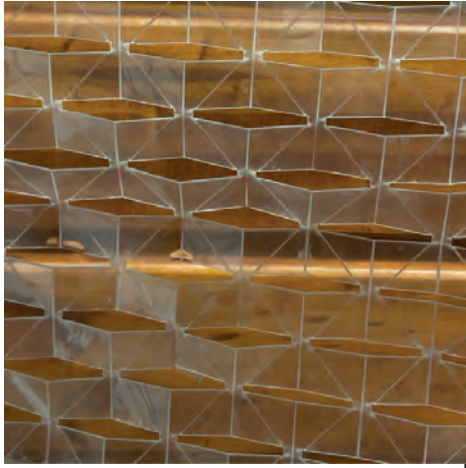
50 min



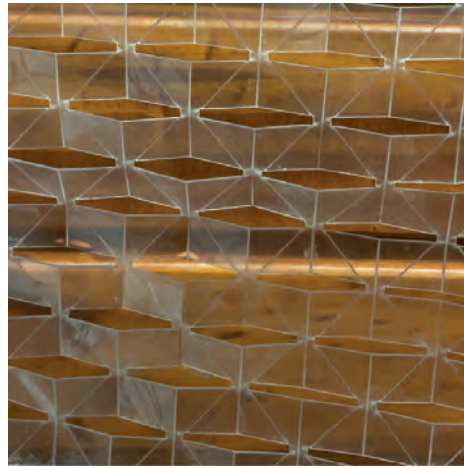
60 min

Fig. 119. Experimento kirigami PET-CON viento (exposición)
Fuente: Elaboración propia (2026)

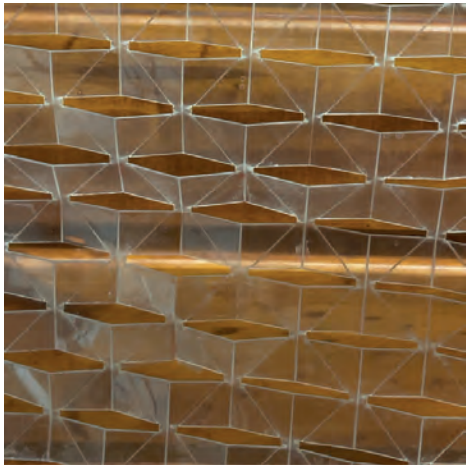
HORA DE DECANTACIÓN



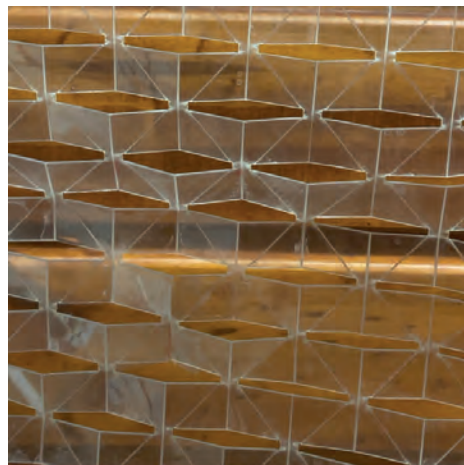
10 min



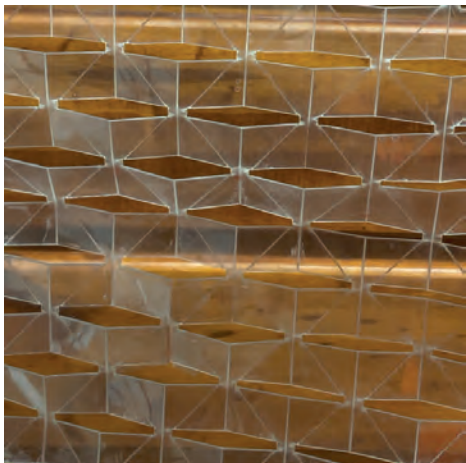
20 min



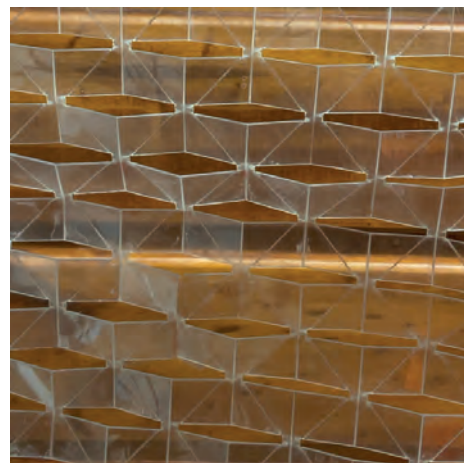
30 min



40 min



50 min

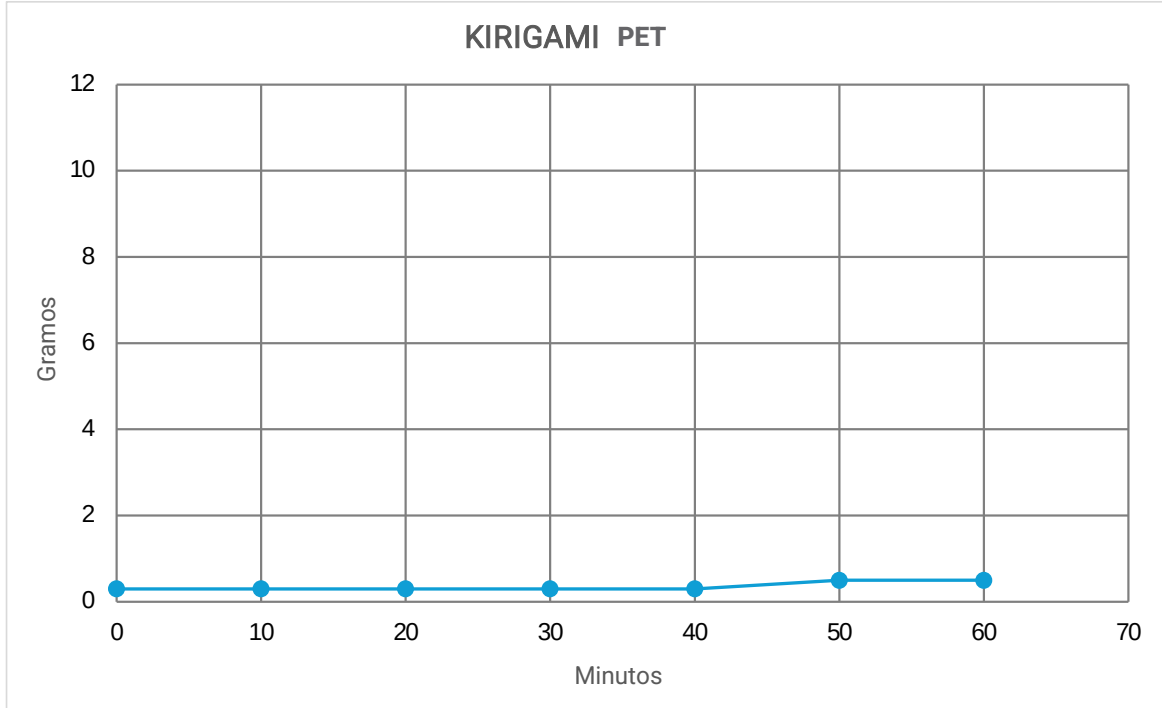
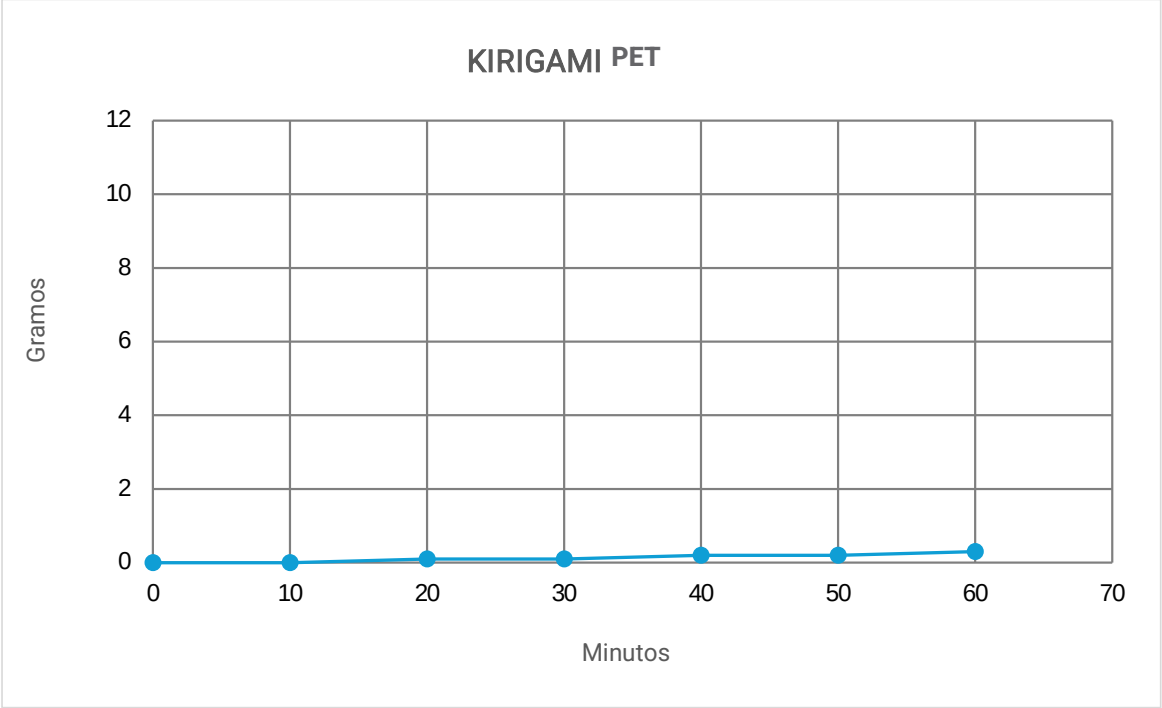


60 min

Fig. 120. Experimento kirigami
PET - CON viento (decantación)
Fuente: Elaboración propia
(2026)

RESULTADOS CUANTITATIVOS

La masa recolectada permaneció cercana a cero durante prácticamente toda la etapa de exposición, registrándose únicamente un leve incremento hacia los minutos finales del ensayo. Durante la etapa de decantación no se evidenciaron aumentos significativos en la masa recolectada, manteniéndose los registros prácticamente constantes hasta el término del período de observación. Este comportamiento coincide con las observaciones cualitativas, en las que las microgotas permanecieron adheridas a la superficie sin generar un escurrimiento apreciable hacia el recipiente colector, desapareciendo progresivamente por secado.



RESULTADOS EXPERIMENTO

GRUPO CONTROL MALLA RASCHEL - SIN VIENTO

RESULTADOS CUALITATIVOS

Durante la exposición, la malla Raschel presentó una abundante formación de microgotas distribuidas sobre los filamentos que conforman la trama. Conforme avanzó el ensayo, las gotas aumentaron rápidamente de tamaño en los espacios entre las fibras, favoreciendo su coalescencia y posterior desprendimiento por gravedad. Durante la etapa de decantación continuó observándose un escurrimiento sostenido del agua retenida, reduciéndose progresivamente la cantidad de gotas presentes sobre la superficie hasta alcanzar un estado prácticamente estable al término del período de observación.



