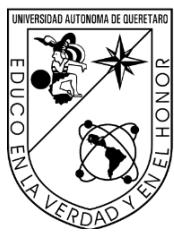


Sistema de captación y abastecimiento de fuentes  
naturales de agua en invernadero hidropónico en  
Amealco de Bonfil, Querétaro.

XX de junio de 2025

L.D.I. Abraham Galileo  
Alvarez Mena



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

**Sistema de captación y abastecimiento de fuentes  
naturales de agua en invernadero hidropónico en  
Amealco de Bonfil, Querétaro**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Diseño e Innovación

Presenta

L.D.I. Abraham Galileo Alvarez Mena

Dirigido por:

Dr. Luis Fernando Maldonado Azpeitia

Querétaro, Qro., a XX de junio de 2025

**La presente obra está bajo la licencia:**  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



**CC BY-NC-ND 4.0 DEED**

**Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional**

**Usted es libre de:**

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciatario no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

**Bajo los siguientes términos:**

 **Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatario.

 **NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).

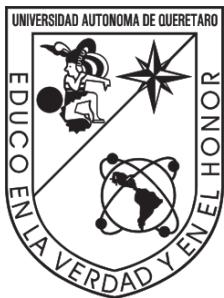
 **SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

**Avisos:**

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



# **Universidad Autónoma de Querétaro**

Facultad de ingeniería

Maestría en Diseño e Innovación

Sistema de captación y abastecimiento de fuentes naturales de agua en invernadero hidropónico en Amealco de Bonfil, Querétaro.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el

grado de Maestro en Diseño e Innovación

Presenta

L.D.I. Abraham Galileo Alvarez Mena

Dirigido por:

Dr. Luis Fernando Maldonado Azpeitia

Dr. Luis Fernando Maldonado Azpeitia  
Presidente

M. en I. Jorge Arturo García Pitol  
Secretario

M. en C. Karla Nicol Hernández Puente  
Vocal

M. en C. Antonio Rodrigo Abad Sánchez  
Suplente

Dra. María Sandra Hernández López  
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

México, diciembre 2025.

## **Dedicatoria**

A mi esposa que me ha apoyado y fortalecido en cada paso que he dado en este proyecto de vida y a este planeta llamado Tierra que nos ha brindado todo lo que necesitamos y que ahora deseo retribuirle.

## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por su apoyo financiero para el desarrollo de esta investigación y la obtención del grado de maestro a través del CVU 1314042.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, la Facultad de Ingeniería, la dirección de Posgrado y al programa de estudios de Maestría en Diseño e Innovación por permitir la realización de este proyecto de investigación.

Al comité de sínodos por sus asesorías en todo momento para la realización del proyecto de investigación.

## I Resumen

La agricultura consume el 72% del agua dulce en todo el mundo, sin embargo, debido al cambio climático y el consumo desmedido de agua, ha impactado negativamente en la producción de alimentos cultivados en campo a cielo abierto e invernaderos en todo el mundo, en particular en la comunidad de Amealco de Bonfil del estado de Querétaro, que ha descendido hasta un 50%, afectando no solo la venta comercial sino también el consumo local; siendo el sistema de bordos y pozos su única opción de captación y abastecimiento de agua para los cultivos en la comunidad, utilizando el método de irrigación por goteo para ahorrar la mayor cantidad de agua posible, sin embargo, no es suficiente debido a la falta de infraestructura y mantenimiento por parte del sistema de riego, en consecuencia, esta tesis plantea un sistema integral dual de captación, almacenamiento e irrigación sustentable de agua proveniente de fuentes naturales como lluvia y niebla, capaz de proveer del vital líquido a los cultivos mediante la irrigación por absorción a un sistema de hidroponía vertical. Con base en el uso combinado de estas tecnologías es posible recolectar agua de lluvia y niebla gracias a la temporalidad climatológica; llegando a la conclusión de que el funcionamiento en sinergia del sistema de captación y las condiciones climáticas de la comunidad, contribuye positivamente al abastecimiento de agua en los cultivos de hidroponía vertical como parte de la solución propuesta en esta tesis.

**Palabras clave:** abastecimiento, absorción, almacenamiento, captación de niebla, captación pluvial, hidroponía vertical, irrigación, malla raschel.

## I Abstract

Agriculture consumes 72% of fresh water worldwide, however, due to climate change and excessive water consumption, it has negatively impacted the production of food grown in open fields and greenhouses around the world, particularly in the community of Amealco de Bonfil in the state of Querétaro, which has decreased by up to 50%, affecting not only commercial sales but also local consumption; The system of wells and wells being the only option to capture and supply water for the crops in the community, using the drip irrigation method to save as much water as possible, however, it is not enough due to the lack of infrastructure and maintenance by the irrigation system, consequently, this thesis proposes an integral dual system of sustainable collection, storage and irrigation of water from natural sources such as rain and fog, capable of providing the vital liquid to crops through irrigation by absorption to a vertical hydroponics system. Based on the combined use of these technologies it is possible to collect rain and fog water thanks to the climatological seasonality; concluding that the synergic functioning of the collection system and the climatic conditions of the community, contributes positively to the water supply in the vertical hydroponics crops as part of the solution proposed in this thesis.

**Keywords:** absorption, fog harvesting, irrigation, rainwater harvesting, raschel netting, storage, vertical hydroponics, water supply.

## II Índice General

<b>I Resumen.....</b>	<b>5</b>
<b>I Abstract .....</b>	<b>6</b>
<b>II Índice General .....</b>	<b>7</b>
<b>III Índice de Tablas .....</b>	<b>9</b>
<b>IV Índice de Figuras.....</b>	<b>10</b>
<b>V Introducción .....</b>	<b>14</b>
<b>VI Planteamiento del problema.....</b>	<b>15</b>
<b>VII Justificación .....</b>	<b>17</b>
<b>VIII Antecedentes .....</b>	<b>18</b>
<b>8.1 Estado del Arte.....</b>	<b>21</b>
<b>8.1.1 Escasez de agua mundial .....</b>	<b>21</b>
<b>8.1.2 Cambio climático .....</b>	<b>23</b>
<b>8.1.3 Escasez de agua debido a la sobre población mundial.....</b>	<b>24</b>
<b>8.1.4 Demanda de agua industrial y agrícola.....</b>	<b>26</b>
<b>8.1.5 Características del invernadero y su estrés hídrico.....</b>	<b>26</b>
<b>8.2 Fundamentación teórica .....</b>	<b>28</b>
<b>8.2.1 Historia de los invernaderos .....</b>	<b>28</b>
<b>8.2.2 Funcionamiento de los invernaderos .....</b>	<b>31</b>
<b>8.2.3 Invernaderos en el mundo .....</b>	<b>34</b>
<b>8.2.4 Diseño de invernaderos típicos de México .....</b>	<b>35</b>
<b>8.2.5 Métodos de captación de agua.....</b>	<b>36</b>
<b>8.2.5.1 Captación de agua pluvial.....</b>	<b>36</b>
<b>8.2.5.2 Captación de agua de niebla.....</b>	<b>39</b>
<b>8.2.5.3 Tecnologías utilizadas para extraer agua del aire.....</b>	<b>41</b>
<b>8.2.6 Captación de agua en el mundo.....</b>	<b>42</b>
<b>8.2.6.1 Métodos de captación de agua pluvial en Asia .....</b>	<b>43</b>
<b>8.2.6.2 Métodos de captación de agua pluvial en Oceanía.....</b>	<b>44</b>
<b>8.2.6.3 Métodos de captación de agua pluvial en África.....</b>	<b>46</b>
<b>8.2.6.4 Métodos de captación de agua pluvial en América .....</b>	<b>47</b>
<b>8.2.6.5 Métodos de captación de agua pluvial en México .....</b>	<b>48</b>
<b>8.2.6.6 Métodos de captación de agua pluvial en Querétaro.....</b>	<b>50</b>
<b>8.2.6.7 Métodos de captación de agua pluvial en Amealco de Bonfil en Querétaro .....</b>	<b>50</b>

8.2.7 Sistemas de hidroponía vertical.....	51
8.2.7.1 ¿Qué es la hidroponía?.....	52
8.2.7.2 Clasificación de sistemas hidropónicos.....	53
IX Objetivos.....	57
9.1 Objetivo general .....	57
9.2 Objetivos específicos .....	57
X Metodología .....	58
10.1 Diseño Centrado en las Personas (DCP) .....	58
10.2 El proceso ECE.....	59
10.2.1 Etapa de Escuchar.....	59
10.2.2 Etapa de Crear .....	59
10.2.3 Etapa de Entregar .....	60
XI Resultados .....	61
11.1 Resultados de la etapa de <i>Escuchar</i> .....	61
11.2 Resultados de la etapa de <i>Crear</i> .....	84
11.2.1 Etapa de experimentación previa al prototipado. ....	93
11.2.2 Lista de materiales y costos.....	96
11.3 Resultados de la etapa de <i>Entregar</i> .....	98
11.3.1 Etapa de ajustes del prototipo .....	101
11.3.2 Tercer versión del prototipo para UAQ Campus Amealco.....	105
11.3.3 Reinstalación de la versión 3 del prototipo .....	108
11.3.4 Pruebas y validación del sistema de captación de agua del cultivo hidropónico	112
11.3.5 Análisis de viabilidad del sistema de captación de agua del cultivo hidropónico .....	116
11.3.6 Análisis de viabilidad del sistema de captación de agua del cultivo hidropónico .....	117
XII Discusión .....	119
XIII Conclusiones .....	120
XIII Referencias bibliográficas .....	121
XIV Anexos.....	128

### **III Índice de Tablas**

Tabla 1 Comparativa de la especificación técnica de los 3 invernaderos.....	83
Tabla 2 Lista de posibles requerimientos a evaluar.....	83
Tabla 3 Lista de materiales y precios para la fabricación del prototipo.....	96
Tabla 4 Comparativa de rendimiento de la versión 2 vs versión 3 del sistema de captación de agua pluvial y de niebla.....	106
Tabla 5 Cálculo de volumen de captación de agua pluvial por temporada.....	117
Tabla 6 Cálculo de volumen de captación de agua de niebla en tiempo real .....	118

## IV Índice de Figuras

Figura 1 Monitor de sequía de México, mayo 2025 (CONAGUA, 2024) .....	15
Figura 2 Cultivos de cherry tirados en los terrenos adyacentes a los campos de invernaderos (Elaboración propia, 2023) .....	17
Figura 3 Presa de “El Capulín” en Amealco de Bonfil, Querétaro en 2021 (Elaboración Propia, 2021) .....	19
Figura 4 Presa de “El Capulín” en Amealco de Bonfil, Querétaro en 2022 (Elaboración propia, 2022). .....	20
Figura 5 Presa de “El Capulín” en Amealco de Bonfil, Querétaro en 2024 (Elaboración propia, 2024) .....	20
Figura 6 Aumento histórico demográfico y su impacto en los recursos hídricos con predicciones al año 2050 (Iagua, 2018) .....	25
Figura 7 La Exposición del Palacio de Cristal, Londres, pintura / Colecciones Especiales, Biblioteca de la Universidad de Maryland; Centro de Digitalización Hornbake (Mitchell Tada, 2021). .....	29
Figura 8 Invernadero Syon Park (Mitchell Tada, 2021) .....	30
Figura 9 Funcionamiento de un invernadero (Abouthaus, 2025) .....	32
Figura 10 Invernaderos típicos de México (Ojeda Bustamante & Flores Velázquez, 2015).....	35
Figura 11 sistema de recolección de agua de lluvia instalado en un hogar del pueblo de Ratamata, municipio rural de Gurans en el distrito de Dailekh, Nepal (WeAreWater Fundation, 2022).....	37
Figura 12 Sistema de captación de agua pluvial para uso doméstico urbano (ECONOVA, 2025) 38	38
Figura 13 Sistema de captación de agua por atrapanieblas (ICO-BO, 2025) .....	40
Figura 14 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS, 2023).....	40
Figura 15 Métodos de captación de agua de lluvia en techos europeos (Soluciones Hidropluviales, 2012) .....	43
Figura 16 Sistemas de captación de agua pluvial rojison y sumida en Asia (Soluciones Hidropluviales, 2012) .....	44
Figura 17 Sistema de captación de agua pluvial en Upper Kangaroo River, Kangaroo Valley, New South Wales, Australia (2030 Palette, 2025) .....	45
Figura 18 Esquema de funcionamiento de las Zanjas Filtrantes (Salas Rodríguez, 2022) .....	47
Figura 19 Sistema de recolectores de atrapaniebla instalados en Atacama Chile (AQUAE	

Fundation, 2021) .....	48
Figura 20 Sistemas de captación de agua pluvial en México (Jalife Acosta, Quiroa Herrera, & Villanueva Solís, 2018).....	49
Figura 21 Sistema de drenes a cielo abierto en Santiago de Querétaro (Elaboración propia, 2023) .....	50
Figura 22 Sistema de captación y almacenamiento de agua pluvial llamado bordo con geomembrana para evitar la filtración (Aguilar Sánchez & Lara Aguazul, 2021) .....	51
Figura 23 Innovación en crecimiento, la agricultura sin suelo redefine los límites tradicionales del cultivo (METEORED, 2024).....	52
Figura 24 Tipos de sistemas hidropónicos existentes (Generación Verde, 2017) .....	56
Figura 25 Etapas del proceso del Diseño Centrado en las Personas (Shelly Pursell, 2023).....	58
Figura 26 Mapa de la localidad de Amealco de Bonfil en Querétaro (Google Maps, 2025) .....	62
Figura 27 Principales fuentes de ingresos (Google Formularios, 2025) .....	63
Figura 28 Principales rangos de edades en los usuarios encuestados (Google Formularios, 2025).....	64
Figura 29 Porcentaje de género en la población encuestada (Google Formularios, 2025) .....	65
Figura 30 Principal ubicación de los encuestados (Google Formularios, 2025) .....	66
Figura 31 Tipos de propiedad del encuestado (Google Formularios, 2025) .....	67
Figura 32 Principales superficies de cultivo (Google Formularios, 2025) .....	68
Figura 33 Principales proveedores de agua para cultivos (Google Formularios, 2025).....	69
Figura 34 Principales métodos de riego en los cultivos (Google Formularios, 2025) .....	70
Figura 35 Uso de agua en los cultivos (Google Formularios, 2025).....	71
Figura 36 Periodicidad de riego en los cultivos (Google Formularios, 2025).....	72
Figura 37 Principales alimentos cultivados por los encuestados (Google Formularios, 2025)....	73
Figura 38 Kilogramos de alimentos producidos por cosecha (Google Formularios, 2025) .....	75
Figura 39 Principales consumidores de los encuestados (Google Formularios, 2025).....	76
Figura 40 Principales métodos de captación de agua para los encuestados (Google Formularios, 2025) .....	77
Figura 41 Costos de inversión del sistema propuesto para el encuestado (Google Formularios, 2025) .....	79
Figura 42 Invernadero No. 1 con vista exterior e interior, ubicado en la comunidad de “El Capulín” en Amealco de Bonfil (Elaboración propia, 2023) .....	80