10 min



30 min



50 min



Fig. 121. Experimento RASCHEL -sin viento (exposición)
Fuente: Elaboración propia (2026)

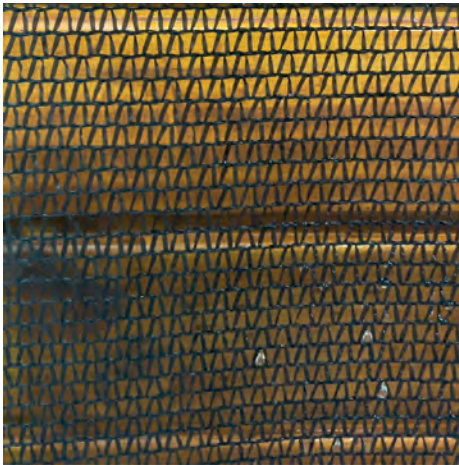
HORA DE DECANTACIÓN



10 min



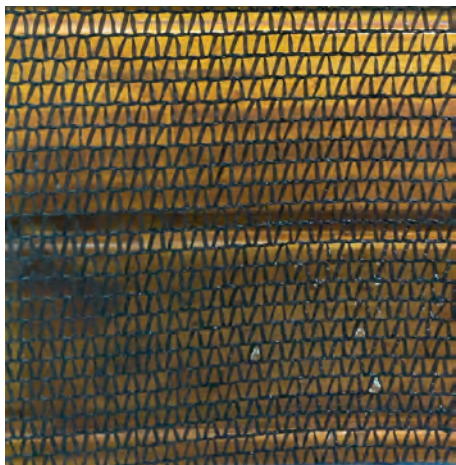
20 min



30 min



40 min



50 min



60 min

Fig. 122. Experimento RASCHEL - sin viento (decantación)
Fuente: Elaboración propia (2026)

RESULTADOS CUANTITATIVOS

La masa recolectada aumentó de manera continua durante la exposición hasta alcanzar aproximadamente 7,4 g al finalizar la hora de generación de niebla. Durante la decantación se registró un incremento cercano a 8 g, manteniéndose prácticamente constante durante la mayor parte del período de escurrimiento. Los mayores incrementos durante la exposición ocurrieron entre los minutos 40 y 60.

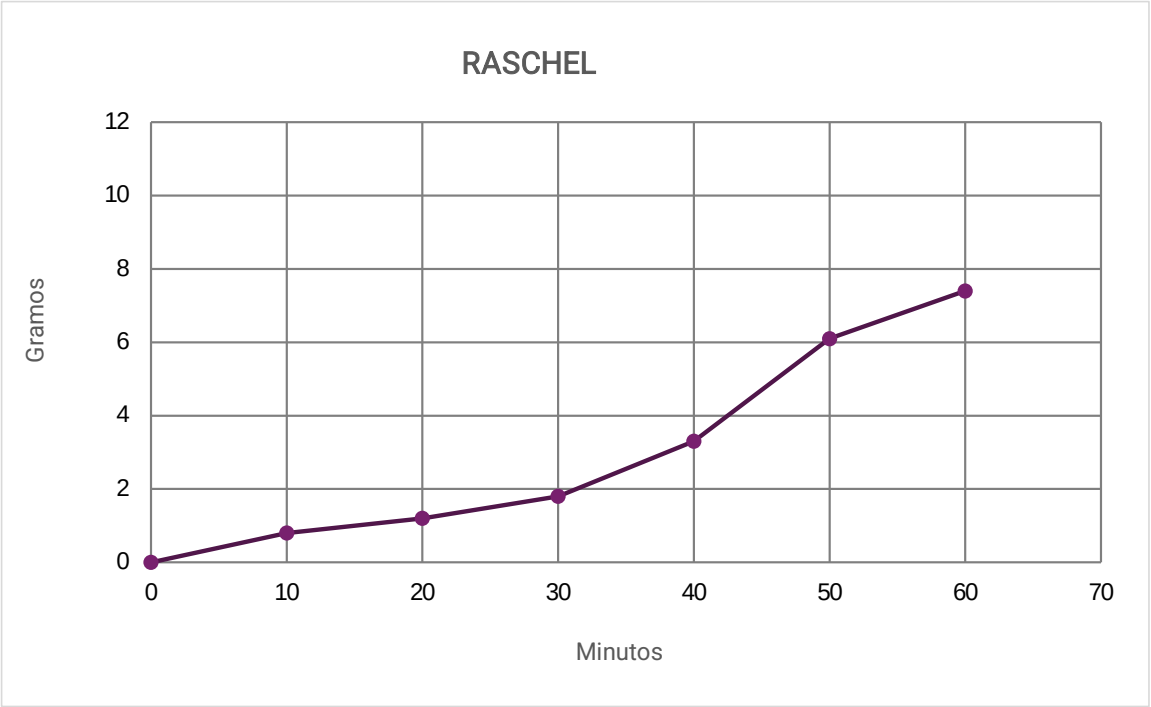


Gráfico 24. Resultados RASCHEL tiempo de exposición - sin viento
Fuente: Elaboración propia (2026)

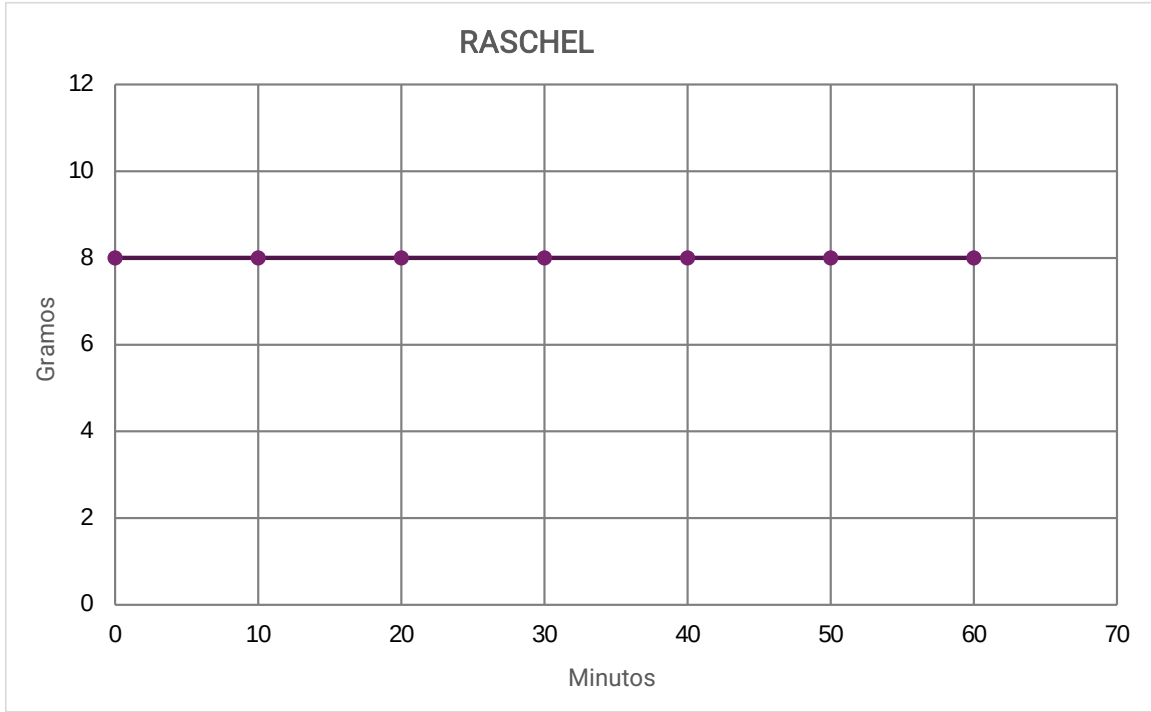


Gráfico 25. Resultados raschel tiempo de decantación - sin viento
Fuente: Elaboración propia (2026)

RESULTADOS EXPERIMENTO

GRUPO CONTROL MALLA RASCHEL - CON VIENTO

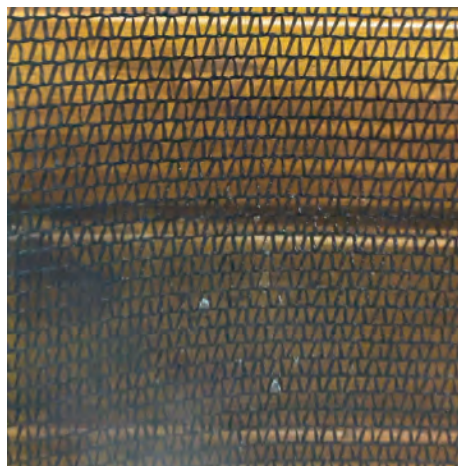
RESULTADOS CUALITATIVOS

La masa recolectada presentó un incremento continuo durante la etapa de exposición, alcanzando aproximadamente 7,4 g al finalizar la hora de generación de niebla. Durante la etapa de decantación se registró un aumento adicional hasta aproximadamente 8 g, concentrándose la mayor variación en los primeros minutos posteriores al término de la exposición. A partir de ese momento, la masa recolectada permaneció prácticamente constante hasta finalizar el período de observación. Asimismo, durante la etapa de exposición los mayores incrementos se registraron entre los 40 y 60 minutos, intervalo en el que se observó la mayor acumulación de agua en el recipiente colector.

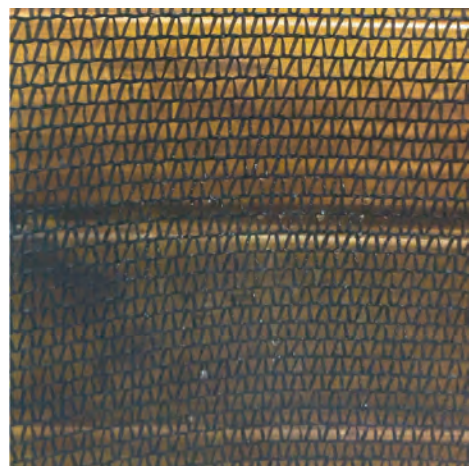
HORA DE EXPOSICIÓN A NIEBLA



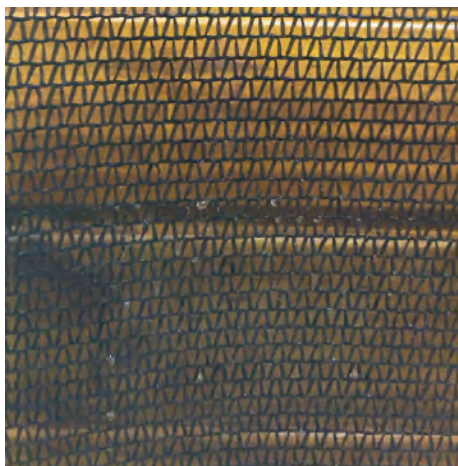
10 min



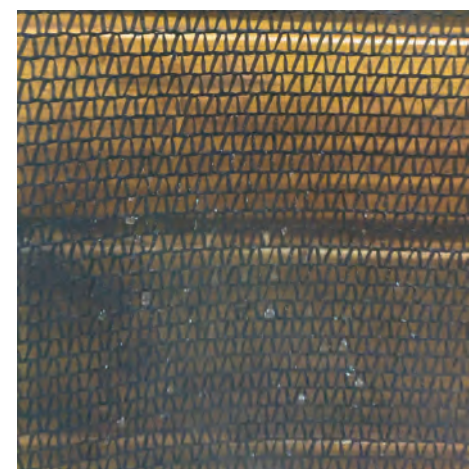
20 min



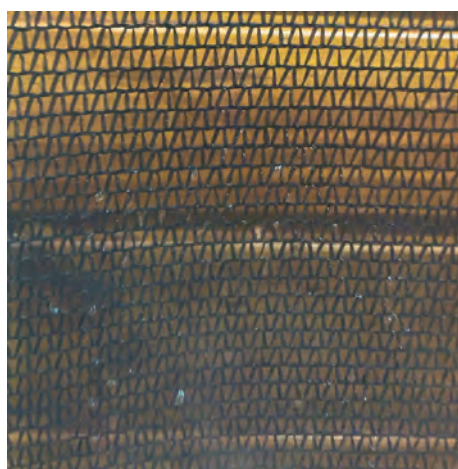
30 min



40 min

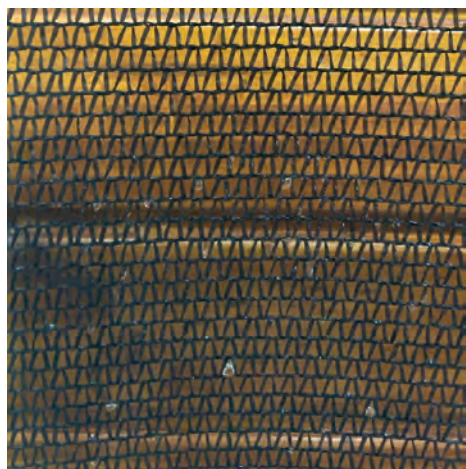


50 min



60 min

Fig. 123. Experimento RASCHEL - con viento (exposición)
Fuente: Elaboración propia (2026)



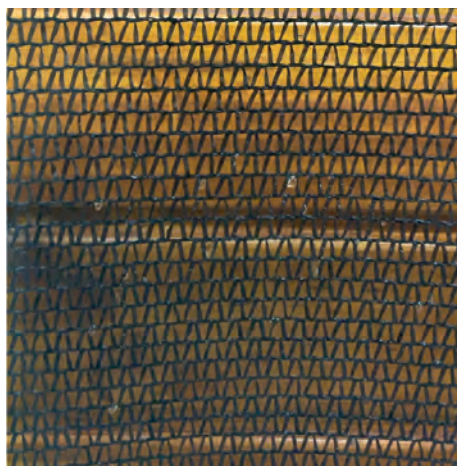
10 min



20 min



30 min



40 min



50 min



60 min

Fig. 124. Experimento RASCHEL - con viento (decantación)
Fuente: Elaboración propia (2026)

RESULTADOS CUANTITATIVOS

La masa recolectada se mantuvo muy reducida durante toda la etapa de exposición, registrándose únicamente un leve incremento hacia los minutos finales del ensayo. Durante la etapa de decantación no se observaron aumentos significativos en la masa recolectada, permaneciendo los registros prácticamente constantes hasta el término del período de observación. Este comportamiento coincide con las observaciones cualitativas, donde las microgotas permanecieron distribuidas sobre los filamentos de la malla sin generar un escurrimiento apreciable hacia el recipiente colector, desapareciendo progresivamente por secado al finalizar el ensayo

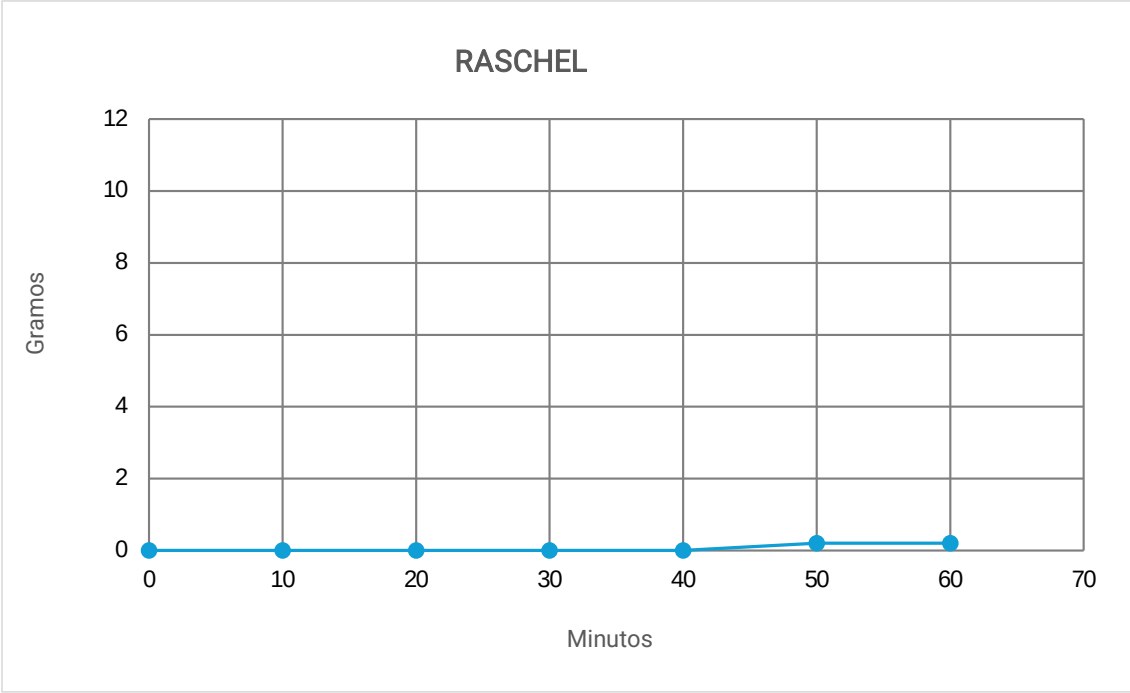


Grafico 26. Resultados RASCHEL tiempo de exposición - con viento
Fuente: Elaboración propia (2026)

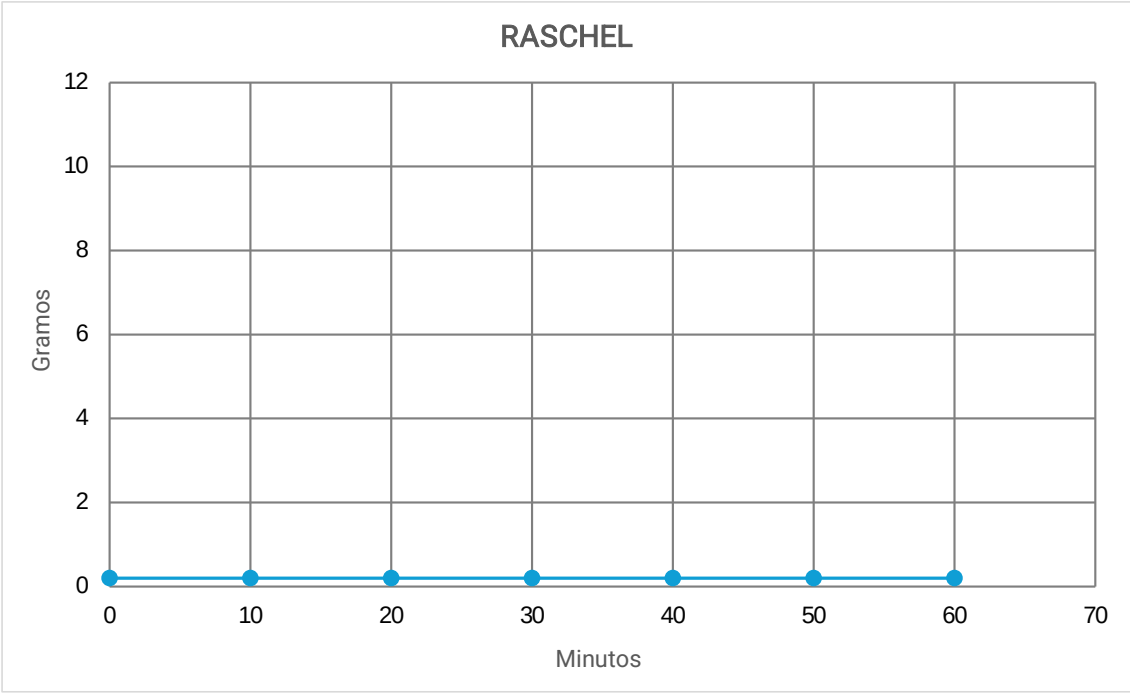


Grafico 27. Resultados raschel tiempo de decantación - con viento
Fuente: Elaboración propia (2026)

COMPARACIÓN RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

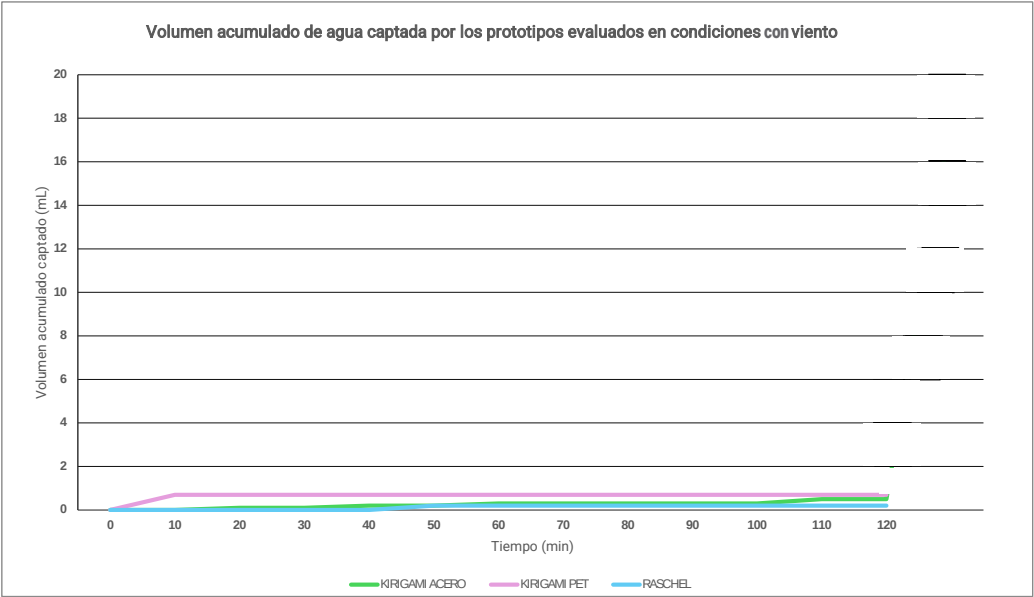


Gráfico 28. Resultados experimentos con viento (tiempo de exposición y decantación Fuente: Elaboración propia (2026)