Figura 43 Vistas del invernadero No. 1 en la comunidad de “ElCapulín” en Amealco de Bonfil en Querétaro (Elaboración propia, 2023) .....	81
Figura 44 Invernadero No. 2 de cultivo de jitomate (Elaboración propia, 2023) .....	81
Figura 45 Invernadero No. 3 de venta al extranjero (Elaboración propia, 2023) .....	82
Figura 46 Propuesta conceptual No. 1 (Elaboración propia, 2024) .....	85
Figura 47 Propuesta conceptual No. 2 (Elaboración propia, 2024) .....	86
Figura 48 Propuesta conceptual No. 3 (Elaboración propia, 2024) .....	86
Figura 49 Propuesta conceptual No. 4 (Elaboración propia, 2024) .....	87
Figura 50 Propuesta conceptual No. 5 (Elaboración propia, 2024) .....	88
Figura 51 Propuesta conceptual No. 6 (Elaboración propia, 2024) .....	89
Figura 52 Diseño de un sistema de hidroponía vertical con captación de agua pluvial y de niebla (Elaboración propia, 2024) .....	90
Figura 53 Diseño seleccionado (Elaboración propia, 2024) .....	91
Figura 54 Esquema de funcionamiento del sistema seleccionado (Elaboración propia, 2024)....	92
Figura 55 uso de materiales caseros para la fabricación del experimento (Elaboración propia, 2024) .....	93
Figura 56 Ensamble de la estructura, malla Raschel y contenedor (Elaboración propia, 2024) ...	94
Figura 57 Instalación del prototipo experimental (Elaboración propia, 2024) .....	95
Figura 58 Histórico meteorológico de Amealco de Bonfil de Querétaro ( (Meteoblue, 2024)....	95
Figura 59 Armado del prototipo funcional (Elaboración propia, 2024) .....	98
Figura 60 Instalación del prototipo en el lugar de estudio (Elaboración propia, 2024) .....	99
Figura 61 Histórico meteorológico de Amealco de Bonfil (Meteoblue, 2024) .....	100
Figura 62 Muestra de captación de agua de lluvia y niebla 23 de junio de 2024 (Elaboración propia, 2024) .....	100
Figura 63 Rediseño de los conectores principales (Elaboración propia, 2024) .....	101
Figura 64 Reinstalación de la segunda versión del prototipo (Elaboración propia, 2024) .....	102
Figura 65 Instalación del sistema de captación de agua pluvial (Elaboración propia, 2024) ....	103
Figura 66 instalación final de la segunda versión del prototipo (elaboración propia, 2024).....	104
Figura 67 Campus Amealco de la Universidad Autónoma de Querétaro (Noticias de Querétaro, 2022) .....	105
Figura 68 Conferencia en la Facultad de Ingeniería del Campus Amealco (Elaboración propia,	

2024) .....	105
Figura 69 Especificaciones Técnicas de la versión 3 del prototipo final (Elaboración propia, 2025) .....	107
Figura 70 Excavación y colocación del sistema de almacenamiento (Elaboración propia) .....	108
Figura 71 Instalación del sistema de hidroponía vertical (Elaboración propia, 2025) .....	109
Figura 72 Estructuración del sistema (Elaboración propia, 2025) .....	109
Figura 73 Instalación de mallas Raschel y captador pluvial (Elaboración propia, 2024) .....	110
Figura 74 Sistema de medición de nivel de agua y automatización del riego hidropónico (Elaboración propia, 2024) .....	111
Figura 75 Sistema de captación de agua pluvial y de niebla para el riego en hidroponía vertical (Elaboración propia, 2024) .....	112
Figura 76 Prueba de validación de captación de agua de niebla (Elaboración propia, 2025) .....	113
Figura 77 Toma de muestras de captación pluvial y de niebla (Elaboración propia, 2025) .....	114
Figura 78 Ejemplo de interpretación de la grafica (Meteoblue, 2024) .....	114
Figura 79 Histórico meteorológico de Amealco 2024 2025 (Meteoblue, 2024) .....	115
Figura 80 Análisis de viabilidad (Elaboración propia, 2024) .....	116

## V Introducción

Actualmente, el agua, un recurso vital, se escasea a niveles sin precedentes debido a la combinación de factores como el calentamiento global, la alta demanda generada por el crecimiento poblacional mundial y el uso intensivo de las tierras para la actividad agrícola. Esta última representa el 72 % del consumo de agua de todo el planeta, la tendencia sugiere un incremento de las extracciones de agua de riego del 5.5 % al año 2050. Además, el sector industrial extrae el 24 % del agua a nivel mundial, y se espera que esta cifra aumente para el 2025 (Esperanza, 2024).

Así mismo, esto ha afectado significativamente a México y en específico al estado de Querétaro que cuenta con más de 10 municipios en estado crítico de escasez de agua, es decir, sequía extrema (CONAGUA, 2024), siendo uno de ellos Amealco de Bonfil y en particular su comunidad llamada el “Capulín”. Amealco de Bonfil es un Municipio perteneciente al estado de Querétaro con el 70 % de la superficie destinada a la agricultura y horticultura, el 18 % son pastizales, 10 % bosques y el resto son cuerpos de agua (bordos), lo cual indica la relación directa de la importancia del abastecimiento de agua para agricultura (Aguilar Sánchez & Lara Aguazul, 2021).

Con el paso del tiempo los seres vivos están cada vez más adaptados para sobrevivir ante la escasez de alimentos, sin embargo, no lo están para sobrevivir a la falta de agua, ya que es el recurso más importante para la producción vegetal y animal (FAO, 2013), por tal motivo, se han realizado esfuerzos por construir sistemas que permitan el ahorro, la captación y reutilización del agua proveniente de fuentes naturales del medio ambiente.

La importancia de implementar un sistema que permita obtener agua proveniente de recursos naturales del medio ambiente tendrá beneficios significativos en la producción de alimentos, tanto en invernaderos como en cultivos de campo abierto, evitando la pérdida de sus cosechas por falta de agua.

En conclusión, un sistema de este tipo puede contribuir positivamente frente a los cambios climáticos, aprovechando los recursos disponibles en el momento en que ocurrán para utilizarlos en la alimentación de los cultivos para su óptimo crecimiento.

## VI Planteamiento del problema

Debido a la escasez de agua por el aumento en las categorías de sequía en el municipio de Amealco de Bonfil, se han perdido cultivos de jitomate Cherry, avena y maíz desde 2018 (Aguilar Sánchez & Lara Aguazul, 2021).

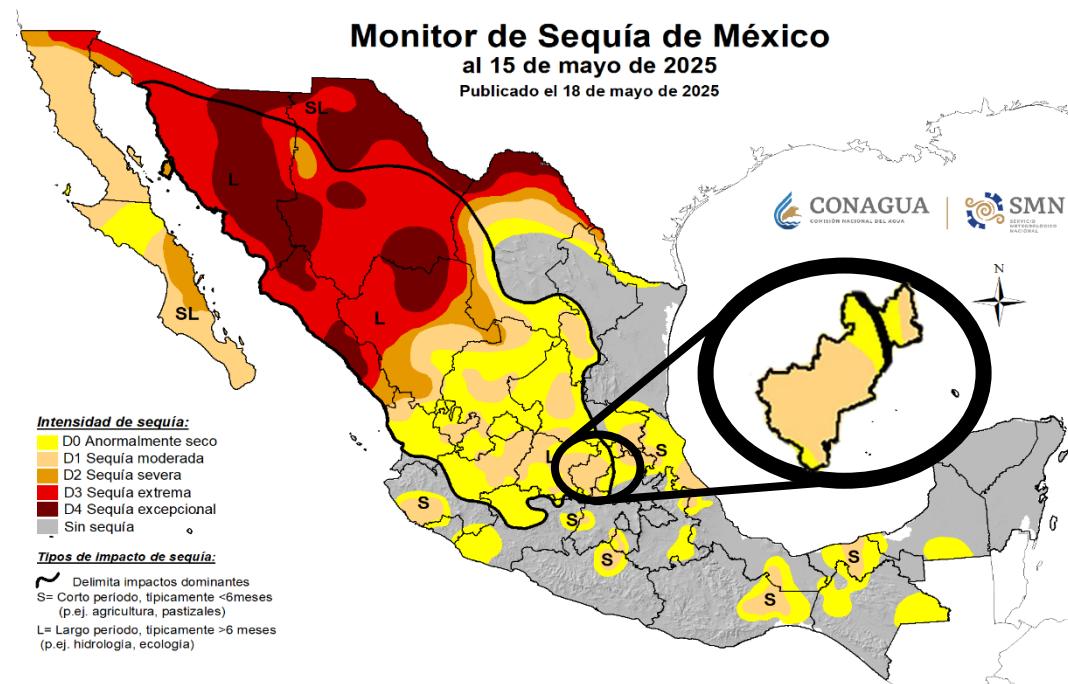


Figura 1 Monitor de sequía de México, mayo 2025 (CONAGUA, 2024)

En la actualidad debido al calentamiento global y a la sequía excepcional en el municipio de Amealco de Bonfil en Querétaro (CONAGUA, 2024), las consecuencias son la reducción de agua pluvial que afecta a las presas y bordos que abastecen a los campos de cultivo, así como la ausencia de métodos eficientes de captación de agua de lluvia y del entorno ha provocado la reducción en la producción de alimentos de invernaderos de autoconsumo para la población de Amealco de Bonfil.

Uno de los principales retos que enfrenta el sector es la baja disponibilidad de agua superficial, almacenada en presas y otros cuerpos de agua, lo que ha puesto en jaque la capacidad de riego tradicional. Aunado a ello, el uso del agua subterránea, que se extrae a través de bombeo, tampoco es una solución viable a gran escala, ya que la infraestructura y capacidad actuales no son suficientes para cubrir las necesidades de riego en su totalidad (Estrella, 2020).

La producción de alimentos como el jitomate en los invernaderos del municipio de Amealco de Bonfil descendió en un 30% debido a la escasez de lluvias y a la poca captación de agua en los bordos que a su vez es dirigida a los cultivos principalmente de maíz, avena antes que los invernaderos; según el director de desarrollo rural (Aguilar Sánchez & Lara Aguazul, 2021).

El clima era templado subhúmedo con lluvias en verano y precipitaciones en el mes más seco por debajo de los 40 mm, concentrándose la lluvia en los meses de mayo a octubre y presencia de heladas en los meses de octubre a febrero. Esta característica permitía la captación de lluvia durante todo el año, variable en capacidad, pero cumpliendo el postulado de Horton referente a la capacidad de filtración; permitiendo a los bordos (único sistema de captación de agua pluvial en la región) almacenar agua sin necesidad de una geomembrana (Aguilar Sánchez & Lara Aguazul, 2021).

La deficiente gestión de abasto de agua y la falta de lluvias están provocando que el agua sea más escasa, más contaminada o bien impredecible ya que se pueden presentar diversos climas en un solo día. En tan solo 3 meses Amealco de Bonfil paso de categoría de sequía extrema a excepcional (CONAGUA, 2024).

El desbasto de agua y la pérdida de cultivos como tomate, maíz y avena, han provocado que la comunidad en Amealco de Bonfil no cuente ni siquiera para el consumo del propio usuario. Durante la investigación de campo en el lugar se encontró evidencia de cultivos de jitomate cherry en invernaderos como se muestra en la Figura 2:



Figura 2 Cultivos de cherry tirados en los terrenos adyacentes a los campos de invernaderos (Elaboración propia, 2023)

## VII Justificación

La creciente escasez de agua en Querétaro, agravada por el cambio climático, el suministro insuficiente y los altos costos de empresas privadas, ha generado la necesidad urgente de implementar soluciones sostenibles en el sector agrícola. Con 389 hectáreas de agricultura protegida y más de 1000 hectáreas disponibles para reutilización, es crucial mejorar la eficiencia del riego, especialmente en cultivos de invernaderos para autoconsumo. Este proyecto busca diseñar e implementar un sistema de captación, almacenamiento y irrigación de agua para invernaderos en la comunidad de Amealco de Bonfil, que permita recolectar agua de lluvia y niebla, reducir costos operativos y contribuir a la seguridad alimentaria (Becerril, 2023).

El futuro de la sostenibilidad del sistema alimentario en Amealco de Bonfil se ve amenazado por erosión de las prácticas agrícolas tradicionales, la resiliencia al cambio en los métodos de cultivos modernos, la disminución del trabajo agrícola y la extinción de sus semillas nativas (Muhlia Gutiérrez, y otros, 2023).

Debido a las intensas sequías recientes asociadas al cambio climático, Amealco es el municipio con el más bajo acceso a alimentos nutritivos en todo el estado de Querétaro, con 44.8 % de su población, en situación de seguridad alimentaria (Muhlia Gutiérrez, y otros, 2023); algo que este proyecto de investigación desarrollado durante 2 años contribuye positivamente en mejorar el acceso a estos alimentos nutritivos. Mediante la integración de dos sistemas de captación de agua, se busca aumentar en un 33.3 % el riego de cultivos en un sistema de invernadero hidropónico vertical, aprovechando las condiciones climáticas favorables de la región y disminuyendo el esfuerzo físico y los costos asociados al uso de pipas de agua, que pueden alcanzar hasta \$1800 pesos por servicio. Esta solución tecnológica no solo beneficiará a los agricultores locales, sino que también alinearán la producción agrícola con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 6 (Agua Limpia y Saneamiento), promoviendo el uso eficiente y sostenible de los recursos hídricos (ODS, 2023).

## **VIII Antecedentes**

El agua es el elemento más esencial para la vida en este planeta donde vivimos, conformando el 70 % de los organismos vivientes y cubriendo el 70 % de la superficie planetaria. Sin embargo, solo el 0.025 % del agua es fácilmente accesible para el consumo humano. Del total de agua en el planeta, el 96.5 % es salada y de origen marino, mientras que únicamente el 3.5 % es agua dulce, el 2.45 % se encuentra atrapada en los glaciares, el 1.05 % se localiza en los acuíferos, el 0.035 % se ubica en cuencas, arroyos y ríos y finalmente el 0.025 % es potable (iagua, 2018).

Tomando en cuenta los datos anteriores, se puede confirmar en las siguientes Figuras los impactos negativos del cambio climático sobre los cultivos de hortalizas, tanto en invernaderos como en campos a cielo abierto en la comunidad de Amealco de Bonfil.

En la Figura 3 se observan las condiciones climáticas favorables para la producción de cultivos, ya que la presa rebasaba el 100 % de su máxima capacidad para el 2021; permitiendo riego a los diferentes campos de maíz, avena, etc.



Figura 3 Presa de “El Capulín” en Amealco de Bonfil, Querétaro en 2021  
(Elaboración Propia, 2021)

En la Figura 4, se muestra la escasez de agua en la presa de la comunidad de “El Capulín” en tan solo un año y en su lugar se utilizó para el cultivo de maíz, el cual se vería afectado posteriormente por la sequía en la categoría D3 establecida por CONAGUA (CONAGUA, 2024).



Figura 4 Presa de “El Capulín” en Amealco de Bonfil, Querétaro en 2022  
(Elaboración propia, 2022).

En la Figura 5, el municipio de Amealco de Bonfil paso de categoría D3 a D4, que indica pérdidas excepcionales y generalizadas de cultivos o pastos, riesgo excepcional de incendios, escasez total de agua en embalses, arroyos y pozos, con probabilidad de situación de emergencia debido a la ausencia de agua (SMN, 2025).



Figura 5 Presa de “El Capulín” en Amealco de Bonfil, Querétaro en 2024  
(Elaboración propia, 2024)

El agua dulce, aunque no escasa a nivel global, presenta una distribución desigual tanto entre los diferentes continentes como dentro de las regiones de cada uno de ellos. Esta disparidad entre la disponibilidad de recursos hídricos y la densidad poblacional es un fenómeno que refleja complejidades socioeconómicas, geográficas y ambientales que requieren un análisis detallado. No existe una correlación directa entre la población y el acceso al agua dulce, lo que ha generado situaciones de extrema desigualdad (Escribano, 2007).

Algunas regiones, incluso dentro del mismo continente, presentan grandes diferencias en el acceso y manejo de este recurso, lo cual se evidencia entre las ciudades, pueblos y comunidades. La mala gestión o la falta de acceso al agua potable puede tener efectos catastróficos en términos de desarrollo social y económico, afectando tanto a las grandes urbes como a las áreas rurales (Escribano, 2007).

## **8.1 Estado del Arte**

### **8.1.1 Escasez de agua mundial**

La escasez de agua es un problema creciente a nivel mundial, afectando desproporcionadamente a las comunidades más pobres. La disponibilidad física de agua varía con los cambios en la oferta y la creciente demanda, y como recurso finito, enfrenta presiones adicionales con el aumento de la población mundial, la producción agrícola y el desarrollo económico intensivo. Estas dinámicas resultan en una disminución de la cantidad y calidad del suministro de agua, que muchas veces no logra satisfacer las necesidades básicas, subrayando la urgencia de estrategias sostenibles para la gestión de este recurso vital (Un Water, S.f.).

La escasez de agua es uno de los desafíos más urgentes para el desarrollo en la actualidad. Actualmente, 2.400 millones de personas viven en países afectados por el estrés hídrico, muchos de ellos pequeños agricultores que ya enfrentan dificultades para satisfacer

sus necesidades diarias de agua potable, alimentos nutritivos y servicios básicos como higiene y saneamiento. Esta situación subraya la necesidad de implementar estrategias sostenibles y equitativas para la gestión de recursos hídricos a nivel global (Naciones Unidas, 2023).

En las últimas dos décadas, los recursos de agua dulce por persona se han reducido en un 20%, mientras que la disponibilidad y calidad del agua se deterioran rápidamente debido a décadas de uso inadecuado, falta de gestión coordinada, captación excesiva de agua subterránea, contaminación y cambio climático. El aumento y la mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos, como sequías e inundaciones, están tensionando nuestros ecosistemas con consecuencias devastadoras para la seguridad alimentaria mundial. La solución a esta crisis global radica en la agricultura, que representa el 72% de las extracciones mundiales de agua dulce, el mayor porcentaje entre todos los sectores (Naciones Unidas, 2023).

La demanda mundial de agua se ha estimado en alrededor de 4.600 kilómetros cúbicos al año y se prevé que aumente un 20-30%. Es decir, para el año 2050 estaremos consumiendo 5.500-6.000 kilómetros cúbicos al año (Naciones Unidas, 2023).

La agricultura es una de las principales causas de la escasez de agua a nivel mundial debido al elevado uso de agua para el riego, y la eficiencia de las técnicas de riego empleadas tendrá un impacto significativo en el futuro de la disponibilidad de agua. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), se estima un aumento del 5.5% en las extracciones de agua para riego entre 2008 y 2050, lo que subraya la necesidad de adoptar métodos de riego más eficientes para mitigar la escasez de agua (AQUAe FUNDACIÓN, 2021).

### 8.1.2 Cambio climático

El cambio climático representa esencialmente una crisis del agua, manifestándose a través de fenómenos como inundaciones crecientes, el aumento del nivel del mar, la reducción de los campos de hielo, incendios forestales y sequías. Sin embargo, la gestión sostenible del agua ofrece una solución poderosa para enfrentar esta crisis. Implementar prácticas de gestión hídrica sostenibles es crucial para aumentar la resiliencia de las sociedades y los ecosistemas, así como para reducir las emisiones de carbono. Además, la participación activa de individuos y familias es esencial para la eficacia de estas estrategias, subrayando la importancia de la acción a nivel personal en la lucha contra el cambio climático (Un Water, S.f.).

La sequía, que puede ser clasificada como meteorológica, hidrológica o agrícola, es un fenómeno influenciado tanto por causas naturales como por el cambio climático inducido por actividades humanas. Las implicaciones de la sequía son profundas y variadas, incluyendo pérdidas económicas significativas, la destrucción de ecosistemas, migraciones forzosas y problemas de salud pública. Esta tesis explorará cómo la interacción entre factores naturales y antropogénicos agrava la incidencia y severidad de las sequías, y analizará las consecuencias socioeconómicas y ambientales de este fenómeno, destacando la necesidad de estrategias integrales para mitigar sus efectos (BBVA, 2024).

Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) concluye que existe una relación directa entre el cambio climático antropogénico y la intensificación de las sequías. Además, el aumento de las temperaturas está incrementando la evaporación del suelo y la evapotranspiración de las plantas en muchas zonas (BBVA, 2024).

El clima es el factor determinante principal de las condiciones ambientales que regulan la disponibilidad de agua en cualquier área geográfica. En vista de esto, la implementación de medidas inmediatas es crucial para afrontar la creciente demanda de agua. Además del estrés hídrico exacerbado por el cambio climático, se proyecta un

aumento del 55% en la demanda mundial de agua para 2050. Esta tesis investigará la relación entre el clima y la disponibilidad de agua, evaluará las proyecciones de demanda hídrica y propondrá estrategias de gestión sostenible del agua para mitigar los efectos del cambio climático y satisfacer la demanda futura (AQUAe FUNDACIÓN, 2023).

### **8.1.3 Escasez de agua debido a la sobre población mundial**

(Naciones Unidas, 2020) menciona que para el 2050, el número de personas en riesgo de inundaciones aumentará de su nivel actual de 1,200 millones a 1,600 millones. Desde principios hasta mediados de la década de 2010, 1,900 millones de personas, o el 27% de la población mundial, vivían en zonas con potencial de grave escasez de agua. En 2050, esta cifra aumentará a entre 2,7 y 3,2 mil millones de personas (Un Water, 2020).

El crecimiento exponencial de la población está teniendo consecuencias cada vez más graves sobre los recursos hídricos del planeta. La tendencia sugiere que para el año 2050 la población aumentará a 10.000.000.000 de personas como se muestra en la Figura 6 (iagua, 2018).

La sobre población mundial ha intensificado la presión sobre los recursos hídricos, provocando una creciente escasez de agua potable y afectando gravemente los sistemas de saneamiento en muchas regiones del planeta. Más de 2.500 millones de personas viven sin acceso adecuado a servicios sanitarios, lo que favorece la propagación de enfermedades transmitidas por el agua, como el cólera y la fiebre tifoidea. A esto se suma el deterioro ambiental causado por el uso excesivo de los recursos hídricos, como la pérdida acelerada de humedales y la contaminación de cuerpos de agua, lo que repercute negativamente en la biodiversidad y en la calidad de los ecosistemas naturales (Peluso, 2023).

Además, esta escasez hídrica derivada del crecimiento poblacional ha generado impactos significativos en la producción de bienes de consumo, incrementando el desempleo y debilitando las economías locales. Las tensiones sociales y políticas se han agudizado en diversas regiones, donde la competencia por el acceso al agua ha

desencadenado protestas, conflictos territoriales e incluso disputas legales, como el caso del río Bravo entre los estados de Texas y Nuevo México. En este contexto, la falta de una gestión sostenible y equitativa del agua representa una amenaza creciente para la estabilidad social, la salud pública y el desarrollo económico a nivel global (Peluso, 2023).



Figura 6 Aumento histórico demográfico y su impacto en los recursos hídricos con predicciones al año 2050 (Iagua, 2018)

#### **8.1.4 Demanda de agua industrial y agrícola**

Según el informe anual más importante de la agencia El estado de la alimentación y la agricultura en el mundo más de tres mil millones de personas viven actualmente en áreas agrícolas con una gran escasez de agua y casi la mitad de ellos, 1200 millones, se enfrentan a graves limitaciones al respecto (Naciones Unidas, 2023).

La agricultura consume el 70% de agua a nivel mundial y en México se utiliza entre el 68 y 70%, mientras que la industria consume el 22% de agua a nivel mundial y en México se utiliza el 14% en industria e hidroeléctricas (Maguey, 2018).

#### **8.1.5 Características del invernadero y su estrés hídrico**

Un invernadero es una estructura accesible a pie, diseñada para optimizar el cultivo de plantas mediante la creación de microclimas controlables. Su cubierta exterior, generalmente hecha de vidrio o plástico translúcido, permite la entrada de luz mientras protege los cultivos de condiciones climáticas extremas. Estas estructuras se desarrollaron con el propósito de mejorar el rendimiento de los cultivos y asegurar la viabilidad de las plantas en entornos adversos, así mismo, utilizan uno de los mejores sistemas de riego que es el de goteo para dosificar la cantidad de agua necesaria para el cultivo (NCYT, 2022).

Es un sistema que permite cultivar en cualquier terreno, incluso en suelos poco fértiles o salinos, y aun así obtener alimentos de mejor calidad nutricional (SADER, 2025).

La agricultura bajo invernadero permite tener un control del ambiente, desde la temperatura hasta la humedad, garantizando un crecimiento óptimo y la prevención de enfermedades, ofreciendo una seguridad que la agricultura tradicional no puede igualar (SADER, 2025).

La diversificación productiva es esencial en la agricultura moderna, lo que subraya la necesidad de mejorar los sistemas de producción de hortalizas y flores. Los invernaderos representan una herramienta crucial para este fin, permitiendo la producción fuera de temporada, logrando mayor precocidad y aumentando los rendimientos. Además, los invernaderos acortan los ciclos vegetativos de las plantas y mejoran la calidad de los cultivos mediante una atmósfera interior artificial y controlada. Esta tecnología no solo optimiza la producción, sino que también contribuye a la sostenibilidad y resiliencia de la agricultura en tiempos cambiantes (Barrios, 2004).

A continuación, se mencionarán algunas características de los invernaderos:

a) ¿Qué es el estrés hídrico en invernaderos?

En el contexto de los invernaderos, el término “estrés hídrico” se refiere a la falta de agua disponible para los cultivos, una condición que puede tener un impacto negativo significativo en su producción y calidad. El agua es esencial para que las plantas realicen la fotosíntesis y absorban los nutrientes necesarios para su crecimiento y desarrollo. La insuficiencia hídrica, por lo tanto, no solo limita el rendimiento de los cultivos, sino que también afecta negativamente su calidad, subrayando la importancia de una gestión eficiente del agua en los sistemas de cultivo protegidos (Sistemas Hortícolas, 2023).

b) Efectos del estrés hídrico para los cultivos.

El estrés hídrico prolongado en los cultivos provoca numerosos problemas que afectan tanto su salud como la calidad de las hortalizas producidas. Específicamente, el estrés hídrico tiene cuatro consecuencias negativas principales para los cultivos, destacando la importancia de una adecuada gestión del agua para mantener la producción agrícola y la calidad de los productos (Sistemas Hortícolas, 2023).

1.- Reducción en su crecimiento: El agua juega un papel fundamental en el desarrollo de las plantas. Si estas no reciben la cantidad de agua que necesitan durante un periodo prolongado su crecimiento empezará a ralentizarse o a detenerse.

2.- Disminución en la producción de frutos: El agua también cobra importancia durante la producción y el engorde de los frutos. Cuando su disponibilidad se limita, las plantas producirán menos frutos y estos serán más pequeños y de peor calidad.

3.- Mayor susceptibilidad a sufrir enfermedades y plagas: El estrés hídrico debilita la salud de las plantas, haciendo que estén más débiles ante bacterias, virus, plagas y otros patógenos.

4.- Aumento de la concentración de compuestos tóxicos en los cultivos: Puede afectar la calidad de las hortalizas como a su seguridad para el consumo humano.

## **8.2 Fundamentación teórica**

### **8.2.1 Historia de los invernaderos**

El libro *The Conservatory: Gardens Under Glass*, de Alan Stein y Nancy Virts, explora la evolución de los invernaderos en Europa, América del Norte y el resto del mundo, destacando su origen como una consecuencia del comercio internacional, el imperialismo y la innovación tecnológica. Este estudio investiga cómo los invernaderos, al manipular la luz solar y la temperatura, representan un avance significativo en la integración de la arquitectura y el paisajismo, permitiendo la extensión de las temporadas de cultivo como se muestra en la Figura 7. Esta tesis analizará la influencia histórica y cultural de los invernaderos, su impacto en la arquitectura y el paisajismo, y cómo estos espacios han evolucionado para convertirse en una parte esencial de la horticultura moderna (Mitchell Tada, 2021).



Figura 7 La Exposición del Palacio de Cristal, Londres, pintura / Colecciones Especiales, Biblioteca de la Universidad de Maryland; Centro de Digitalización Hornbake (Mitchell Tada, 2021).

Según Plinio, los doctores que atendían al emperador romano Tiberio le recetaron al mismo el consumo diario de un fruto de la familia de las Cucurbitaceae. Para cultivar frutos como el melón y pepino -pertenecientes a esta familia- durante todo el año en su isla natal de Capri, Tiberio dirigió la construcción de una gran obra: "[Hizo] erigir unas plataformas hechas de marcos sobre ruedas, por medio de las cuales los frutos eran desplazados y expuestos al pleno calor del sol; mientras que, en invierno, eran retirados, y puestos bajo la protección de marcos 'vidriados' con piedra" (Mitchell Tada, 2021).

Los avances industriales del siglo XIX, especialmente en los métodos de fabricación del vidrio y el metal, transformaron la construcción de invernaderos al hacer estas estructuras más asequibles y rápidas de construir gracias a la estandarización. En este contexto, el diseño del Gran Invernadero de Charles Fowler para el Parque Syon de Percy en 1827 marcó un hito histórico como el primer invernadero moderno, caracterizado por su estructura de hierro y numerosos paneles de vidrio como se muestra en la Figura 8. Esta tesis examinará cómo estos avances industriales facilitaron la evolución de los

invernaderos, evaluando su impacto en la arquitectura y la horticultura, y explorará el legado del Gran Invernadero como precursor de las estructuras contemporáneas (Mitchell Tada, 2021).



Figura 8 Invernadero Syon Park (Mitchell Tada, 2021)

Las alteraciones antropológicas del planeta pueden haber alterado por sí mismas los propósitos originales de los invernaderos. Nuestra antigua obsesión por cultivar plantas fuera de sus sitios originarios –en parte una fuerza que motorizó la crisis climática- ha resultado ser un bálsamo preventivo: el invernadero moderno conserva el “germen” de la tierra que alguna vez fue (Mitchell Tada, 2021).

### **8.2.2 Funcionamiento de los invernaderos**

Los invernaderos funcionan mediante la conversión de energía luminosa en energía térmica, un proceso en el cual los rayos solares son absorbidos por las plantas y objetos dentro de la estructura y transformados en calor. Este calor queda atrapado por el vidrio o las láminas de plástico, creando un microclima controlado que ofrece numerosas ventajas sobre la agricultura al aire libre. Sin embargo, es crucial manejar adecuadamente la temperatura para evitar el sobrecalentamiento, lo cual se logra mediante ventanas, rejillas de ventilación y ventiladores. Además, muchos invernaderos están equipados con sistemas de calefacción independientes para mantener una temperatura óptima durante los períodos de baja luminosidad. Esta tesis investigará los mecanismos físicos del funcionamiento de los invernaderos, evaluará las tecnologías de control térmico utilizadas actualmente, y propondrá mejoras para optimizar su eficiencia y sostenibilidad en diferentes contextos agrícola (Abouthaus, 2025).