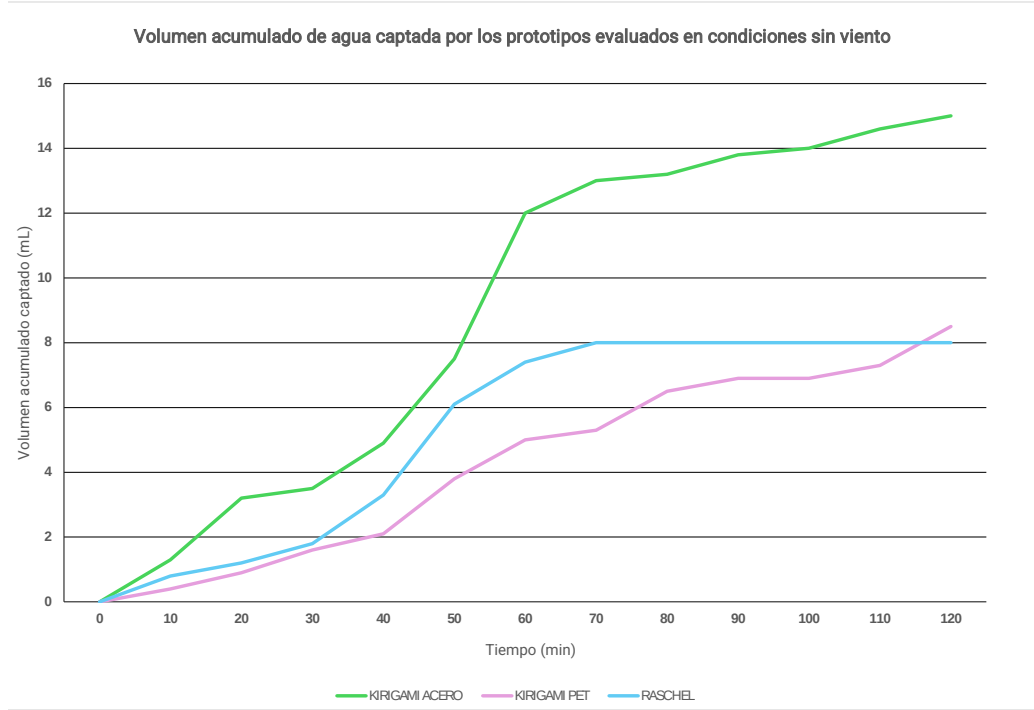


Gráfico 29. Resultados experimentos sin viento (tiempo de exposición y decantación Fuente: Elaboración propia (2026)

Prototipo	Condición	Volumen final (mL)	Eficiencia ($\text{mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)
Kirigami acero	Sin viento	15	20,83
Kirigami acero	Con viento	0,5	0,69
Kirigami PET	Sin viento	8,5	11,81
Kirigami PET	Con viento	0,7	0,97
Malla Raschel	Sin viento	8	11,11
Malla Raschel	Con viento	0,2	0,28

Tabla 10. Cálculo de eficiencias de acuerdo con resultados de experimento .
Fuente: Elaboración propia (2026)

La Tabla 10 resume los valores de eficiencia obtenidos para cada uno de los prototipos evaluados, calculados a partir del volumen total recuperado al término del período de decantación. Para la condición sin viento, el panel kirigami de acero alcanzó una eficiencia de 20,83 $\text{mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, mientras que el panel kirigami de PET registró 11,81 $\text{mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ y la malla Raschel 11,11 $\text{mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. En la condición con viento, las eficiencias registradas fueron 0,69 $\text{mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ para el kirigami de acero, 0,97 $\text{mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ para el kirigami de PET y 0,28 $\text{mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ para la malla Raschel.

Los gráficos de volumen acumulado permiten visualizar la evolución temporal de la captación durante la hora de exposición a la niebla y la posterior etapa de decantación. En la condición sin viento se observa un incremento progresivo del volumen recolectado en los tres prototipos, con diferencias en la pendiente de crecimiento y en el volumen final alcanzado al término del ensayo. Asimismo, durante la etapa de decantación se registran variaciones adicionales en los tres sistemas, evidenciando la continuidad del escurrimiento una vez finalizada la generación de niebla.

En la condición con viento, los tres prototipos presentan un comportamiento distinto, registrándose volúmenes acumulados considerablemente menores durante todo el período experimental. Las curvas muestran incrementos reducidos tanto durante la exposición como durante la etapa de decantación, alcanzando valores finales inferiores a 1 mL en todos los casos.

08

***CAPÍTULO
OCHO***

CONCLUSIONES Y PROYECCIONES

8.1 VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

8.2 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LOS PROTOTIPOS

8.3 FACTIBILIDAD CONSTRUCTIVA

8.4 PROYECCIONES

08 CONCLUSIONES Y PROYECCIONES

8.1 VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

El desarrollo experimental tuvo como propósito evaluar el desempeño de tres superficies captadoras de agua atmosférica bajo condiciones controladas de laboratorio, con el fin de verificar la influencia de la geometría kirigami en la eficiencia de captación respecto de una superficie convencional. Para ello, se comparó un panel kirigami de acero galvanizado, un panel kirigami de PET y un panel de malla Raschel utilizado como grupo control, manteniendo constantes las condiciones de exposición, el tiempo de ensayo y el montaje experimental.

Los resultados obtenidos permiten rechazar la hipótesis nula (H_0) y respaldan la hipótesis de investigación (H_1), evidenciando que la incorporación de una geometría kirigami modifica el desempeño de la captación de agua atmosférica respecto de una superficie convencional. La magnitud de este efecto varía en función del material empleado y de las condiciones de exposición evaluadas.

En condiciones sin flujo de aire, el panel kirigami de acero galvanizado alcanzó la mayor eficiencia de captación ($20,8 \text{ mL}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), superando tanto al panel kirigami de PET ($11,8 \text{ mL}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) como a la malla Raschel utilizada como referencia ($11,1 \text{ mL}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$). Este comportamiento fue consistente con las observaciones cualitativas, donde el acero presentó una mayor formación de microgotas y un escurrimiento sostenido durante la etapa de decantación.

En la condición con flujo de aire, los tres sistemas experimentaron una disminución considerable en el volumen recuperado, registrándose eficiencias inferiores a $1 \text{ mL}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Las observaciones cualitativas mostraron que el flujo de aire modificó el comportamiento de las microgotas, favoreciendo su desplazamiento sobre las superficies pero dificultando su crecimiento hasta alcanzar un tamaño suficiente para desprenderse por gravedad. En consecuencia, el volumen finalmente recuperado en los recipientes colectores fue significativamente menor que en la condición sin viento.

En conjunto, los resultados experimentales confirman que la incorporación de una geometría kirigami puede modificar el comportamiento de captación y drenaje del agua atmosférica, aunque su desempeño depende de la interacción entre la geometría, las propiedades del material y las condiciones de exposición. Estos antecedentes constituyen la base para una exploración mayor y para la discusión de la factibilidad del sistema como envolvente.

8.2 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LOS PROTOTIPOS

Los resultados obtenidos evidencian que el desempeño de los sistemas captadores no depende exclusivamente de la geometría empleada, sino de la interacción entre la geometría, las propiedades del material y las condiciones de exposición. Aunque los dos paneles kirigami compartían la misma configuración geométrica, ambos presentaron comportamientos significativamente diferentes, mientras que la malla Raschel mostró un patrón de captación distinto al de las superficies plegadas. Estas diferencias fueron consistentes tanto en los registros cuantitativos como en las observaciones cualitativas realizadas durante los ensayos.

El panel kirigami de acero galvanizado presentó el mejor desempeño bajo la condición sin viento, alcanzando la mayor eficiencia de captación entre los sistemas evaluados. Durante la exposición se observó una distribución relativamente uniforme de las microgotas sobre la superficie, seguida por un crecimiento progresivo y un escurrimiento sostenido durante la etapa de decantación. Este comportamiento permitió recuperar una mayor proporción del agua interceptada, evidenciando una adecuada interacción entre la geometría kirigami y las propiedades superficiales del acero.

En contraste, el panel kirigami de PET presentó una menor eficiencia de captación. Si bien la geometría permitió la formación de microgotas, estas permanecieron adheridas a la superficie durante gran parte del ensayo, alcanzando un escurrimiento limitado durante la decantación. En numerosas ocasiones las gotas desaparecieron por secado antes de alcanzar un tamaño suficiente para desprenderse, reduciendo el volumen finalmente recuperado en el recipiente colector. Estos resultados muestran que la incorporación de una misma geometría no garantiza un comportamiento equivalente cuando cambia el material sobre el cual se implementa.

La malla Raschel presentó un comportamiento intermedio. Durante la exposición se observó una rápida formación de microgotas sobre los filamentos y un escurrimiento continuo durante la etapa de decantación. Sin embargo, el volumen total recuperado fue inferior al obtenido por el panel kirigami de acero galvanizado. Como superficie de referencia, la malla permitió establecer una base de comparación que evidenció el potencial de la geometría kirigami para mejorar la captación cuando se combina con un material adecuado.

Si bien la geometría kirigami constituye el principal objeto de estudio de esta investigación, los resultados evidencian que las propiedades propias de cada material también influyen en el desempeño del sistema. En particular, el mayor rendimiento observado en el panel de acero galvanizado sugiere que variables no consideradas inicialmente, las propiedades térmicas del material, particularmente su conductividad e inercia térmica, podrían haber favorecido la condensación y el crecimiento de las microgotas sobre la superficie, además del efecto geométrico asociado a la coalescencia y el drenaje. En contraste, el PET, caracterizado por una baja conductividad térmica y una reducida capacidad para almacenar calor, presentó una menor formación y crecimiento de gotas, mientras que la malla Raschel, debido a su baja masa y escasa inercia térmica, dependió principalmente de la intercepción mecánica de las microgotas. Aunque estas variables no fueron evaluadas directamente durante el desarrollo experimental, los resultados obtenidos indican que constituyen factores relevantes para comprender el comportamiento del sistema y representan una línea de investigación de interés para futuras etapas de desarrollo.

En este sentido, la eficiencia observada no parecería depender únicamente de la geometría kirigami, sino también de la interacción entre la configuración geométrica y las propiedades térmicas y superficiales del material utilizado.

Por otro lado, la incorporación de flujo de aire modificó significativamente el comportamiento observado en los tres prototipos. Aunque el viento favoreció el desplazamiento de las microgotas sobre las superficies, también limitó su crecimiento y redujo el tiempo de permanencia necesario para que alcanzaran un tamaño suficiente para escurrir hacia el recipiente colector. Como consecuencia, todos los sistemas presentaron una disminución considerable del volumen recuperado respecto de la condición sin viento, independientemente del material evaluado.

No obstante, es importante considerar que el flujo de aire generado durante los ensayos (0,8–1,2 m/s) se encuentra dentro del rango de velocidades habitualmente asociadas al transporte de la camanchaca. Sin embargo, la niebla producida mediante generadores ultrasónicos presenta características físicas distintas a la niebla natural, particularmente en el tamaño de sus microgotas, las cuales son considerablemente más finas. Esta condición constituye una limitación inherente al montaje experimental y debe ser considerada al interpretar los resultados cuantitativos. Aun así, desde un punto de vista cualitativo, los ensayos permitieron observar que la geometría kirigami respondió de manera consistente frente al flujo de niebla, favoreciendo la formación, conducción y crecimiento de microgotas sobre su superficie, lo que representa un resultado relevante para futuras validaciones en condiciones ambientales reales.

Desde una perspectiva de desarrollo tecnológico, los resultados obtenidos permitieron comprender el comportamiento de ambos materiales frente a una misma configuración kirigami e identificar las principales variables que condicionan el desempeño del sistema. Asimismo, la validación experimental permitió detectar aspectos de diseño susceptibles de optimización, tanto en la selección de materiales como en la geometría, el sistema de drenaje y las condiciones de operación, estableciendo una base objetiva para la evolución del prototipo en futuras etapas de desarrollo.