La forma más sencilla de explicar cómo funciona un invernadero es decir que convierte la energía luminosa en energía térmica. Los rayos del sol entran en el invernadero a través de las láminas o paneles transparentes como se muestra en la Figura 9. Los objetos del invernadero, incluidas las plantas, absorben la luz del sol y la convierten en calor (Abouthaus, 2025):

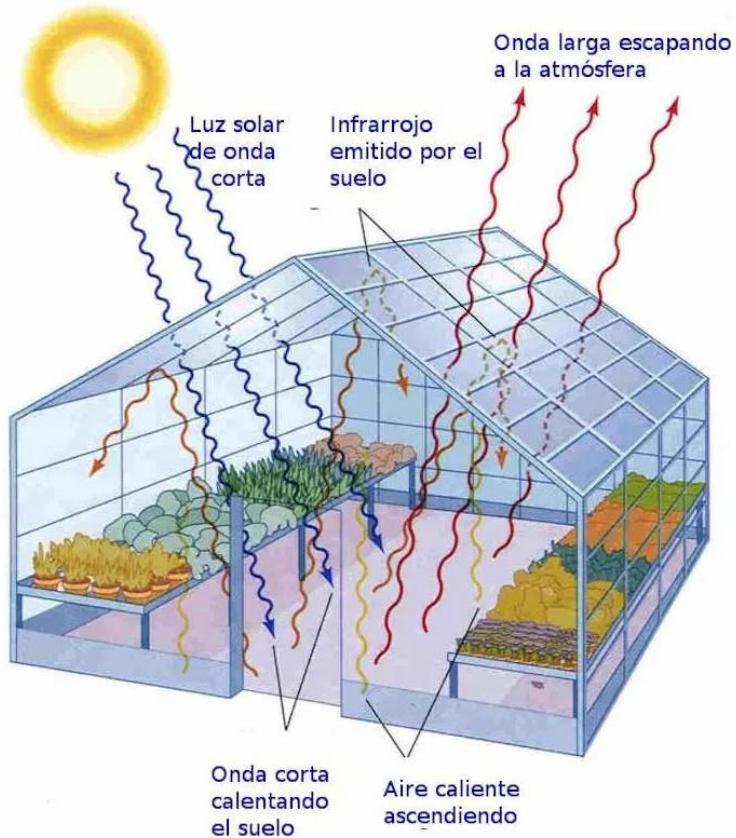


Figura 9 Funcionamiento de un invernadero (Abouthaus, 2025)

#### Paso 1: La luz entra.

Para proporcionar luz, los invernaderos deben tener alguna forma de entrada de luz. Por eso los invernaderos están hechos principalmente de materiales translúcidos, como el cristal o el plástico transparente. De este modo, las plantas tienen el máximo acceso a la luz solar (INVEUROP, 2021).

#### Paso 2: El calor se absorbe.

Cuando la luz entra por las paredes de cristal del invernadero, es absorbida por las plantas, el suelo y cualquier otra cosa que haya en el invernadero, convirtiéndola en energía infrarroja (también conocida como calor) en el proceso. Cuanto más oscura es la superficie, más energía puede absorber y convertir en calor (INVEUROP, 2021).

Paso 3: El calor queda atrapado.

Una vez que la energía luminosa se convierte en energía infrarroja (calor), tiene una «forma» diferente a la de la energía luminosa, lo que los científicos denominan longitud de onda. El cambio en la longitud de onda hace que el calor no pueda salir fácilmente de las paredes de cristal del invernadero (INVEUROP, 2021).

Paso 4: Calentar el invernadero.

El calor atrapado calienta el aire dentro del invernadero y, como éste es relativamente hermético, el aire más caliente se queda dentro, aumentando la temperatura de todo el edificio. Es el mismo efecto que, sin duda, has experimentado al subirte a un coche después de haber permanecido en un aparcamiento soleado durante unas horas (INVEUROP, 2021).

Paso 5: Mantener el calor.

Con suficiente luz solar, la temperatura del interior de un invernadero puede llegar a ser mucho más alta que la del exterior; de hecho, en un día soleado y caluroso puede ser necesario ventilar el invernadero durante todo el día para evitar que se cocinen literalmente las plantas del interior. En los días nublados, al haber menos luz solar, el invernadero se calentará más lentamente, si es que lo hace. Por eso, los invernaderos son más útiles en zonas con mucho sol (INVEUROP, 2021).

Paso 6: Promover la fotosíntesis.

Toda esta luz y las temperaturas cálidas dan a las plantas un amplio acceso a la luz solar y a las temperaturas necesarias para crecer. De este modo, disponen de las condiciones adecuadas para que se produzca la fotosíntesis (INVEUROP, 2021).

La fotosíntesis consiste en combinar el dióxido de carbono del aire y la energía de la luz solar para producir azúcares simples, que la planta utiliza como alimento. Si tú utilizas una hamburguesa con queso para hacerte grande y fuerte, una planta utiliza el sol (INVEUROP, 2021).

Por término medio, las plantas necesitan unas seis horas de luz solar al día, aunque esto varía según el tipo de planta; si colocas tu invernadero en un lugar donde reciba pleno sol todo el día, te asegurarás de que las plantas de su interior reciban suficiente luz (INVEUROP, 2021).

### **8.2.3 Invernaderos en el mundo**

La región mediterránea alberga una de las mayores concentraciones de cultivos protegidos a nivel mundial, con más de 400,000 hectáreas, situándose como la segunda zona en importancia después del área asiática. A nivel global, la superficie de invernaderos supera las 450,000 hectáreas y sigue en constante crecimiento. La región asiática, que incluye China, Japón y Corea, representa el 66% de esta superficie, mientras que la cuenca mediterránea ocupa el 30%. Esta tesis analizará la distribución y expansión de los cultivos protegidos a nivel mundial, con un enfoque particular en las regiones mediterránea y asiática, evaluando los factores que impulsan su crecimiento y las tecnologías empleadas. Además, se explorará el impacto económico y ambiental de estos sistemas de cultivo intensivo y se propondrán estrategias para optimizar su sostenibilidad y eficiencia (QAMPO, S.f.).

España ha experimentado un rápido desarrollo en la superficie de invernaderos en la cuenca mediterránea, posicionándose como líder entre los países mediterráneos y europeos. Este crecimiento, que ha pasado de 546 hectáreas en 1968 a 66,000 hectáreas en 2009, solo es superado a nivel mundial por China y Japón. Este notable aumento se debe a la capacidad de los invernaderos para impulsar el desarrollo económico y optimizar el uso de recursos, como el agua, que es especialmente escaso en la región mediterránea. Esta tesis investigará la evolución de los invernaderos en España, analizando los factores que han contribuido a su expansión, las tecnologías implementadas para el uso eficiente de recursos y el impacto económico y ambiental de esta forma de agricultura protegida. Además, se evaluarán las políticas y estrategias necesarias para fomentar un crecimiento sostenible y resiliente del sector (QAMPO, S.f.)

#### 8.2.4 Diseño de invernaderos típicos de México

México ha experimentado un notable crecimiento en la superficie dedicada a la agricultura en invernaderos, consolidándose como uno de los países con mayor expansión en este sector. Entre 2000 y 2005, la superficie de invernaderos aumentó en un 600%, pasando de 340 hectáreas a 7,000 hectáreas. Este crecimiento se ha mantenido con una tasa anual sostenida del 12%, elevando la superficie de 14,500 hectáreas en 2010 a cerca de 30,000 hectáreas en 2015. A pesar de la falta de cifras oficiales precisas, la expansión es evidente. Esta tesis analizará los factores que han impulsado este crecimiento en México, incluyendo las políticas agrícolas, las innovaciones tecnológicas y las condiciones socioeconómicas. Además, evaluará los impactos económicos y ambientales de esta expansión y propondrá estrategias para fomentar un desarrollo sostenible de la agricultura protegida en el país (Ojeda Bustamante & Flores Velázquez, 2015).

En México, el diseño de invernaderos ha experimentado una evolución significativa para integrar tanto aspectos constructivos como agronómicos, logrando un control ambiental más eficiente y reduciendo costos de energía y mano de obra. Este desarrollo ha llevado a la creación de diferentes tipos de invernaderos adaptados a las condiciones climáticas locales, implementando técnicas de control de temperatura y humedad, tales como la ventilación natural, la humidificación y, en casos extremos, la ventilación forzada. A pesar de que estos sistemas pueden requerir energía adicional en climas fríos y generar desechos, destacan por su eficiencia en el uso de recursos naturales como la radiación solar, el suelo y el agua como se muestra en la Figura 10 (Ojeda Bustamante & Flores Velázquez, 2015).



Figura 10 Invernaderos típicos de México (Ojeda Bustamante & Flores Velázquez, 2015)

### **8.2.5 Métodos de captación de agua**

A lo largo de la historia, la humanidad ha dependido de un suministro adecuado de agua para su alimentación, seguridad y bienestar, siendo el agua un recurso fundamental y el principal factor limitante para la existencia de la vida humana. La destrucción de las cuencas hidrográficas naturales ha provocado una crítica escasez de agua, afectando vastas áreas y poblaciones. No obstante, mediante la implementación de la tecnología de captación de agua, también conocida como "cosecha" de agua, es posible que granjas y comunidades aseguren su abastecimiento para uso doméstico y agrícola. La captación de agua implica recolectar y almacenar agua de diversas fuentes para su aprovechamiento. Este proceso, que incluye la recolección de agua de cuencas y su conducción a estanques reservorios, puede aumentar significativamente el suministro de agua para el riego de cultivos, el abastecimiento de bebederos de animales, la acuicultura y usos domésticos. Esta tesis examinará los métodos y tecnologías de captación de agua, evaluará su eficacia en diferentes contextos geográficos y socioeconómicos, y propondrá estrategias para optimizar su implementación y sostenibilidad a largo plazo (Bocek, S.f.).

#### **8.2.5.1 Captación de agua pluvial**

La captación de agua de lluvia emerge como una solución ancestral y contemporánea frente a la escasez hídrica que afecta a millones de personas en todo el mundo. Este método, que consiste en recolectar y almacenar el agua pluvial, ha sido utilizado desde tiempos prehistóricos y continúa siendo vital en regiones donde los acuíferos están contaminados o agotados (WeAreWater Fundation, 2022)

En la Figura 11 se muestra un sistema de recolección de agua de lluvia a pequeña escala en un municipio rural de Nepal.

En la actualidad, la recolección de agua de lluvia permite a muchas familias beber, cocinar y lavarse cuando falta el suministro, incluso, realizar la irrigación de los

invernaderos, y constituye una herramienta de adaptación al cambio climático en muchas zonas áridas o semiáridas (WeAreWater Fundation, 2022).



Figura 11 sistema de recolección de agua de lluvia instalado en un hogar del pueblo de Ratamata, municipio rural de Gurans en el distrito de Dailekh, Nepal (WeAreWater Fundation, 2022)

No obstante, es crucial considerar la calidad del agua recolectada, especialmente en áreas urbanas donde la contaminación atmosférica y de las superficies de captación puede afectar su potabilidad. Por tal motivo se sugiere implementar sistemas de filtración y tratamiento adecuados antes de su consumo (WeAreWater Fundation, 2022).

En conclusión, la captación de agua de lluvia representa una estrategia efectiva y sostenible para mejorar el acceso al agua en comunidades vulnerables, siempre que se acompañe de medidas que garanticen la calidad del recurso recolectado (WeAreWater Fundation, 2022).

Los sistemas de captación de agua pluvial en un entorno urbano permiten la recolección de agua de lluvia para el uso en tareas domésticas. Aunque esta agua no es potable, contiene una baja concentración de contaminantes dada su escasa manipulación. Estos sistemas utilizan los tejados o las cubiertas de las casas o edificios como captadores; el agua se recoge mediante canalones o sumideros, se conduce a través de bajantes y se

almacena en herméticos, mediante previo filtrado de hojas y sedimentos; posteriormente, el agua se distribuye al resto de la casa a través de un circuito hidráulico independiente de los sistemas de agua potable. Estos depósitos para el almacenamiento de agua de lluvia suelen estar colocados en el jardín o en otra superficie de la vivienda como se muestra en la Figura 12; sus dimensiones están definidas en función de las necesidades del uso de esta agua captada de lluvia y la pluviometría del lugar (ECONOVA, 2025).

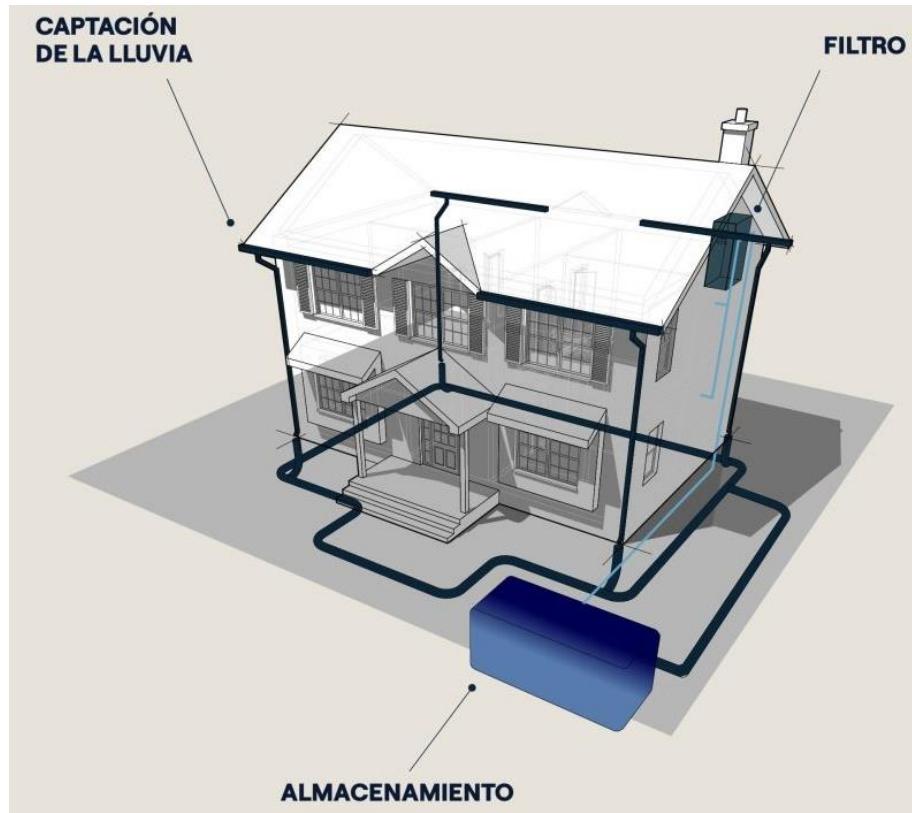


Figura 12 Sistema de captación de agua pluvial para uso doméstico urbano (ECONOVA, 2025)

Ventajas de los sistemas de captación de aguas pluviales (ECONOVA, 2025):

- Se presenta como una solución efectiva, sostenible y de bajo costo para el aprovechamiento de un recurso natural y gratuito.
- Permiten satisfacer necesidades básicas de comunidades que carecen de acceso a redes convencionales de agua potable, brindando suministro para riego, limpieza e higiene.

- Reducen significativamente la huella hídrica al disminuir la demanda de agua potable en usos domésticos no esenciales, como el lavado de ropa, utensilios, riego de jardines y descargas de inodoros.
- Contribuyen a la sostenibilidad mediante la reducción de la explotación de fuentes subterráneas y la disminución de superficies impermeables, lo que favorece la infiltración natural del agua.
- Permiten un ahorro económico importante, ya que el agua pluvial puede cubrir hasta el 80 % del consumo doméstico en ciertas viviendas.
- Ofrecen una operación eficiente, con bajo riesgo de fallos y escaso requerimiento de mantenimiento, lo que los convierte en una alternativa viable para mitigar la crisis hídrica en diversas regiones.

#### **8.2.5.2 Captación de agua de niebla**

La captación pasiva de agua de niebla constituye una estrategia innovadora y sostenible para el abastecimiento hídrico en regiones con escasa precipitación y limitada disponibilidad de fuentes convencionales de agua. Este sistema se fundamenta en el aprovechamiento de la condensación de las diminutas gotas de agua contenidas en la niebla, las cuales se adhieren a una malla vertical estratégicamente instalada (ICO-BO, 2025).

Una vez que el agua se condensa sobre la superficie de la malla, desciende por gravedad hasta una canaleta ubicada en la parte inferior de la estructura, desde donde es conducida hacia un depósito de almacenamiento. A partir de allí, el recurso hídrico puede ser distribuido de manera eficiente a los hogares. Esta tecnología, de bajo impacto ambiental y escaso mantenimiento, representa una alternativa viable para comunidades rurales o costeras afectadas por el estrés hídrico y la falta de infraestructura de distribución de agua potable (ICO-BO, 2025).

En la Figura 13 se muestra el funcionamiento del sistema de captación de agua de niebla, o bien llamado, atrapanieblas.