8.3 FACTIBILIDAD CONSTRUCTIVA

El desarrollo de los dos prototipos permitió evaluar la factibilidad constructiva del sistema desde una perspectiva integral, considerando no solo su desempeño hidráulico, sino también aspectos asociados a su fabricación, ensamblaje, mantención y potencial aplicación como componente de envolvente arquitectónica. A diferencia de los estudios revisados en el estado del arte, centrados principalmente en la eficiencia de captación, la presente investigación incorporó criterios propios del diseño arquitectónico, abordando el sistema como un panel constructivo susceptible de integrarse a edificaciones.

En términos de fabricación, ambos prototipos demostraron que la geometría kirigami puede ser materializada mediante procesos industriales convencionales, tales como el corte láser y el plegado de láminas. Asimismo, la utilización de perfiles y elementos de fijación disponibles comercialmente permitió desarrollar un sistema basado en componentes estandarizados, favoreciendo la reposición de piezas, la mantención y una eventual fabricación seriada. Estas características representan una ventaja desde el punto de vista constructivo, al reducir la dependencia de elementos especialmente diseñados para el sistema.

No obstante, la fabricación y el montaje del primer prototipo evidenciaron diversas limitaciones asociadas a la elevada cantidad de componentes y fijaciones requeridas para conformar el panel. El proceso de ensamblaje demandó una secuencia compleja de montaje, particularmente en la instalación de la lámina kirigami entre las piezas de caucho y el perfil estructural, aumentando considerablemente los tiempos de fabricación. Asimismo, la gran cantidad de perforaciones necesarias para las uniones mecánicas representó un potencial incremento en los puntos susceptibles a procesos de corrosión, aspecto especialmente relevante considerando la exposición permanente del sistema a ambientes de elevada humedad.

Estas observaciones permitieron orientar el desarrollo del segundo prototipo hacia una solución constructiva más racionalizada, reduciendo el número de componentes, simplificando el sistema de uniones y optimizando el proceso de ensamblaje.

Paralelamente, la racionalización constructiva implementada en el segundo prototipo se tradujo en una disminución significativa del costo estimado de materiales, reduciéndose desde \$16.103 para el primer prototipo a \$9.468 para la alternativa desarrollada en PET. Si bien esta estimación considera exclusivamente el costo de los materiales y no incorpora procesos de fabricación, mano de obra ni montaje, constituye un indicador relevante de cómo las decisiones de diseño inciden directamente en la factibilidad económica y constructiva del sistema.

Sin embargo, los resultados experimentales evidenciaron que el panel kirigami de acero galvanizado alcanzó la mayor eficiencia de captación entre los prototipos evaluados, mientras que el segundo prototipo demostró las mayores ventajas desde el punto de vista constructivo, al reducir el número de componentes, simplificar el sistema de uniones y optimizar el proceso de ensamblaje. En este contexto, la configuración con mayor potencial de desarrollo corresponde a la integración de la lámina kirigami de acero con el sistema constructivo racionalizado del segundo prototipo, combinación que no fue considerada en la evaluación económica desarrollada durante esta investigación.

PRODUCTO	Dimensiones c/u			PRECIO	Unidades A Comprar	Dimension material Comprado	Dimension material Utilizado	Merma	Valor TOTAL	Valor Unitario Panel
	Ancho	Alto	Largo							
MARCO DE PANEL										
Perfil C Metalcon Estructural Metal			2,4	\$ 2.990	1	2,4	2,4	0	\$2.990	\$2.990
Estructura Omega Metal			3	\$ 3.620	1	3	1,2	1,8	\$3.620	\$1.448
Perfil U Metalcon Estructural Metal			3	\$ 2.650	2	3	1,2	2,4	\$5.300	\$2.120
ATRAPANIEBLAS KIRIGAMI										
Plancha Acero laminado en frio	0,5	1	3	\$ 10.000	1	3	1,26	2,28	\$10.000	\$4.200

PRODUCTO	PRECIO UNITARIO	PRECIO caja	caja A Comprar	CANTIDAD caja	Unidades utilizadas	Merma	Valor TOTAL	Valor Unitario Panel
FIJACIONES								
Remaches 3/32	\$ 20	\$ 20	16	1	16	0	\$320	\$320
Tornillo madera 1 1/4"	\$ 61,6	\$ 1.540	1	25	8	17	\$1.540	\$493

TOTAL	\$23.770	\$11.571
-------	----------	----------

Tabla 11. Presupuesto estimado de la propuesta optimizada (Kirigami acero +

El presupuesto obtenido para la propuesta optimizada alcanza un valor estimado de \$11.571 por panel, cifra que se sitúa entre las dos alternativas desarrolladas durante la investigación. Si bien representa un incremento respecto al prototipo construido en PET, continúa siendo considerablemente inferior al costo del primer prototipo, manteniendo las ventajas asociadas a la racionalización del sistema constructivo y la reducción del número de componentes y fijaciones.

Desde una perspectiva técnico-económica, esta configuración constituye la alternativa con mayor potencial de desarrollo, al integrar el material que obtuvo el mejor desempeño experimental con el sistema de montaje más eficiente desarrollado durante la investigación. En este sentido, el aumento en el costo de la lámina de acero se justifica por la mejora observada en la eficiencia de captación, permitiendo alcanzar un equilibrio entre desempeño hidráulico, factibilidad constructiva y viabilidad económica.

8.4 PROYECCIONES

Los resultados obtenidos durante la presente investigación permitieron validar experimentalmente el principio de funcionamiento del sistema en condiciones controladas de laboratorio, alcanzando un Nivel de Madurez Tecnológica TRL 4. En este contexto, las proyecciones del proyecto se orientan a consolidar el desarrollo del prototipo mediante el mejoramiento de su desempeño, su factibilidad constructiva y su futura validación en condiciones reales de operación.

En primer lugar, una de las principales líneas de desarrollo corresponde a la optimización de la interacción entre geometría y material. Los resultados evidenciaron que el desempeño del sistema no depende únicamente de la configuración kirigami, sino también de las propiedades físicas del material empleado.

En este sentido, futuras investigaciones podrían profundizar en el estudio de variables como la conductividad térmica, la inercia térmica, la energía superficial y la rugosidad del material, evaluando su influencia sobre la condensación, la formación de microgotas, la coalescencia y el drenaje del agua atmosférica. Asimismo, resulta pertinente explorar nuevos materiales y tratamientos superficiales que potencien estos fenómenos sin comprometer la factibilidad constructiva del sistema.

Una segunda línea de desarrollo corresponde a la optimización del diseño constructivo. A partir de la experiencia obtenida durante la fabricación y el ensamblaje de los prototipos, se identificaron oportunidades para reducir aún más el número de componentes, simplificar las uniones mecánicas, minimizar potenciales puntos de corrosión e integrar de manera más eficiente el sistema de conducción y almacenamiento del agua. Estas mejoras permitirían avanzar hacia un panel con mayor facilidad de fabricación, instalación y mantención, fortaleciendo su viabilidad como componente de envolvente arquitectónica.

PROYECCIÓN DEL POTENCIAL DE CAPTACIÓN EN CONDICIONES REALES

En términos experimentales, la siguiente etapa del desarrollo tecnológico corresponde a la validación del sistema en condiciones ambientales reales, evaluando el comportamiento del prototipo frente a eventos naturales de camanchaca. Esta etapa permitirá verificar el desempeño del panel bajo un entorno operativo representativo y determinar si la mejora de eficiencia observada en laboratorio se mantiene frente a las condiciones atmosféricas propias de los sitios de emplazamiento.

A partir de los resultados obtenidos es posible realizar una primera aproximación del potencial de captación del sistema. Bajo condiciones controladas, el panel kirigami de acero galvanizado presentó una eficiencia aproximadamente 87,5 % superior a la obtenida por la malla Raschel utilizada como grupo control. Si esta relación de desempeño se mantuviera en condiciones reales, y considerando los rendimientos reportados en la literatura para atrapanieblas convencionales (1,8 a 12 L·día⁻¹), el sistema desarrollado podría alcanzar teóricamente producciones del orden de 3,4 a 22,5 L·día⁻¹.

Sin embargo, esta estimación corresponde únicamente a una proyección teórica basada en una extrapolación proporcional y no constituye un rendimiento validado experimentalmente. La validación en terreno permitirá determinar el comportamiento real del sistema frente a variables propias de la camanchaca, tales como la distribución del tamaño de las microgotas, las condiciones de viento y la respuesta térmica de los materiales, consolidando el avance del prototipo hacia niveles superiores de madurez tecnológica.

Finalmente, el desarrollo futuro del proyecto podría orientarse hacia la consolidación del panel como una envolvente arquitectónica multifuncional, integrando la captación y conducción de agua atmosférica con estrategias de prefabricación, modularidad y eficiencia constructiva. De forma complementaria, resulta pertinente evaluar su aporte al desempeño ambiental de la vivienda, considerando aspectos como el control higrotérmico, la protección solar y la mejora de las condiciones de habitabilidad en contextos rurales afectados por la escasez hídrica.

09

***CAPÍTULO
NUEVE***

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBORNOZ, Francisco; DEL RÍO, Camilo; CARTER, Virginia; ESCOBAR, Rodrigo y VÁSQUEZ, Lucas. Fog Water Collection for Local Greenhouse Vegetable Production in the Atacama Desert. *Sustainability*. 2023, vol. 15, n.º 22, art. 15720. DOI: 10.3390/su152215720.

ATENCIO, Reinaldo; BRICEÑO, Alexander. Cosecha de humedad atmosférica: nuevos materiales y tecnologías bioinspirados para mitigar la escasez de agua. *Ciencia en Revolución*, vol. 9, n.º 25, pp. 156–188, 2023. DOI: 10.5281/zenodo.8335641.

BAEZA G., Eduardo. Situación actual de los servicios sanitarios de agua potable y alcantarillado en zonas urbanas y rurales en Chile. *Minuta*. Santiago, Chile: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Asesoría Técnica Parlamentaria, abril de 2025

BAEZA, Eduardo y TORRES, Rafael. Situación de la demanda de recursos hídricos en Chile por parte de los principales usuarios (SUP 129.110). *Minuta de Asesoría Técnica Parlamentaria*. Santiago, Chile: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, diciembre de 2020.

BANCO MUNDIAL. Chile Rural Brief 2021. Washington, D.C.: Banco Mundial, 2021.

BINTEIN, Pierre-Brice [et al.]. Kirigami fog nets: how strips improve water collection. *npj Clean Water*. Vol. 6, art. 54, 2023. DOI: 10.1038/s41545-023-00266-6.

BINTEIN, Pierre-Brice; CORNU, Axel; WEYER, Floriane; DE COSTER, Nicolás; VANDEWALLE, Nicolas; TERWAGNE, Denis. Kirigami fog nets: how strips improve water collection. *npj Clean Water*. 6(54), 2023.

CELLUCCI, Michael; CHEN, Joshua; HOANG, Son y JADEJA, Kunal. Zero-Energy and Low-Cost Kirigami-Based Hydrogel Composite Dehumidification System: Final Report. Philadelphia, PA: University of Pennsylvania, 2022.

CERECEDA, Pilar; HERNÁNDEZ, Pedro; LEIVA, Jorge; RIVERA, Juan de Dios (eds.). Agua de niebla: nuevas tecnologías para el desarrollo sustentable en zonas áridas y semiáridas. Chile: Consultora Profesional Agraria Sur, Pontificia Universidad Católica de Chile y Dirección General de Aguas, 2014.

CERECEDA, Pilar; LARRAIN, Horacio; OSSES, Pablo; FARÍAS, Marcelo y EGAÑA, Iván. The climate of the coast and fog zone in the Tarapacá region, Atacama Desert, Chile. *Atmospheric Research*. 2008, vol. 87, n.os 3–4, pp. 301–311.

CORPORACIÓN DE FOMENTO DE LA PRODUCCIÓN (CORFO). Nivel de Madurez de la Tecnología (Technology Readiness Levels, TRL). Santiago, Chile: CORFO, s.f.

DEL RÍO, Camilo; CARTER, Virginia; LOBOS-ROCO, Felipe; ASTABURUAGA, Juan Pablo; QÜENSE, Jorge; RIVERA, Daniela; ESPINOZA, Vicente; ANABALÓN, Gabriela; BONET, Malcom; OSSES, Pablo y CONTRERAS, Catalina. Mapa de agua de niebla (18°–35°S): Modelo de disponibilidad y gobernanza de una fuente complementaria para territorios de escasez hídrica [recurso interactivo]. Santiago, Chile: Centro UC Desierto de Atacama, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2025. DOI: 10.7764/CDAUC.BD.01.

ESCOBAR, Manuel y GARCÍA, Magdalena. Camanchaca. Flujos etnonímicos y neblineros en la costa norte de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*. 2017, n.º 68, pp. 11–32. ISSN 0718-3402.

FUNDACIÓN AMULÉN. Radiografía del agua rural de Chile: visualización de un problema oculto. Santiago, Chile: Fundación Amulén, 2019. 100 p.

FUNDACIÓN CHILE. Sistemas alternativos de captación: Atrapaniebla. Guía de Soluciones Sanitarias Sustentables. Santiago, Chile: Fundación Chile, 2021. Proyecto Bien Público "Estándares de soluciones sanitarias sustentables para servicios turísticos en áreas silvestres protegidas y zonas rurales", financiado por CORFO

JIN, L. y YANG, S. Engineering Kirigami Frameworks Toward Real-World Applications. *Advanced Materials*, vol. 36, art. 2308560, 2024. DOI: 10.1002/adma.202308560.

KEIM-VERA, K.; LOBOS-ROCO, F.; AGUIRRE, I.; MERINO, C. y DEL RÍO, C. Fog types frequency and their collectable water potential in the Atacama Desert. *Atmospheric Research*. 2024, vol. 312, art. 107747. DOI: 10.1016/j.atmosres.2024.107747

KENNEDY, B. S. y BOREYKO, J. B. Bio-Inspired Fog Harvesting Meshes: A Review. *Advanced Functional Materials*, vol. 34, art. 2306162, 2024. DOI: 10.1002/adfm.202306162.

LADERA SUR. Los atrapanieblas y el legado de Carlos Espinosa, el científico que soñaba con entregar agua de neblina al norte del país. [en línea]. Julio, 2022. [consulta: 09 julio 2026]. Disponible en: <https://laderasur.com/articulo/los-atrapanieblas-y-el-legado-de-carlos-espinosa-el-cientifico-que-sonaba-con-entregar-agua-de-neblina-al-norte-del-pais/>

LI, Jing; RAN, Ranjiangshang; WANG, Haihuan; WANG, Yuchen; CHEN, You; NIU, Shichao; ARRATIA, Paulo E.; YANG, Shu. Aerodynamics-assisted, efficient and scalable kirigami fog collectors. *Nature Communications*, vol. 12, artículo 5484, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25764-4>

LI, Liubin; WANG, Xiaobo; XIN, Yan; HE, Shiping; FU, Ye; AI, Shulun y GUO, Zhiguang. Superhydrophobic Bulgy Windmill for Synchronous Efficient Fog Collection and Power Generation. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2024, vol. 16, n.º 12, p. 15496-15504. DOI: 10.1021/acsami.3c17709.

LI, Liubin; ZHANG, Yihang; WANG, Xiaobo; HE, Yuxuan; HUANG, Ben y GUO, Zhiguang. Biomimetic high-efficiency fog collector based on fractal spiral structure. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2025, vol. 683, p. 39-48. DOI: 10.1016/j.jcis.2024.12.148.

LI, Shanpeng; ZHU, Jingxin; LIU, Cong; ZHANG, Ruihua; LIU, Jianlin y GUO, Zhiguang. Load-responsive bionic kirigami structures for high-efficient fog harvesting. *Chemical Engineering Journal*. 2023, vol. 464, art. 142549. DOI: 10.1016/j.cej.2023.142549.

MINISTERIO DE BIENES NACIONALES. Ruta Patrimonial Bien Nacional Protegido N.º 57: Oasis de Niebla Alto Patache. Un refugio en el desierto. Santiago, Chile, 2010.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (MOP). Demanda hídrica actual y futura. En: Plan Nacional de Infraestructura Pública 2025–2055. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas. Disponible en: Plan Nacional de Infraestructura Pública 2025–2055 – Demanda hídrica actual y futura.

NIKBAKHT, Sina; HEYHAT, Mohammad Mahdi. Experimental study of folded metal mesh for efficient fog harvesting. *Scientific Reports*, vol. 15, art. 19367, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04345-1>

PENG, Zhouliang; FU, Ye y GUO, Zhiguang. Origami-like 3D Fog Water Harvester with Hybrid Wettability for Efficient Fog Harvesting. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2023, vol. 15, n.º 31, pp. 38110–38123. DOI: 10.1021/acsami.3c07343.

RIVERA, Juan de Dios. Aerodynamic collection efficiency of fog water collectors. *Atmospheric Research*. 102: 335-342, 2011.

SISTEMA DE LAS NACIONES UNIDAS EN CHILE. Escasez hídrica en Chile: desafíos pendientes. Serie Aportes para un Desarrollo Sostenible, n.º 1. Santiago, Chile: Sistema de las Naciones Unidas en Chile, febrero de 2021.

SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS (SISS). Consumo de agua potable 2007–2008. Santiago, Chile: Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2009.

WANG, Jiashuo; YANG, Ziyi; LI, Zekai; FU, Haoyu y CHEN, Jilai. Comprehensive review on atmospheric water harvesting technologies. *Journal of Water Process Engineering*, 69:106836, 2025.

WANG, Qiong; ZHANG, Yihang; TIAN, Guangyi y GUO, Zhiguang. An efficient fog collection origami Janus membrane for rapid directional water transport and omnidirectional fog harvesting. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2025, vol. 17, n.º 29, p. 42474-42485. DOI: 10.1021/acsami.5c10459.

WANG, Xiaobo; GUO, Zhiguang; LIU, Weimin. Efficient Water Mist Collector with Both a Kirigami Structure and Chemical Modification. *Langmuir*, vol. 39, n.º 25, pp. 8926–8934, 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c01296>

YU, Euseon. Study on fabrications of hierarchical nanostructures and its application. Tesis (Doctor en Ingeniería). Seúl, Corea del Sur: Seoul National University, Graduate School, Department of Materials Science and Engineering, 2017.

YU, Z.; ZHANG, J.; LI, S.; ZHOU, Z.; QIN, Z.; LIU, H.; LAI, Y.; FU, S. Bio-inspired Copper Kirigami Motifs Leading to a 2D–3D Switchable Structure for Programmable Fog Harvesting and Water Retention. *Advanced Functional Materials*, vol. 33, n.º 5, art. 2210730, 2023. DOI: 10.1002/adfm.202210730.

YU, Z.; ZHU, T.; ZHANG, J.; GE, M.; FU, S.; LAI, Y. Fog Harvesting Devices Inspired from Single to Multiple Creatures: Current Progress and Future Perspective. *Advanced Functional Materials*, vol. 32, n.º 26, art. 2200359, 2022. DOI: 10.1002/adfm.202200359.

ZHANG, Ruihua; LI, Shanpeng; ZHAN, Chengkai; ZHANG, Zhenya y GUO, Zhiguang. Efficient fog-harvesting origami fan. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2024, vol. 16, n.º 41, p. 55832-55841. DOI: 10.1021/acsami.4c14849.

10

***CAPÍTULO
DIEZ***

ANEXOS

EXPERIMENTO CON VIENTO

18-jun

DATOS RELEVANTES.	Hora de inicio
	10:03

	Peso
PESO PROBETA 500 ML	117,6 g
PESO PROBETA 100 ML	42,9 g
PESO EMBUDO AZUL	41,5 g

KIRIGAMI ACERO	1h exposicion a niebla
----------------	------------------------

		Minutos
TEMPERATURA AMBIENTE °C	18.1	0
HUMEDAD	55%	

TEMPERATURA AMBIENTE	18,3	10
HUMEDAD	61%	

TEMPERATURA AMBIENTE	18,1	20
HUMEDAD	62%	

TEMPERATURA AMBIENTE	18	30
HUMEDAD	64%	

TEMPERATURA AMBIENTE	18,3	40
HUMEDAD	62%	

TEMPERATURA AMBIENTE	18,2	50
HUMEDAD	63%	

TEMPERATURA AMBIENTE	18,2	60
HUMEDAD	63%	

KIRIGAMI ACERO	1h post niebla
----------------	----------------

		Minutos
TEMPERATURA AMBIENTE	18,3	0
HUMEDAD	62%	

TEMPERATURA AMBIENTE	18,7	10
HUMEDAD	57%	

TEMPERATURA AMBIENTE	18,8	20
HUMEDAD	55%	

TEMPERATURA AMBIENTE	18,9	30
HUMEDAD	55%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19	40
HUMEDAD	54%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19,1	50
HUMEDAD	54%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19,2	60
HUMEDAD	53%	

DATOS CUANTITATIVOS

Peso	Probeta+embudo+agua	Minutos	Solo agua
g	159,1	0	peso real
			0

g	159,1	10	peso real
			0

g	159,2	20	peso real
			0,1

g	159,2	30	peso real
			0,1

g	159,3	40	peso real
			0,2

g	159,3	50	peso real
			0,2

g	159,4	60	peso real
			0,3

DATOS CUANTITATIVOS

Peso	Probeta+embudo+agua	Minutos	Solo agua
g	159,4	0	peso real
			0,3

g	159,4	10	peso real
			0,3

g	159,4	20	peso real
			0,3

g	159,4	30	peso real
			0,3

g	159,4	40	peso real
			0,3

g	159,6	50	peso real
			0,5

g	159,6	60	peso real
			0,5

EXPERIMENTO SIN VIENTO

17-jun

DATOS RELEVANTES.	Hora de inicio
	12:15

	Peso
PESO PROBETA 500 ML	117,6 g
PESO PROBETA 100 ML	42,9 g
PESO EMBUDO AZUL	41,6 g

KIRIGAMI ACERO	1h exposicion a niebla
----------------	------------------------

		Minutos
TEMPERATURA AMBIENTE °C	18,7	0
HUMEDAD	52%	

TEMPERATURA AMBIENTE	18,9	10
HUMEDAD	52%	

TEMPERATURA AMBIENTE	18,9	20
HUMEDAD	51%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19	30
HUMEDAD	53%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19,2	40
HUMEDAD	52%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19,2	50
HUMEDAD	54%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19,2	60
HUMEDAD	54%	