Figura 13 Sistema de captación de agua por atrapanieblas (ICO-BO, 2025)

El atrapanieblas, también denominado captanieblas, es un sistema diseñado para recolectar las diminutas gotas de agua presentes en la neblina, con el fin de transformarlas en un recurso hídrico aprovechable. Esta tecnología representa una estrategia creativa y eficiente para mitigar los efectos de la sequía en regiones donde, a pesar de la escasez de precipitaciones, existe presencia constante de niebla, considerando una humedad relativa superior al 70% (AQUAE FUNDACIÓN, 2021).

El agua obtenida puede ser utilizada tanto para consumo humano como para actividades productivas, como el riego agrícola. Este enfoque ha sido implementado como una respuesta efectiva a la falta parcial o total de acceso al agua potable en comunidades vulnerables, consolidándose como una alternativa ecológica y de bajo costo frente a la crisis hídrica global (AQUAE FUNDACIÓN, 2021), además, este sistema se alinea y aporta positivamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible en las categoría 6 sobre agua limpia y saneamiento, en el 11 sobre ciudades y comunidades sostenibles, en el 12 sobre producción y consumos responsables y en el 13 acción por el clima como se muestra el a Figura 14 (ODS, 2023).



Figura 14 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS, 2023)

### 8.2.5.3 Tecnologías utilizadas para extraer agua del aire.

Existen varias maneras de obtener agua potable de la atmósfera. Gran parte de ellas son pasivas, es decir, no requieren fuentes de energía exógenas para llevar a cabo el proceso, las cuales se describen a continuación (IMNOVATION#HUB, 2025):

- **Condensación de punto de rocío.** Esta tecnología enfriá el aire hasta que el vapor de agua se condensa en agua líquida. Utiliza unidades de enfriamiento y condensadores para recolectar el agua. Es una solución efectiva en áreas con alta humedad relativa.
- **Desecantes.** Los sistemas con desecantes utilizan materiales higroscópicos que absorben el vapor de agua del aire. Luego, el agua se extrae calentando el desecante y recolectando el vapor generado.
- **Condensación pasiva.** Utiliza superficies especiales hidrofilicas para facilitar la condensación del vapor de agua sin necesidad de energía externa, con lo que se puede recolectar agua de manera eficiente y sostenible.
- **Paneles hidropónicos.** Aprovechan la energía solar para calentar el aire y dirigir el vapor hacia una cámara donde se condensa y se recolecta. Es una solución eficiente para regiones áridas.
- **Nanomateriales hidrofilicos.** Emplea materiales a nanoscala con alta capacidad de absorción de humedad. Capturan vapor de agua incluso en condiciones de baja humedad y lo liberan mediante calentamiento controlado.
- **Redes de niebla.** Utilizan mallas finas para capturar gotas de agua de la niebla. Son especialmente útiles en regiones montañosas y costeras, lo que proporciona una solución de bajo coste y tecnología.

### 8.2.6 Captación de agua en el mundo

Ante el crecimiento acelerado de las zonas urbanas y los efectos del cambio climático, cada vez más intensos e impredecibles, la captación y reutilización del agua del medio ambiente se ha consolidado como una solución eficaz para enfrentar los problemas de abastecimiento hídrico en las grandes ciudades del mundo. La expansión urbana ha incrementado las superficies impermeables y reducido los ecosistemas naturales encargados de infiltrar el agua pluvial, generando así una doble problemática: escasez de agua y aumento del riesgo de inundaciones.

El aprovechamiento del agua del medio ambiente no solo proporciona una fuente adicional de agua para usos no potables como limpieza, procesos industriales, sistemas sanitarios, riego y recarga de acuíferos, sino que también permite regular el escurrimiento superficial, disminuyendo la presión sobre los sistemas de drenaje urbano y reduciendo la contaminación de cuerpos de agua naturales. En respuesta a estas problemáticas, diversos países de Europa, Asia, Australia y África han adoptado políticas y tecnologías orientadas a la captación y gestión del agua pluvial como parte integral de sus estrategias de sostenibilidad urbana y resiliencia climática (Soluciones Hidropluviales, 2012).

En Alemania, el alto costo del agua potable ha motivado a los ciudadanos y gobiernos locales a invertir en sistemas de captación de agua de lluvia para usos no potables, como el riego y la descarga de sanitarios. Proyectos emblemáticos en Berlín, como el de Potsdamer Platz, han demostrado la eficacia de estas iniciativas al recolectar y reutilizar grandes volúmenes de agua pluvial, contribuyendo a la reducción del consumo de agua potable y al control de escorrentías urbanas. Suiza, a pesar de contar con abundantes recursos hídricos, ha promovido la captación de agua de lluvia en zonas residenciales como parte de su compromiso con la sostenibilidad, logrando significativos ahorros en el consumo de agua potable para tareas domésticas. En el Reino Unido, el estrés hídrico ha llevado al desarrollo de programas reglamentados que fomentan la reducción del consumo de agua y la implementación de sistemas de captación pluvial en nuevas construcciones, respaldados por

asociaciones como la UK Rainwater Harvesting Association (UKRHA). Estas estrategias reflejan un enfoque integral hacia la gestión sostenible del agua en entornos urbanos europeos (Soluciones Hidropluviales, 2012).

En la siguiente Figura 15 se muestran ejemplos de sistemas de captación de agua implementados en Europa:



Figura 15 Métodos de captación de agua de lluvia en techos europeos  
(Soluciones Hidropluviales, 2012)

#### 8.2.6.1 Métodos de captación de agua pluvial en Asia

La investigación sobre los sistemas tradicionales de captación de agua en Asia, presentada en el Journal of Asian Architecture and Building Engineering, permite comprender cómo las prácticas ancestrales pueden ofrecer soluciones viables ante los desafíos contemporáneos de escasez hídrica. En diversas regiones del continente asiático, especialmente aquellas ubicadas en zonas áridas y semiáridas, comunidades han desarrollado a lo largo de los siglos infraestructuras eficientes y sostenibles como los aljibes, pozos escalonados (baolis), tanques de almacenamiento (stepwells) y los sistemas de galerías filtrantes subterráneas conocidos como qanats (Matsumoto & Sawaki, 2023).

En la siguiente Figura 16 se muestran algunos de los sistemas de captación de agua de lluvia existentes en el continente asiático.

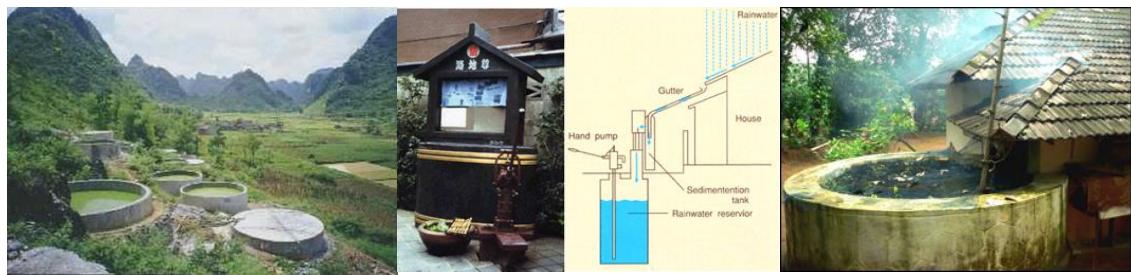


Figura 16 Sistemas de captación de agua pluvial rojison y sumida en Asia (Soluciones Hidropluviales, 2012)

Estos métodos tradicionales de captación y manejo del agua se caracterizan por su bajo impacto ambiental, su integración armónica con el entorno y su efectividad en la recolección, conducción y almacenamiento del recurso hídrico. Su diseño refleja un profundo conocimiento del clima, la topografía y la dinámica de los acuíferos locales. A pesar de su eficacia comprobada, muchos de estos sistemas han sido desplazados por tecnologías modernas centralizadas, que a menudo resultan insostenibles en el largo plazo. El estudio sugiere que recuperar, adaptar y combinar estos saberes tradicionales con tecnologías contemporáneas puede representar una estrategia clave hacia una gestión hídrica resiliente y culturalmente pertinente, especialmente en contextos afectados por el cambio climático y la sobreexplotación de fuentes convencionales (Matsumoto & Sawaki, 2023).

#### 8.2.6.2 Métodos de captación de agua pluvial en Oceanía

En el contexto de los desafíos ambientales y urbanos que enfrenta Oceanía, particularmente Australia, la captación de agua de lluvia se ha posicionado como una alternativa viable y sostenible para garantizar el abastecimiento hídrico en áreas urbanas. A través de un estudio de caso realizado por (Preeti & Rahman, 2021), se analizó la fiabilidad, la demanda de agua y la viabilidad económica de los sistemas de captación pluvial en ocho capitales australianas, considerando variables climáticas, técnicas y de uso doméstico. El modelo de simulación empleado, basado en un balance hídrico diario, permitió evaluar la eficiencia de estos sistemas en función de la superficie de recolección, la capacidad de

almacenamiento y los patrones de consumo, identificando que los niveles de fiabilidad oscilan entre el 38 % y el 100 %, según la ciudad y el tipo de uso (Preeti & Rahman, 2021).

Los hallazgos del estudio revelan que el uso combinado de agua de lluvia para sanitarios, lavandería y riego puede lograr una alta eficiencia, siendo Hobart la ciudad con mayor fiabilidad y Adelaida la que presenta menores valores. Asimismo, se evidenció que en ciertas condiciones los sistemas resultan económicamente rentables, lo cual respalda su implementación como una solución descentralizada para la gestión del agua urbana. La investigación enfatiza la necesidad de adaptar las estrategias de captación a las condiciones locales, promoviendo así una planificación hídrica más resiliente frente al cambio climático, al tiempo que contribuye a la reducción de la demanda de agua potable y al alivio de las infraestructuras hidráulicas existentes (Preeti & Rahman, 2021).

En la siguiente Figura 17 se muestra un sistema de captación de agua pluvial instalado en Australia.



Figura 17 Sistema de captación de agua pluvial en Upper Kangaroo River, Kangaroo Valley, New South Wales, Australia (2030 Palette, 2025)

### **8.2.6.3 Métodos de captación de agua pluvial en África**

En el contexto africano, particularmente en regiones áridas y semiáridas, los métodos de captación de agua se han convertido en una herramienta fundamental para combatir la escasez hídrica derivada del cambio climático, el crecimiento poblacional y la limitada infraestructura hidráulica. La captación de agua de lluvia representa una solución viable y sostenible para garantizar el acceso al recurso hídrico en comunidades rurales y urbanas vulnerables. Estudios recientes, como el de (El Salvador, y otros, 2023), han identificado diversas técnicas utilizadas en el continente, entre las que destacan los sistemas de recolección en techos, microcuencas, zanjas de infiltración, presas subterráneas y represas de tierra, las cuales se adaptan a las condiciones geográficas y sociales de cada región.

Estas estrategias no solo permiten disponer de agua para consumo humano, sino también para actividades agrícolas y ganaderas, fundamentales en la seguridad alimentaria de las poblaciones locales. Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos significativos como la falta de conocimientos técnicos, la escasa inversión en infraestructura, y la resistencia cultural al cambio tecnológico. Para superar estas barreras, se propone fortalecer las políticas públicas mediante programas educativos, financiamiento accesible, investigación aplicada y participación comunitaria. De este modo, los métodos de captación de agua en África pueden consolidarse como mecanismos clave para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible vinculados al agua, la salud y la resiliencia climática (El Salvador, y otros, 2023).

A continuación, se muestra en la Figura 18 un sistema de zanjas para almacenamiento y riego de agua pluvial en África:

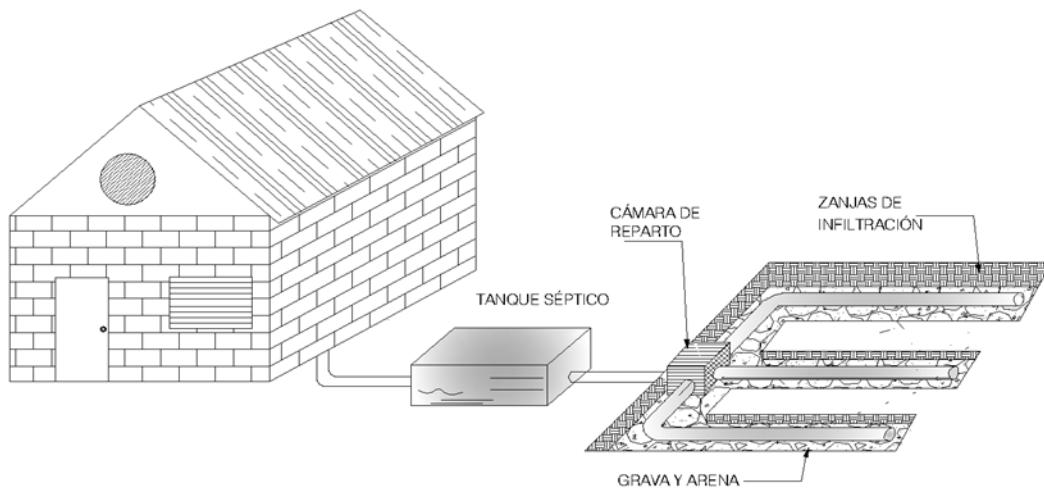


Figura 18 Esquema de funcionamiento de las Zanjas Filtrantes (Salas Rodríguez, 2022)

#### 8.2.6.4 Métodos de captación de agua pluvial en América

Chile como referente pionero en la implementación de tecnologías de captación de agua a partir de niebla (AQUAE Fundation, 2021).

La tecnología del atrapanieblas representa una alternativa innovadora y sostenible para el abastecimiento hídrico en regiones áridas, especialmente en contextos donde el acceso al agua es limitado. Chile se ha consolidado como país pionero en el desarrollo e implementación de esta técnica, gracias a las investigaciones iniciadas en la década de 1960 por el físico Carlos Espinosa Arancibia, de la Universidad de Chile, quien patentó un dispositivo destinado a captar el agua contenida en las nieblas o camanchacas. Posteriormente, esta invención fue donada a la Universidad Católica del Norte, lo cual permitió su difusión y aplicación a través de organismos internacionales como la UNESCO (AQUAE Fundation, 2021).

Las estimaciones realizadas por investigadores chilenos sugieren que, si se lograra capturar tan solo el 4% del agua presente en la niebla, sería posible cubrir completamente las necesidades hídricas del norte del país, incluyendo al desierto de Atacama. Esta

tecnología ha sido replicada en diversas regiones de América Latina, tales como Perú, Ecuador, Colombia, México, Guatemala y República Dominicana, así como en naciones de otros continentes como España, Sudáfrica, Namibia, Omán, Croacia, Yemen y las Islas de Cabo Verde. La expansión del atrapanieblas en estos territorios demuestra su eficacia como estrategia de adaptación frente a la escasez hídrica y al cambio climático (AQUAE Fundation, 2021).

A continuación, en la Figura 19 se muestra el sistema de captación de atrapanieblas implementado en Chile.

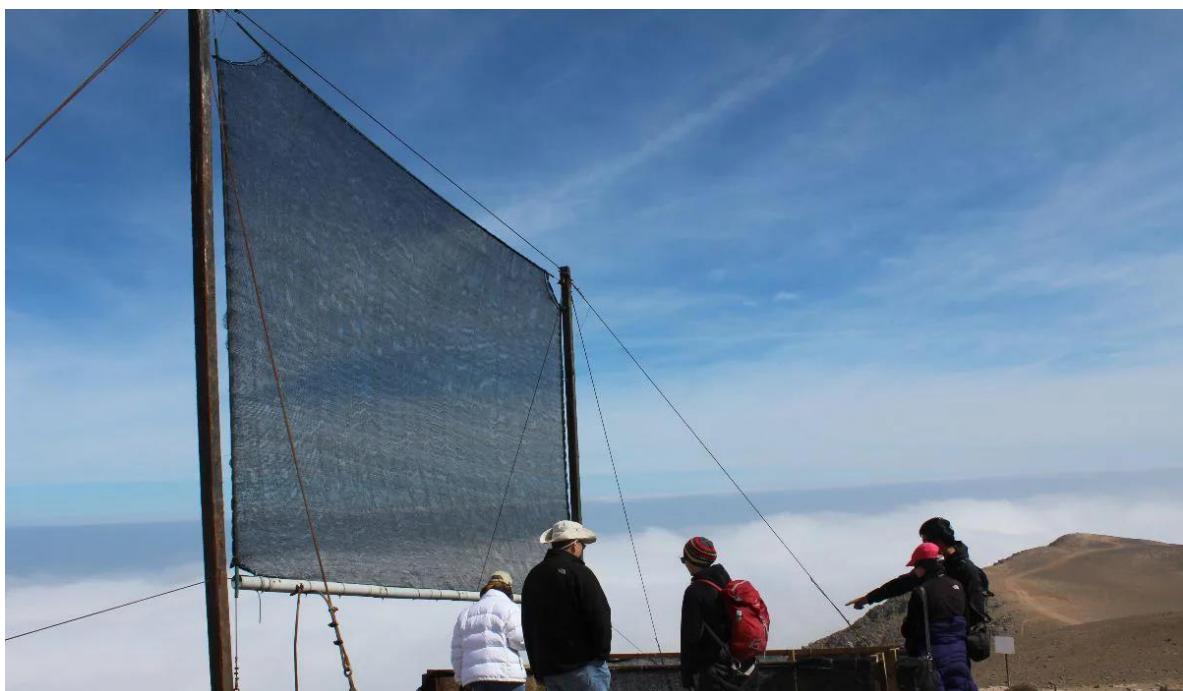


Figura 19 Sistema de recolectores de atrapaniebla instalados en Atacama Chile (AQUAE Fundation, 2021)

#### **8.2.6.5 Métodos de captación de agua pluvial en México**

En México, la captación de agua de lluvia se ha consolidado como una estrategia viable para enfrentar los retos relacionados con la escasez hídrica, especialmente en regiones áridas, semiáridas y zonas urbanas densamente pobladas. Diversas investigaciones académicas han documentado la implementación de métodos tanto tradicionales como

innovadores, destacando su efectividad en distintos contextos geográficos y sociales. En el norte del país, por ejemplo, se ha promovido el uso de sistemas como techos cuenca, aljibes, zanjas de infiltración y ollas de captación, los cuales han demostrado ser eficaces para almacenar agua pluvial con fines agrícolas, domésticos y de conservación ambiental. Estos métodos, además de contribuir al abastecimiento hídrico, desempeñan un papel relevante en la recuperación de suelos degradados y la restauración de la biodiversidad local (Jalife Acosta, Quiroa Herrera, & Villanueva Solís, 2018).

En áreas urbanas como la Ciudad de México y el Área Metropolitana de Guadalajara, la captación de agua de lluvia ha sido incorporada en viviendas, escuelas y espacios públicos, evidenciando beneficios directos en la reducción del consumo de agua potable y en la mejora de la salud pública. El tratamiento adecuado del recurso recolectado mediante sistemas de filtración y desinfección ha permitido su uso para actividades no potables, como la limpieza, el riego y el uso sanitario, e incluso para el consumo humano en algunos casos. Estas prácticas han sido impulsadas tanto por organismos gubernamentales como por universidades y organizaciones civiles, con el objetivo de fortalecer la seguridad hídrica, promover la equidad en el acceso al agua y fomentar la resiliencia frente a los efectos del cambio climático. Por tanto, la captación de agua de lluvia en México representa una alternativa sustentable y replicable para mitigar la crisis hídrica en múltiples regiones del país (Jalife Acosta, Quiroa Herrera, & Villanueva Solís, 2018).

En la siguiente Figura 20 se muestran diversos tipos sistemas de captación de agua pluvial en México.



Figura 20 Sistemas de captación de agua pluvial en México (Jalife Acosta, Quiroa Herrera, & Villanueva Solís, 2018)

#### **8.2.6.6 Métodos de captación de agua pluvial en Querétaro**

En Querétaro la lluvia ocurre sobre todo en los meses de mayo a octubre. La red de recolección pluvial en Querétaro está compuesta por colectores pluviales, drenes a cielo abierto que están conectados de forma independiente a la red de drenajes pluviales de fraccionamientos en Santiago de Querétaro como se puede observar en la Figura 21 (Aguilar Sánchez & Lara Aguazul, 2021).



Figura 21 Sistema de drenes a cielo abierto en Santiago de Querétaro  
(Elaboración propia, 2023)

#### **8.2.6.7 Métodos de captación de agua pluvial en Amealco de Bonfil en Querétaro**

En Amealco, los bordos son una técnica común utilizada por los pobladores para diversos fines, como la agricultura, cría de carpas y abrevadero de ganado. Este municipio se encuentra en la región de la Sierra Queretana, con una elevación promedio de 2620 metros sobre el nivel del mar, y limita con otros municipios en Querétaro, Guanajuato,

Michoacán y el Estado de México. La agricultura ocupa una parte significativa de su territorio, y la preservación de los cuerpos de agua y bosques es crucial para el abastecimiento de agua y la conservación de la región. Las comunidades de "El Bothe" y "Mesillas" se benefician de la topografía y la presencia de bordos, y la extracción de toba de Amealco es una actividad económica importante en la zona. El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano y precipitaciones en el mes más seco por debajo de los 40mm, concentrándose la lluvia en los meses de mayo a octubre y presencia de heladas en los meses de octubre a febrero. Esta característica de clima y precipitación permite la captación de lluvia durante todo el año, variable en capacidad, pero cumpliendo el postulado de Horton referente a la capacidad de infiltración, el cual indica que la curva de capacidad de infiltración del suelo se vuelve constante siempre y cuando haya agua en la superficie que satisface la capacidad de absorción que tiene el suelo en su grado máximo o potencial, permitiendo a los bordos almacenar agua sin necesidad de una geomembrana (Aguilar Sánchez & Lara Aguazul, 2021).

En la siguiente Figura 22 se muestra el sistema de almacenamiento de agua de lluvia mejor conocido como bordo en Amealco de Bonfil en Querétaro.



Figura 22 Sistema de captación y almacenamiento de agua pluvial llamado bordo con geomembrana para evitar la filtración (Aguilar Sánchez & Lara Aguazul, 2021)

### 8.2.7 Sistemas de hidroponía vertical

Es impostergable mencionar en esta tesis la existencia de los sistemas de hidroponías verticales, puesto que, es fundamental su funcionamiento, beneficios y diseños que constituyen parte esencial de una producción de alimentos cultivados en estos sistemas y

como trabajan en sinergia con las tecnologías antes mencionadas, tales, la captación de agua pluvial y de niebla en la comunidad de Amealco de Bonfil del estado de Querétaro. Siendo esto la propuesta que dará solución a las necesidades del usuario de estudio.

#### **8.2.7.1 ¿Qué es la hidroponía?**

La hidroponía representa una modalidad avanzada en el manejo de cultivos vegetales, la cual prescinde del uso de suelo como medio de crecimiento, permitiendo así la producción de especies principalmente herbáceas en espacios no convencionales. Esta técnica contempla las condiciones fisiológicas esenciales para el desarrollo vegetal, como la disponibilidad de luz, temperatura, agua y nutrientes, siendo estos últimos suministrados a través de soluciones nutritivas específicamente formuladas. Los sistemas hidropónicos ofrecen rendimientos significativamente superiores a los alcanzados mediante el cultivo tradicional en suelo, resultado de la regulación precisa de factores como la disponibilidad hídrica y nutricional, la radiación solar, la temperatura ambiental, la densidad de plantación, así como del control sobre patógenos y plagas (Giménez & Beltrano, 2015).

En la siguiente Figura 23 se muestra la producción de lechugas dentro de un sistema de hidroponía.



Figura 23 Innovación en crecimiento, la agricultura sin suelo redefine los límites tradicionales del cultivo (METEORED, 2024)

La incorporación de tecnologías informáticas ha impulsado la automatización de estos sistemas, favoreciendo un manejo eficiente y repetible que ha consolidado a la hidroponía como una herramienta fundamental tanto para la investigación científica como para la enseñanza. En el contexto actual, caracterizado por la pérdida progresiva de tierras agrícolas debido a factores como la contaminación, la desertificación, el cambio climático y la expansión urbana desmedida, la hidroponía se perfila como una alternativa viable para garantizar la seguridad alimentaria. Conceptos como el huerto hidropónico urbano y familiar, las granjas verticales y las “ciudades inteligentes” surgen como propuestas innovadoras orientadas hacia un modelo agrícola sostenible. Estos enfoques requieren una visión sistémica que integre aspectos como el abastecimiento energético e hídrico, la logística, la gestión de residuos y el diseño constructivo, con el objetivo de asegurar la producción de alimentos bajo parámetros de sustentabilidad y evaluación continua (Giménez & Beltrano, 2015).

En el contexto de la captación de agua, la hidroponía puede integrarse con sistemas de recolección de agua de lluvia y atrapanieblas para maximizar la eficiencia hídrica en los cultivos hidropónicos.

#### **8.2.7.2 Clasificación de sistemas hidropónicos.**

Los sistemas hidropónicos han evolucionado para adaptarse a diversos requerimientos agrícolas, siendo clasificados principalmente en siete categorías: sistema de mecha, cultivo en agua profunda -DWC-, flujo y reflujo -Ebb and Flow-, goteo, técnica de película de nutrientes -NFT-, aeroponía y fogponía. Cada uno de estos sistemas presenta ventajas y limitaciones según las necesidades del cultivo, el entorno y los recursos disponibles (Modu, Adam, Aliyu, Mabu, & Musa, 2020).

El sistema de mecha se caracteriza por su simplicidad y pasividad, utilizando materiales como perlita, vermiculita o fibra de coco para transportar la solución nutritiva sin necesidad de bombas. No obstante, su limitada capacidad de transporte hídrico lo

restringe a cultivos de pequeña escala. En contraste, el sistema DWC mantiene las raíces completamente sumergidas en una solución nutritiva oxigenada mediante un sistema de bombas, favoreciendo cultivos como la lechuga. Por su parte, el método de flujo y reflujo emplea ciclos temporizados de inundación y drenaje que, aunque eficientes, son sensibles a fallos mecánicos que pueden comprometer el sistema completo (Modu, Adam, Aliyu, Mabu, & Musa, 2020).

El sistema de goteo permite un control preciso del suministro de nutrientes, con variantes de recuperación y no recuperación, aunque requiere ajustes constantes del pH. La técnica NFT prescinde de sustratos sólidos, usando una película delgada de solución nutritiva que circula constantemente, pero puede poner en riesgo el desarrollo del cultivo si se interrumpe el flujo (Modu, Adam, Aliyu, Mabu, & Musa, 2020).

La aeroponía y su evolución, la fogponía, representan las soluciones más avanzadas, suspendiendo las raíces en el aire y administrando nutrientes mediante nebulización. Estos métodos ofrecen alta eficiencia en la absorción y menor consumo de recursos, aunque dependen críticamente de sistemas automatizados para evitar la desecación de las raíces (Modu, Adam, Aliyu, Mabu, & Musa, 2020).

Los sistemas hidropónicos inteligentes pueden clasificarse según la tarea automatizada en: soporte auxiliar, cultivo de cultivos y monitoreo. Estas tareas pueden habilitarse a través de diferentes tipos de arquitecturas de automatización, como sistemas embebidos, redes de sensores inalámbricos -WSN- e Internet de las Cosas -IoT- (Modu, Adam, Aliyu, Mabu, & Musa, 2020).

#### **A. Sistemas Auxiliares**

Estos sistemas apoyan indirectamente las funciones hidropónicas:

- Recolección de Agua: Dispositivos como CactusNet recolectan agua de niebla utilizando superficies inspiradas en cactus.

- Control de Clima: Se utilizan sensores y controladores -como el sistema fuzzy- para regular la temperatura, la humedad y la luz dentro de los invernaderos.
- Suministro de Energía: Algunos sistemas integran paneles solares para reducir la dependencia de la red eléctrica y hacer los cultivos más sostenibles.

## **B. Cultivo de Cultivos**

Estos sistemas automatizan el crecimiento y mantenimiento de las plantas:

- Siembra Automatizada: Robots y manipuladores colocan las semillas de forma precisa.
- Trasplante y Cosecha: Sistemas robóticos utilizan visión por computadora para identificar y recolectar cultivos maduros.
- Poda y Control de Plagas: Robots con visión 3D y algoritmos inteligentes detectan hojas dañadas y realizan podas, además de controlar plagas mediante tratamientos dirigidos.

## **C. Sistemas de Monitoreo**

Diseñados para observar y ajustar condiciones de crecimiento:

- Sensores Ambientales: Miden pH, EC, temperatura, humedad, CO<sub>2</sub> y luz para evaluar el ambiente de cultivo.
- Análisis Visual: Se emplean cámaras RGB, infrarrojas y térmicas, junto con algoritmos de IA, para monitorear el crecimiento de las plantas, detectar deficiencias y enfermedades.

- Detección de Deficiencias: Sistemas de visión artificial detectan carencias nutricionales y otras anomalías foliares.

## D. Tecnologías de Automatización

- Sistemas Embebidos: Utilizan microcontroladores (como Arduino y Raspberry Pi) para automatizar tareas específicas.
- WSN -Redes de Sensores Inalámbricos-: Permiten la transmisión de datos desde sensores distribuidos al sistema de control.
- IoT -Internet de las Cosas-: Habilita el monitoreo remoto, toma de decisiones basada en datos en tiempo real y control a través de aplicaciones móviles o plataformas web.

En la siguiente Figura 24 se muestran algunos de los tipos de hidroponías antes descritos.



Figura 24 Tipos de sistemas hidropónicos existentes (Generación Verde, 2017)

## **IX Objetivos**

### **9.1 Objetivo general**

Diseñar e implementar un sistema que permita la captación, almacenamiento e irrigación del agua pluvial y de niebla en un cultivo hidropónico vertical de autoconsumo en Amealco de Bonfil.

### **9.2 Objetivos específicos**

- 1: Identificar el grupo de usuarios con una problemática real, mediante la observación de campo en Amealco de Bonfil para obtener toda la información necesaria en base a la experiencia de usuario y fuentes confiables de investigación científica.
- 2: Diseñar un sistema que permita la captación de agua pluvial y agua de niebla para uso del sistema hidropónico vertical.
- 3: Integrar un sistema de almacenamiento de agua captada por ambos sistemas de captación pluvial y de niebla.
- 4: Integrar un sistema de irrigación de agua que permita la distribución en el cultivo hidropónico vertical.
- 5: Diseñar e integrar un sistema hidropónico vertical que soporte ambos métodos de captación de agua pluvial y de niebla.
- 6: Validar el sistema de captación, almacenamiento e irrigación de agua en el cultivo hidropónico vertical, en un entorno real.

## X Metodología

### 10.1 Diseño Centrado en las Personas (DCP)

El Diseño Centrado en las Personas -DCP- es un enfoque metodológico dirigido en crear soluciones innovadoras tomando en cuenta directamente al usuario que usará el producto o servicio para satisfacer sus deseos o necesidades; por tal motivo es el método ideal con el cual se llevó a cabo todo el proceso de investigación para definir el problema y/o deseos del usuario, localidad, requerimientos, propuestas de diseño, selección de diseño, construcción de prototipo funcional, monitoreo y evaluación del prototipo, cambios y ajustes del prototipo funcional. Todo este proceso está definido por tres elementos fundamentales de la metodología ECE que significan Escuchar, Crear y Entregar.

En la siguiente Figura 25 se muestra el proceso del Diseño Centrado en las Personas -DCP-.