KIRIGAMI ACERO	1h post niebla
----------------	----------------

		Minutos
TEMPERATURA AMBIENTE	19,4	0
HUMEDAD	53%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19,4	10
HUMEDAD	51%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19,5	20
HUMEDAD	50%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19,5	30
HUMEDAD	50%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19,9	40
HUMEDAD	49%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19,5	50
HUMEDAD	50%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19,4	60
HUMEDAD	50%	

DATOS CUANTITATIVOS

Peso	Probeta+embudo+agua	Minutos	Solo agua
g	159,2	0	peso real
			0

g	160,5	10	peso real
			1,3

g	162,4	20	peso real
			3,2

g	162,7	30	peso real
			3,5

g	164,1	40	peso real
			4,9

g	166,7	50	peso real
			7,5

g	171,2	60	peso real
			12

DATOS CUANTITATIVOS

Peso	Probeta+embudo+agua	Minutos	Solo agua
g	172,2	0	peso real
			12

g	172,2	10	peso real
			13

g	172,4	20	peso real
			13,2

g	173	30	peso real
			13,8

g	173,2	40	peso real
			14

g	173,8	50	peso real
			14,6

g	174,2	60	peso real
			15

EXPERIMENTO CON VIENTO

17-jun

DATOS RELEVANTES.	Hora de inicio
	11:35

	Peso
PESO PROBETA 500 ML	117,8 g
PESO PROBETA 100 ML	42,9 g
PESO EMBUDO AZUL	41,5 g

KIRIGAMI PET	1h exposicion a niebla
--------------	------------------------

		Minutos
TEMPERATURA AMBIENTE °C	20,1	0
HUMEDAD	53%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,1	10
HUMEDAD	53%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20	20
HUMEDAD	54%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19,9	30
HUMEDAD	56%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,2	40
HUMEDAD	55%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,2	50
HUMEDAD	55%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20	60
HUMEDAD	56%	

KIRIGAMI PET	1h post niebla
--------------	----------------

		Minutos
TEMPERATURA AMBIENTE	20,4	0
HUMEDAD	52%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,2	10
HUMEDAD	50%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,2	20
HUMEDAD	49%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,2	30
HUMEDAD	50%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,1	40
HUMEDAD	49%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,1	50
HUMEDAD	48%	

TEMPERATURA AMBIENTE		60
HUMEDAD		

DATOS CUANTITATIVOS

Peso	Probeta+embudo+agua	Minutos	Solo agua
g	159,3	0	peso real
			0

g	160	10	peso real
			0,7

g	160	20	peso real
			0,7

g	160	30	peso real
			0,7

g	160	40	peso real
			0,7

g	160	50	peso real
			0,7

g	160	60	peso real
			0,7

DATOS CUANTITATIVOS

Peso	Probeta+embudo+agua	Minutos	Solo agua
g	160	0	peso real
			0,7

g	160	10	peso real
			0,7

g	160	20	peso real
			0,7

g	160	30	peso real
			0,7

g	160	40	peso real
			0,7

g	160	50	peso real
			0,7

g	160	60	peso real
			0,7

EXPERIMENTO SIN VIENTO

19-jun

DATOS RELEVANTES.	Hora de inicio
	11:57

	Peso
PESO PROBETA 500 ML	117,6 g
PESO PROBETA 100 ML	42,9 g
PESO EMBUDO AZUL	41,5 g

KIRIGAMI PET	1h exposicion a niebla
--------------	------------------------

		Minutos
TEMPERATURA AMBIENTE °C	18	0
HUMEDAD	50%	

TEMPERATURA AMBIENTE	17,8	10
HUMEDAD	53%	

TEMPERATURA AMBIENTE	18,5	20
HUMEDAD	58%	

TEMPERATURA AMBIENTE	18,7	30
HUMEDAD	57%	

TEMPERATURA AMBIENTE	18,9	40
HUMEDAD	56%	

TEMPERATURA AMBIENTE	18,9	50
HUMEDAD	55%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19,4	60
HUMEDAD	54%	

KIRIGAMI PET	1h post niebla
--------------	----------------

		Minutos
TEMPERATURA AMBIENTE	19,4	0
HUMEDAD	51%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19,4	10
HUMEDAD	51%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19,6	20
HUMEDAD	51%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19,5	30
HUMEDAD	51%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19,6	40
HUMEDAD	50%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20	50
HUMEDAD	51%	

TEMPERATURA AMBIENTE	19,8	60
HUMEDAD	50%	

DATOS CUANTITATIVOS

Peso	Probeta+embudo+agua	Minutos	Solo agua
g	159,1	0	peso real
			0

g	159,5	10	peso real
			0,4

g	160	20	peso real
			0,9

g	160,7	30	peso real
			1,6

g	161,2	40	peso real
			2,1

g	162,9	50	peso real
			3,8

g	164,1	60	peso real
			5

DATOS CUANTITATIVOS

Peso	Probeta+embudo+agua	Minutos	Solo agua
g	164,1	0	peso real
			5

g	164,4	10	peso real
			5,3

g	165,6	20	peso real
			6,5

g	166	30	peso real
			6,9

g	166	40	peso real
			6,9

g	166,4	50	peso real
			7,3

g	167,6	60	peso real
			8,5

EXPERIMENTO CON VIENTO

17-jun

DATOS RELEVANTES.

Hora de inicio

9:15

	Peso
PESO PROBETA 500 ML	117,6 g
PESO PROBETA 100 ML	42,9 g
PESO EMBUDO AZUL	41,4 g

RASCHEL	1h exposicion a niebla
---------	------------------------

		Minutos
TEMPERATURA AMBIENTE °C	16,5	0
HUMEDAD	52%	

TEMPERATURA AMBIENTE	16,7	10
HUMEDAD	56%	

TEMPERATURA AMBIENTE	16,7	20
HUMEDAD	56%	

TEMPERATURA AMBIENTE	17	30
HUMEDAD	55%	

TEMPERATURA AMBIENTE	17	40
HUMEDAD	56%	

TEMPERATURA AMBIENTE	17,1	50
HUMEDAD	56%	

TEMPERATURA AMBIENTE	17,2	60
HUMEDAD	56%	

KIRIGAMI PET	1h post niebla
--------------	----------------

		Minutos
TEMPERATURA AMBIENTE	17,2	0
HUMEDAD	53%	

TEMPERATURA AMBIENTE	17,4	10
HUMEDAD	51%	

TEMPERATURA AMBIENTE	17,7	20
HUMEDAD	51%	

TEMPERATURA AMBIENTE	17,6	30
HUMEDAD	50%	

TEMPERATURA AMBIENTE	17,9	40
HUMEDAD	51%	

TEMPERATURA AMBIENTE		50
HUMEDAD		

TEMPERATURA AMBIENTE		60
HUMEDAD		

DATOS CUANTITATIVOS

Peso	Probeta+embudo+agua	Minutos	Solo agua
g	159	0	peso real
			0

g	159	10	peso real
			0

g	159	20	peso real
			0

g	159	30	peso real
			0

g	159	40	peso real
			0

g	159,2	50	peso real
			0,2

g	159,2	60	peso real
			0,2

DATOS CUANTITATIVOS

Peso	Probeta+embudo+agua	Minutos	Solo agua
g	159,2	0	peso real
			0,2

g	159,2	10	peso real
			0,2

g	159,2	20	peso real
			0,2

g	159,2	30	peso real
			0,2

g	159,2	40	peso real
			0,2

g	159,2	50	peso real
			0,2

g	159,2	60	peso real
			0,2

EXPERIMENTO SIN VIENTO

18-jun

DATOS RELEVANTES.	Hora de inicio
	12:15

	Peso
PESO PROBETA 500 ML	117,6 g
PESO PROBETA 100 ML	42,9 g
PESO EMBUDO AZUL	41,6 g

RASCHEL	1h exposicion a niebla
---------	------------------------

		Minutos
TEMPERATURA AMBIENTE °C	20,6	0
HUMEDAD	55%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,6	10
HUMEDAD	55%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,6	20
HUMEDAD	56%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,5	30
HUMEDAD	52%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,5	40
HUMEDAD	54%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,3	50
HUMEDAD	52%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,2	60
HUMEDAD	53%	

KIRIGAMI PET	1h post niebla
--------------	----------------

		Minutos
TEMPERATURA AMBIENTE	20,2	0
HUMEDAD	53%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,6	10
HUMEDAD	51%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,3	20
HUMEDAD	50%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,3	30
HUMEDAD	50%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,4	40
HUMEDAD	50%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,4	50
HUMEDAD	50%	