Figura 25 Etapas del proceso del Diseño Centrado en las Personas  
(Shelly Pursell, 2023)

## **10.2 El proceso ECE**

El proceso de Diseño Centrado en las Personas (DCP) comienza con la identificación de un reto específico y se desarrolla en tres fases principales: Escuchar, Crear y Entregar. El equipo parte de observaciones específicas para luego hacer síntesis abstractas, y finalmente retorna a lo concreto mediante el diseño de soluciones específicas (IDEO, 2009).

### **10.2.1 Etapa de Escuchar**

En esta etapa se recopilaron historias, anécdotas e inspiración. Esta fase incluye la preparación para la investigación y la planificación del trabajo de campo, y con ayuda de recopilación de literatura especializada en libros, revista científicas, bibliotecas de internet, documentales científicos, portales académicos y artículos científicos y privados. Esta etapa es crucial para comprender a fondo las necesidades y contextos de las personas involucradas en el problema a resolver (IDEO, 2009). Así mismo, en esta etapa se realizaron entrevistas a manera de consulta para determinar los requerimientos indispensables en el desarrollo del diseño conceptual de propuestas que den solución al problema o bien cubran con los deseos del usuario.

### **10.2.2 Etapa de Crear**

Con base en las observaciones y literaturas recopiladas se identificaron las oportunidades para generar soluciones y la fabricación de un prototipo funcional. Durante esta fase, se transitó del pensamiento concreto al abstracto y luego vuelve a lo concreto para diseñar soluciones tangibles (IDEO, 2009). Esta fase es clave para transformar las observaciones en ideas accionables y prototipos que se ajusten a las necesidades detectadas (IDEO, 2009).

Esta etapa es la más importante, ya que se llevó a cabo todo el proceso de diseño de propuestas para dar solución al problema del usuario, mediante el uso de bocetos rápidos hechos a mano, uso de software de modelado tridimensional como Rhinoceros versión 8, para construir virtualmente el diseño seleccionado con medidas reales basadas en los requerimientos finales obtenidos de la etapa de escuchar. Finalmente terminado el diseño virtual se continua con la adquisición de los materiales para definir cómo será el proceso de construcción del prototipo en la etapa de entregar, que será la culminación de todo el proyecto de investigación por el cual se realiza esta tesis de maestría, sin embargo, se presentarán los resultados de cada etapa y la evaluación del mismo para dar seguimiento a futuras mejoras.

### **10.2.3 Etapa de Entregar**

En la fase de Entrega del DCP constituye un momento crucial en el cual se materializan las soluciones propuestas mediante el desarrollo de un prototipo funcional. Además, se llevó a cabo una evaluación exhaustiva de las capacidades necesarias, acompañada de una planificación detallada para la implementación. Este enfoque sistemático permite no solo estructurar las soluciones de manera eficiente, sino también garantizar su viabilidad y facilitar su lanzamiento exitoso en el mercado (IDEO, 2009).

Durante esta etapa se realizó el armado, instalación y operación del diseño de prototipo final en el lugar donde fue operado por el usuario; con el objetivo de monitorear, ajustar, cambiar, mejorar y rediseñar en tiempo el prototipo en un nuevo producto capaz de cumplir con la función requerida.

## **XI Resultados**

### **11.1 Resultados de la etapa de *Escuchar***

En el proceso de escuchar se identificó el grupo de usuarios con una problemática real mediante la observación de campo en el lugar de estudio. Siendo el problema central la pérdida de las cosechas en los cultivos en invernaderos por la falta de agua de hasta el 50 %. Los usuarios identificados son los ejidatarios productores de hortalizas, productores de traspatio y escuelas campesinas agroecológicas -ECAS- de San Pedro Tenango ubicados en Amealco de Bonfil. Las Escuelas Campesinas Agroecológicas se erige como un modelo de educación rural alternativa que integra la pedagogía freiriana con prácticas agroecológicas adaptadas al contexto local. Este espacio promueve la formación de productores y familias en técnicas sustentables, como la elaboración de biofertilizantes, lombricomposta y la implementación de huertos y bosques sustentables, con el objetivo de fortalecer la autosuficiencia alimentaria y la regeneración ecológica (Gómez Martínez, Mata García, & González Santiago, 2017).

El municipio de Amealco de Bonfil se localiza al sur del estado de Querétaro; limita al norte con San Juan del Río y Huimilpan; al este con el Estado de México; al sur y oeste con el Estado de Michoacán (Sectur, 2019). Amealco de Bonfil cuenta con un sistema de recuperación de agua de lluvia mejor conocido como bordos, que son insuficientes para abastecer la irrigación en los invernaderos o en su caso actual están en su nivel más bajo; siendo esto un grave problema para los cultivos en invernaderos de autoconsumo, ya que el riego de agua es prioritario para los campos cultivos de maíz, avena, entre otros que están a campo abierto, dejando recursos limitados para los invernaderos.

En la Figura 26 se muestra el mapa de la ubicación de Amealco de Bonfil, Querétaro:

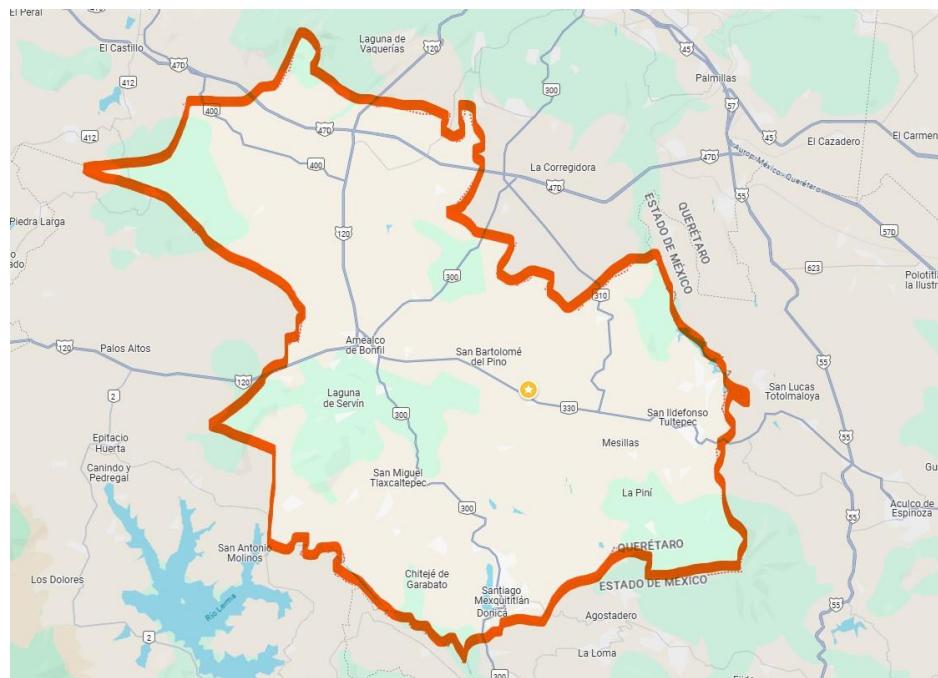


Figura 26 Mapa de la localidad de Amealco de Bonfil en Querétaro  
(Google Maps, 2025)

Durante el proceso de investigación de campo se realizó estudio detallado para comprender las necesidades y preferencias los usuarios identificados, utilizando una encuesta de Google Formularios sobre sus métodos de cultivo y uso de agua, con el propósito de diseñar un sistema efectivo y adaptado a las nuevas condiciones climatológicas, de uso de suelo y recursos naturales, así mismo, mediante el uso de entrevistas y apoyo de la comunidad a través de uso de una carta de consentimiento informado que se encuentra en el Anexo 1, para garantizar seguridad y confidencialidad del usuario, cumpliendo con los términos éticos de la presente investigación; observación de campo y revisión de literatura específica del problema central de la comunidad como lo fue Google Académico, Revistas científicas tales como la UNAM, la revista del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Monitor de sequía de CONAGUA, la FAO por sus siglas en inglés Food and Agriculture Organization of the United Nation, el portal de la ODS por sus siglas Objetivos de Desarrollo Sostenible y portales empresariales que ponen en ejecución sistemas de captación de agua del medio ambiente.

A continuación, se muestran los resultados e interpretaciones de las gráficas de estudio de usuario, realizadas a través de Google Formularios:

En la Figura 27 se muestran las principales fuentes de ingresos son empleado general y agricultura, ambas con un 26.7%, destacándose como las ocupaciones predominantes entre los encuestados. La ganadería representa un 13.3%, siendo una actividad también significativa pero secundaria.

**Interpretación:** Los resultados indican que el grupo de encuestados combina actividades del sector primario, como agricultura, con empleos en el sector secundario o terciario, como empleado general, ambos ocupando una proporción igual. Esta diversidad refleja una economía equilibrada entre lo rural y lo urbano. Ganadería, aunque relevante, ocupa un tercer lugar, mientras las demás categorías representan fuentes complementarias de ingreso.

1. ¿Cuál es tu principal fuente de ingresos?

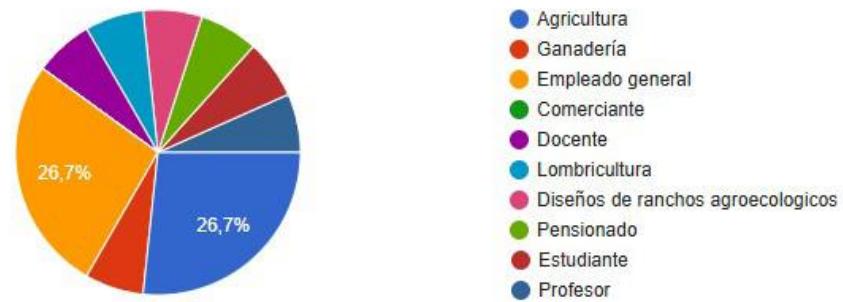


Figura 27 Principales fuentes de ingresos (Google Formularios, 2025)

En la Figura 28 se muestran los principales rangos de edades de los usuarios encuestados cuentan con un rango de entre 18 y 76 años.

**Interpretación:** Los resultados muestran una población distribuida principalmente entre dos rangos de edad dominantes: 26 a 40 años y 56 a 76 años (33.3% cada uno). Esto podría indicar que los encuestados incluyen tanto a personas en edad laboral activa como a aquellas en etapa de retiro o semirretiro. El rango de 18 a 25 años (20%) sugiere la participación de jóvenes, mientras que el de 41 a 55 años (13.3%) tiene menor representación. Es notable la ausencia de encuestados mayores de 76 años, lo que podría interpretarse como una limitación en la muestra o una menor población en dicho rango.

2. ¿En qué rango de edad te encuentras?

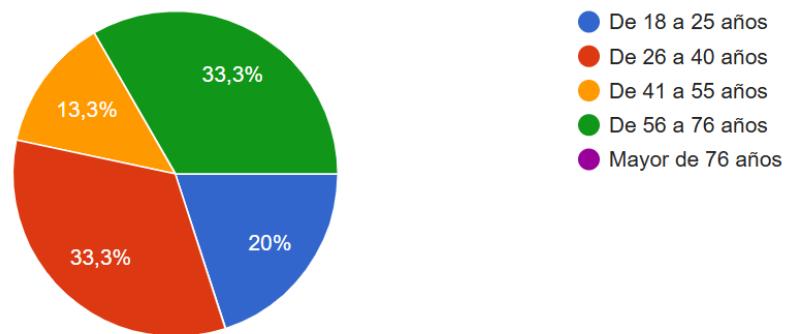


Figura 28 Principales rangos de edades en los usuarios encuestados (Google Formularios, 2025)

En la Figura 29 se muestra el porcentaje de género en la población encuestada.

**Género masculino:** Representa el 80% de los participantes, lo que corresponde a una gran mayoría dentro del grupo encuestado.

Género femenino: Comprende el 20%, lo que señala una participación significativamente menor en comparación con el género masculino.

**Interpretación:** Los resultados sugieren una predominancia del género masculino en la muestra analizada, con cuatro veces más participantes que el género femenino. Este desequilibrio en la representación podría estar relacionado con factores culturales, sociales o demográficos específicos de la población estudiada

### 3. ¿Cuál es tu género?

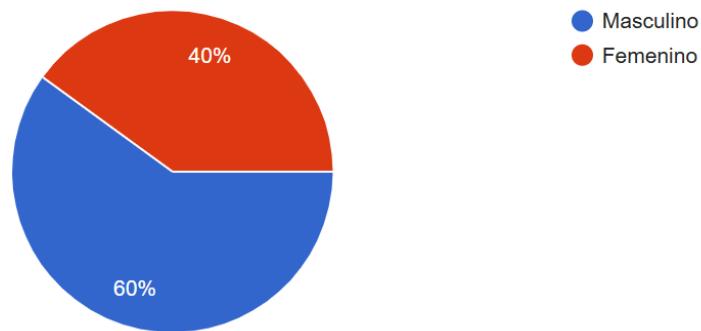


Figura 29 Porcentaje de género en la población encuestada (Google Formularios, 2025)

En la Figura 30 se muestra el lugar donde vive el encuestado. Se recopilaron un total de 15 respuestas. De ellas, el 80% indicó que reside en una zona rural (campo), mientras que el 20% señaló vivir en una zona urbana (ciudad).

**Interpretación:** Los resultados muestran que una amplia mayoría de los encuestados, equivalente a 12 personas, habita en áreas rurales, mientras que únicamente 3 personas residen en zonas urbanas.

Esto sugiere que el entorno predominante entre los participantes está relacionado con características propias del campo, actividades agrícolas o ganaderas, y posible acceso limitado a servicios urbanos.

Este dato es relevante para contextualizar cualquier otro análisis relacionado con el estilo de vida, acceso a recursos o necesidades específicas de la población encuestada.

4. ¿Cómo está considerada la zona donde vives?

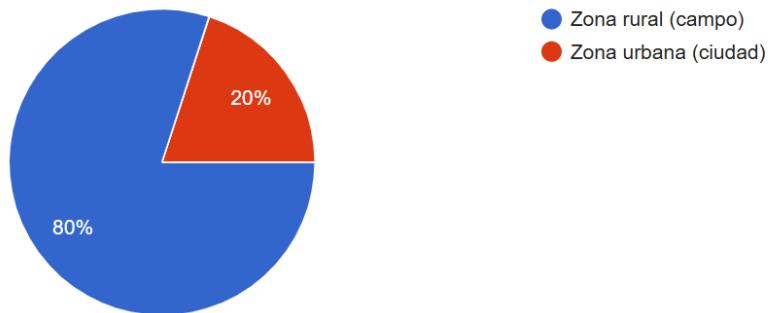


Figura 30 Principal ubicación de los encuestados (Google Formularios, 2025)

En la Figura 31 se muestran los tipos de propiedad que cuentan los usuarios para realizar cultivo.

**Interpretación:** Los resultados reflejan que la mayoría de los encuestados dispone de un terreno para cultivo a cielo abierto, lo cual representa un 60% del total. Esto indica una tendencia hacia métodos de cultivo tradicionales en espacios abiertos. Asimismo, existe una proporción menor de personas que realizan cultivos en casas con área verde o en invernaderos (cada uno con 13.3%), lo que sugiere que algunos participantes tienen condiciones controladas o semiprivadas para sus actividades agrícolas.

Es notable que no se reportaron prácticas de hidroponía, lo cual puede deberse a la falta de infraestructura o conocimiento sobre esta técnica.

Finalmente, una pequeña fracción aprovecha la azotea de su casa para cultivar, lo que refleja un uso creativo del espacio urbano.

Este análisis complementa los resultados anteriores, donde se evidenció que la mayoría de los encuestados vive en zonas rurales, lo cual guarda coherencia con la alta proporción de terrenos destinados al cultivo a cielo abierto.

5. ¿Con qué tipo de propiedad cuentas para realizar cultivo?

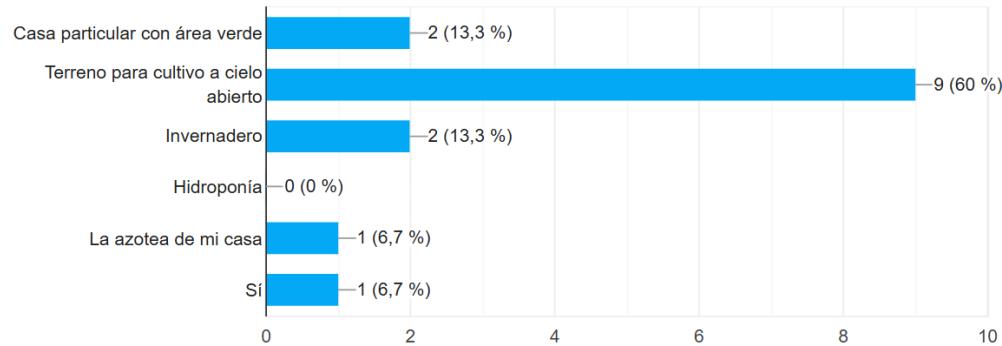


Figura 31 Tipos de propiedad del encuestado (Google Formularios, 2025)

En la Figura 32 se muestran las principales dimensiones de las superficies con las que cuentan los usuarios para cultivar.

**Interpretación:** Los datos indican que un tercio de los encuestados cultiva en superficies relativamente pequeñas, de 1 m<sup>2</sup> a 100 m<sup>2</sup>, lo cual sugiere prácticas de agricultura a pequeña escala, posiblemente en espacios urbanos o semiurbanos. Sin embargo, un porcentaje considerable también utiliza terrenos de mayor extensión: un 26.7% cultiva entre 1001 m<sup>2</sup> y una hectárea, y un 20% maneja superficies superiores a una hectárea, reflejando prácticas agrícolas de mayor envergadura, posiblemente comerciales o de subsistencia rural. Otro 20% se encuentra en un rango intermedio -101 m<sup>2</sup> a 1000 m<sup>2</sup>-, probablemente relacionado a cultivos de traspaso o producción diversificada.

Estos resultados evidencian una diversidad en las dimensiones de las áreas de cultivo utilizadas, aunque predominan los espacios reducidos, lo cual puede estar relacionado con el perfil rural y semi-rural de los participantes, como se observó en los análisis anteriores.

6. ¿Cuál es la superficie que utilizas para cultivar?

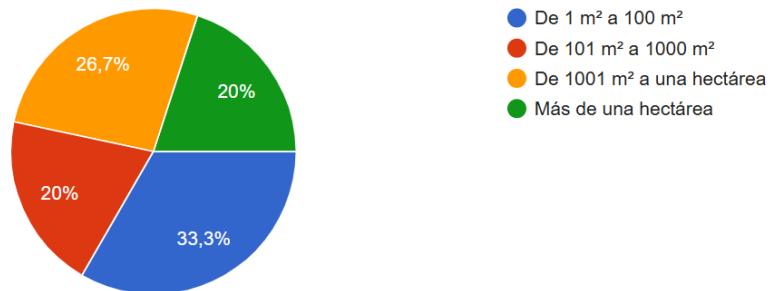


Figura 32 Principales superficies de cultivo (*Google Formularios, 2025*)

En la Figura 33 se muestran los principales proveedores de agua para los cultivos del usuario.

**Lluvias (por temporal):** Es la fuente principal con 53.3% (8 respuestas), destacando que la mayoría depende de las condiciones climáticas.

**Presa comunitaria:** Representa el 40% (6 respuestas), lo que sugiere la importancia de infraestructuras compartidas para el riego.

**Bordo particular:** Tiene el 26.7% (4 respuestas), mostrando una dependencia moderada de recursos privados.

**Toma municipal:** Provee agua al 13.3% (2 respuestas), una opción menos frecuente.

Pozos, "No" y Pozo: Cada uno cuenta con 6.7% (1 respuesta), indicando que estas fuentes son menos comunes.

**Pipas de agua:** No tuvo ninguna respuesta (0%), señalando que no es un recurso utilizado por los encuestados.

**Interpretación:** Los resultados reflejan que los encuestados dependen principalmente de fuentes naturales como lluvias, complementadas con infraestructuras comunitarias y privadas. Esto podría indicar un enfoque mixto en el acceso al agua de riego, con una notable dependencia del clima. La baja utilización de pozos y la ausencia de pipas de agua sugieren una menor integración de tecnologías de extracción o distribución en esta muestra.

7. ¿De dónde proviene el agua de riego para tus cultivos?

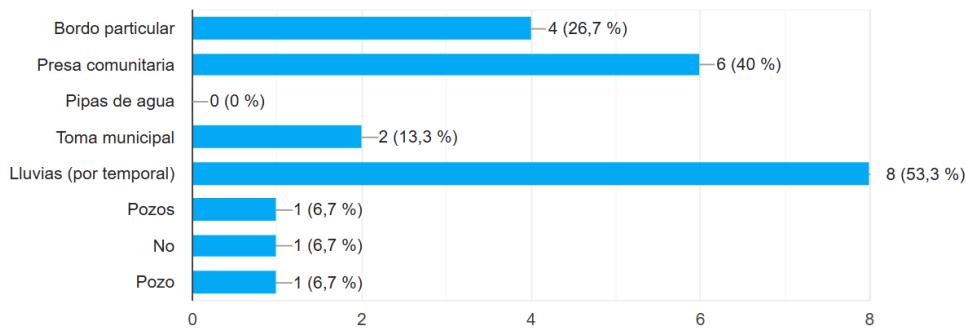


Figura 33 Principales proveedores de agua para cultivos (Google Formularios, 2025)

En la Figura 34 se muestran los principales métodos de riego que utilizan en sus cultivos.

**Riego por inundación:** Representa el 26.7% de las respuestas, siendo el método más común entre los encuestados.

**Riego por acarreo y riego por aspersión:** Cada uno tiene un 13.3%, lo que indica su relevancia, aunque menos frecuente que el riego por inundación.

**Riego hidropónico:** está representado con un 6.7%, reflejando un uso menos predominante.

**Interpretación:** El predominio del riego por inundación sugiere una preferencia por métodos más tradicionales, posiblemente debido a su facilidad de implementación en

ciertas regiones agrícolas. Sin embargo, la presencia de sistemas como el riego por goteo y acarreo apunta hacia un interés en estas técnicas.

La diversidad de métodos reflejada en los porcentajes menores podría ser indicativa de adaptaciones específicas a las condiciones locales o la disponibilidad de recursos.

8. ¿Qué método de riego utilizas para tus cultivos?

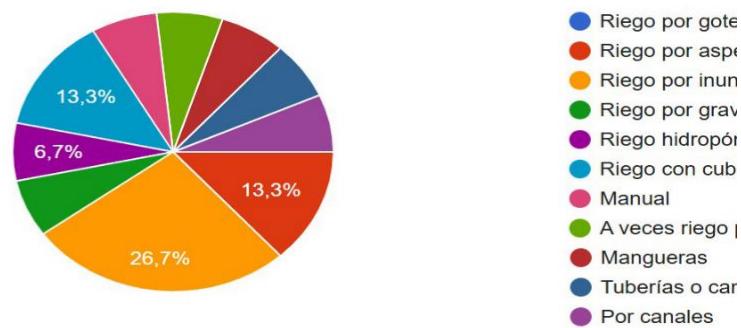


Figura 34 Principales métodos de riego en los cultivos (Google Formularios, 2025)

En la Figura 35 se muestran los litros de agua requeridos para los cultivos del encuestado.

**Interpretación:** La gráfica ilustra patrones de uso de agua en los cultivos, destacando dos tendencias dominantes: el uso reducido de 200 L. a 1000 L. y el uso elevado de más de 5000 L., cada uno representado por un tercio de las respuestas. Esto sugiere diferencias marcadas en prácticas de riego, posiblemente influenciadas por el tamaño del cultivo, tipo de plantación o acceso a recursos hídricos. El rango intermedio de 1001 L. a 3000 L. es poco representativo, indicando una preferencia por extremos en el consumo de agua.

9. ¿Cuántos litros de agua usas en cada riego para tus cultivos?

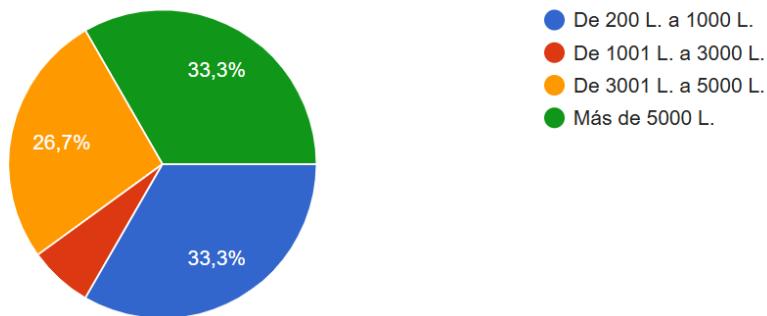


Figura 35 Uso de agua en los cultivos (Google Formularios, 2025)

En la Figura 36 se muestra la periodicidad del riego en los cultivos.

#### **Análisis cuantitativo de la distribución:**

La gráfica muestra cómo los encuestados responden a la frecuencia con la que realizan riego en sus cultivos. La distribución es la siguiente:

**Por temporal (morado):** Representa 33.3% de las respuestas, lo que sugiere que esta frecuencia es la más habitual entre los encuestados. Es posible que dependa de factores externos como la temporada o las lluvias.

**Cada semana (naranja):** Constituye 26.7%, indicando que esta práctica regular de riego también es común, aunque menos frecuente que el riego por temporal.

**3 veces por semana (rojo):** Corresponde al 13.3%, mostrando una moderada preferencia por riegos múltiples dentro de una semana.

**Interpretación:** La gráfica refleja que la mayoría de los encuestados ajusta la frecuencia de riego según las temporadas climáticas o las necesidades específicas de los

cultivos (33.3%). Esto podría estar vinculado a prácticas agrícolas tradicionales o recursos limitados para riego regular.

Por otro lado, una proporción significativa (26.7%) prefiere una rutina semanal, lo cual podría sugerir disponibilidad de infraestructura o intención de mantener consistencia en el cuidado del cultivo.

Las demás opciones representan diversos niveles de periodicidad, pero con menor relevancia.

#### 10. ¿Cada cuándo realizas el riego en tus cultivos?

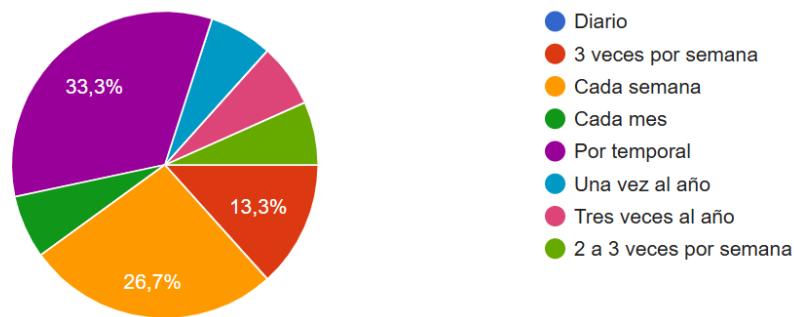


Figura 36 Periodicidad de riego en los cultivos (Google Formularios, 2025)

En la Figura 37 se muestran los principales alimentos cultivados por los encuestados.

Análisis cuantitativo de la distribución:

La gráfica presenta los tipos de alimentos cultivados por los encuestados y sus respectivas frecuencias. Los datos relevantes son los siguientes:

**Maíz:** 10 respuestas (66.7%), siendo el cultivo predominante entre los encuestados.

**Avena:** 6 respuestas (40%), destacando como el segundo cultivo más común.

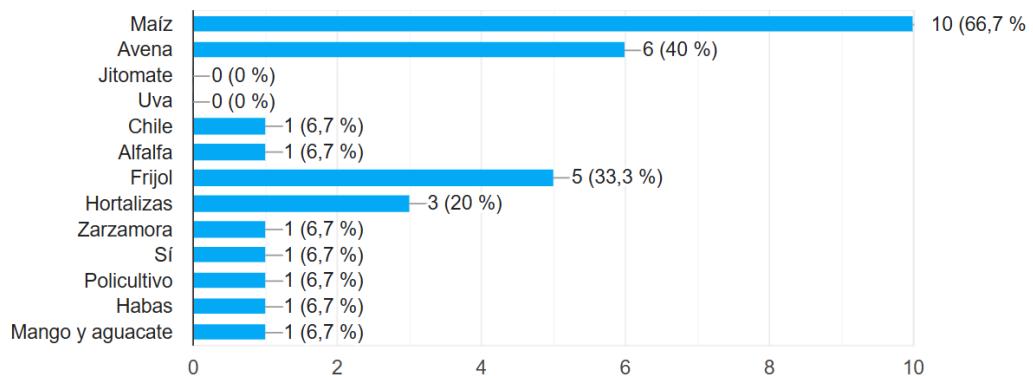
**Frijol:** 5 respuestas (33.3%), también entre los alimentos significativos.

Otros alimentos como hortalizas (20%) y zarzamora, alfalfa, chile, entre otros, tienen frecuencias menores (6.7%-20%).

Es notable la ausencia de cultivos como jitomate y uva, que no reciben ninguna respuesta (0%).

**Interpretación:** Los resultados reflejan una preferencia marcada hacia el cultivo de maíz, lo que probablemente esté relacionado con su adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas y su importancia socioeconómica como alimento básico. Avena y frijol complementan esta tendencia, sugiriendo diversidad en los cultivos que responden a necesidades locales y posibilidades de mercado. Por otro lado, la baja frecuencia de otros alimentos, como el chile, puede indicar restricciones específicas en su cultivo, como requerimientos climáticos o falta de demanda. La ausencia de ciertos alimentos como el jitomate y la uva podría deberse a factores como la especialización agrícola o condiciones ambientales no favorables en la región o bien la pérdida del cultivo por falta de recursos

#### 11. ¿Qué tipo de alimentos cultivas?



hídricos.

Figura 37 Principales alimentos cultivados por los encuestados (Google Formularios, 2025)

En la Figura 38 se muestran los kilogramos de alimentos producidos por cosecha.

### **Distribución de datos:**

**Producción de 1 a 10 kg (azul):** Representa el 33.3% de las respuestas. Esto indica que una proporción considerable de los encuestados produce cantidades pequeñas de alimentos en cada cosecha, posiblemente reflejando prácticas agrícolas a menor escala o limitaciones de recursos.

**Producción de 20 a 50 kg (rojo):** Con un 0%, este rango de producción no tuvo respuestas, lo que sugiere que es poco común o inexistente en las prácticas de los encuestados.

**Producción de 100 a 500 kg (naranja):** Constituye el 40% de las respuestas, siendo el rango más representativo. Esto sugiere que la mayoría de los encuestados se encuentran en un nivel de producción mediano.

**Producción de más de 500 kg (verde):** Abarca el 26.7%, destacando que una parte relevante de los encuestados tiene una producción significativamente alta.

**Interpretación:** la gráfica evidencia una tendencia marcada hacia dos niveles de producción: un rango medio (100 a 500 kg) que representa al grupo más amplio con un 40%, y producciones pequeñas (1 a 10 kg) con un 33.3%. Esto podría implicar una segmentación entre agricultores de escala media y pequeña. Además, el 26.7% con más de 500 kg indica la presencia de productores a gran escala, aunque en menor proporción. La ausencia total en el rango de 20 a 50 kg sugiere que este nivel de producción no es relevante o factible dentro de este grupo.

12. ¿Cuántos kilos aproximados de alimentos produces en cada cosecha?