TEMPERATURA AMBIENTE	20,4	60
HUMEDAD	50%	

DATOS CUANTITATIVOS

Peso	Probeta+embudo+agua	Minutos	Solo agua
g	159,2	0	peso real
			0

g	160	10	peso real
			0,8

g	160,4	20	peso real
			1,2

g	161	30	peso real
			1,8

g	162,5	40	peso real
			3,3

g	165,3	50	peso real
			6,1

g	166,6	60	peso real
			7,4

DATOS CUANTITATIVOS

Peso	Probeta+embudo+agua	Minutos	Solo agua
g	167,2	0	peso real
			8

g	167,2	10	peso real
			8

g	167,2	20	peso real
			8

g	167,2	30	peso real
			8

g	167,2	40	peso real
			8

g	167,2	50	peso real
			8

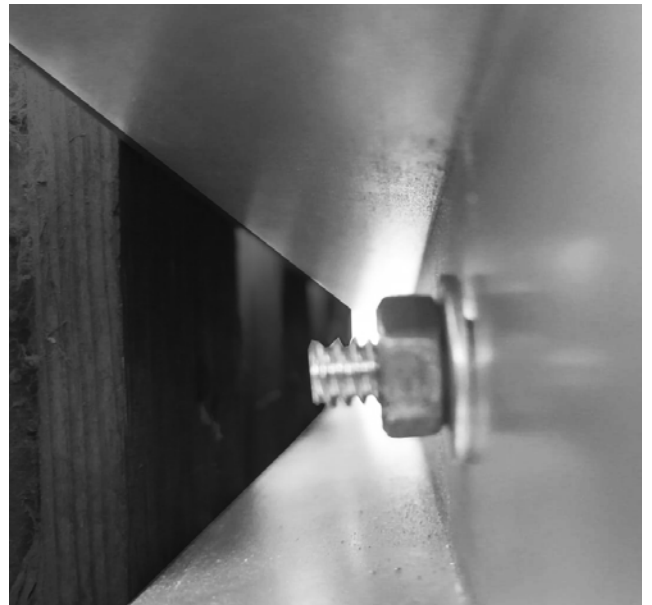
g	167,2	60	peso real
			8

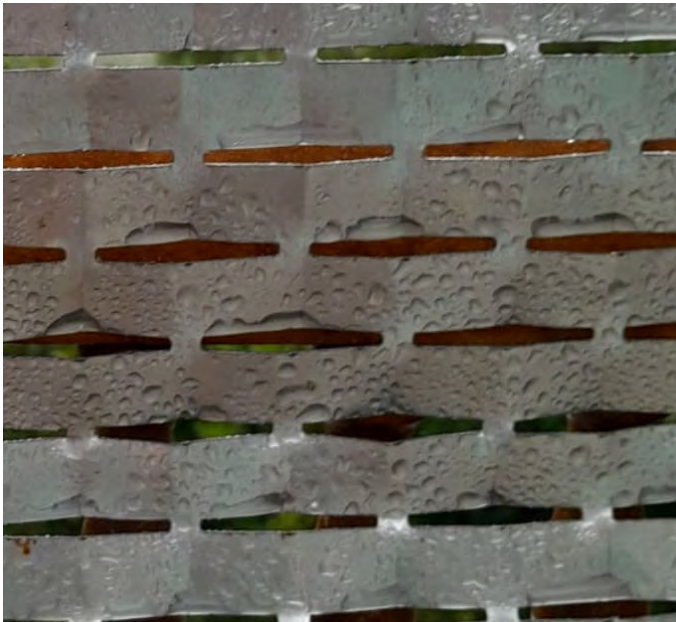
LINK A VIDEOS DE EXPERIMENTO

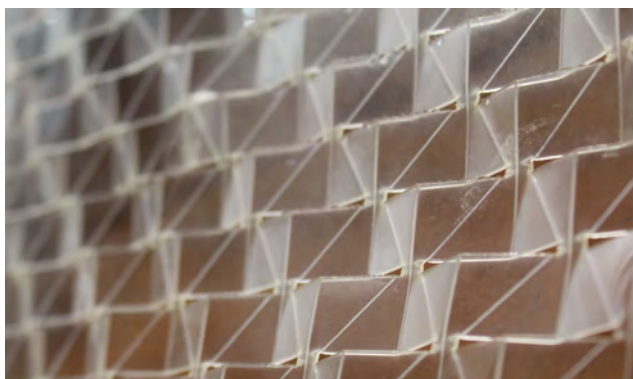
https://usmcl-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/constanza_menares_usm_cl/IgBG52Poxq8aSamMjdI3zWs_Af_YI2T_bL4h6sCttKpmDio?e=JWo3xl

ANEXO 2 - FOTOGRAFÍAS

1er prototipo

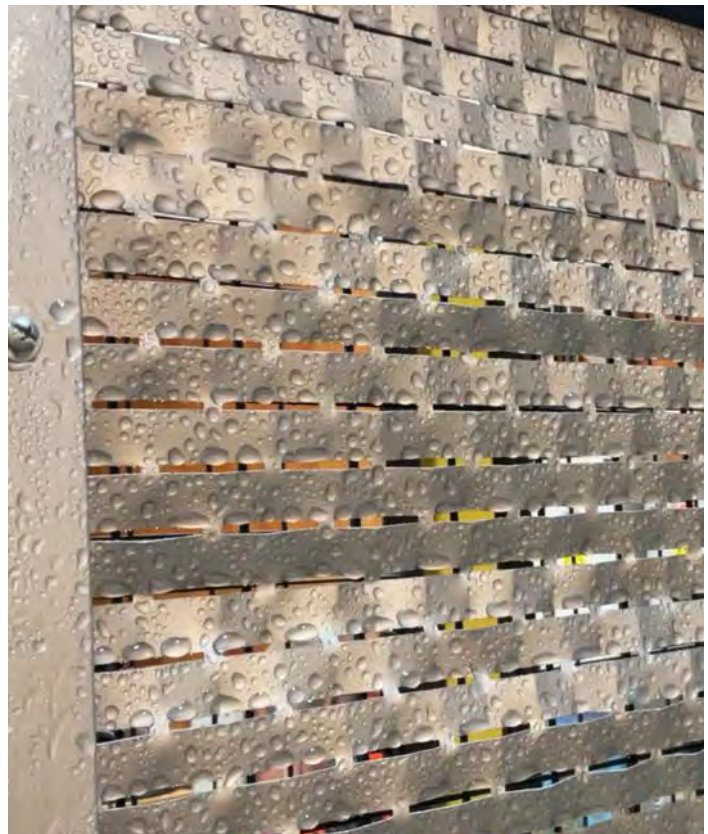


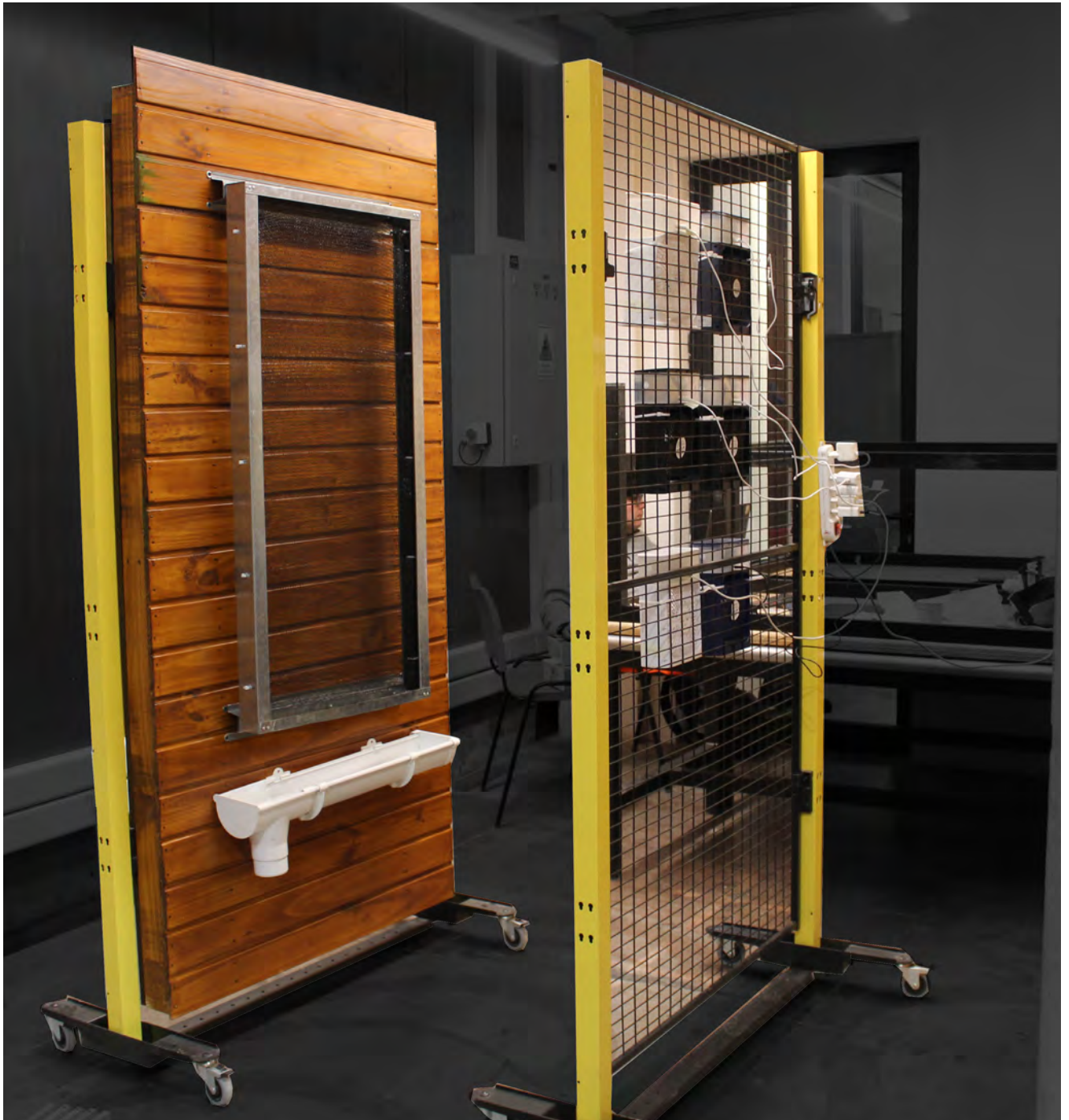


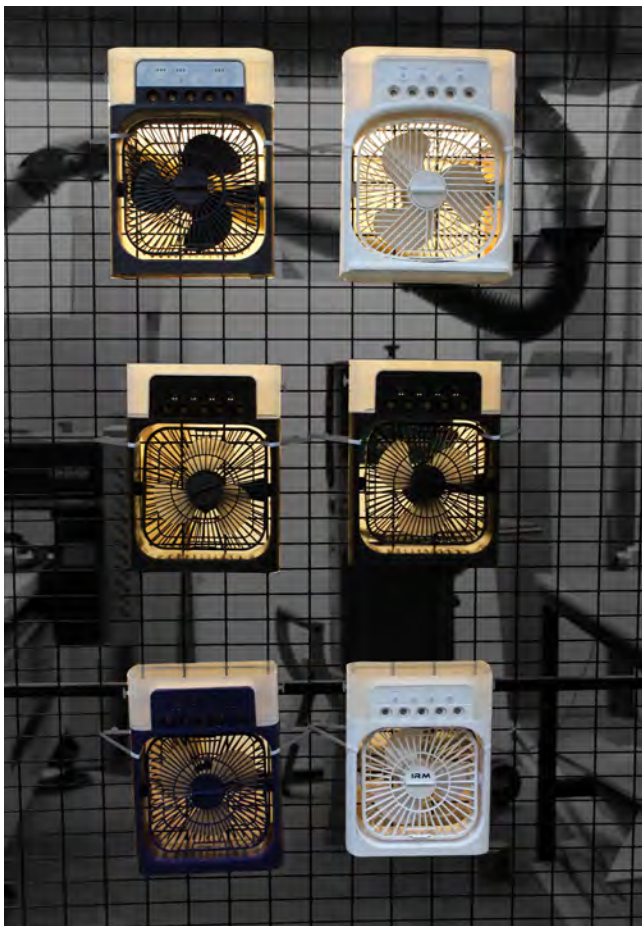






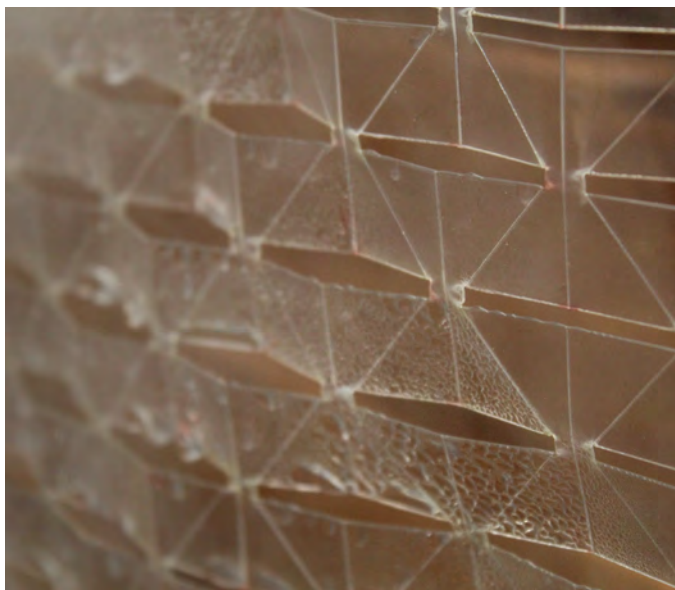














UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA - UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA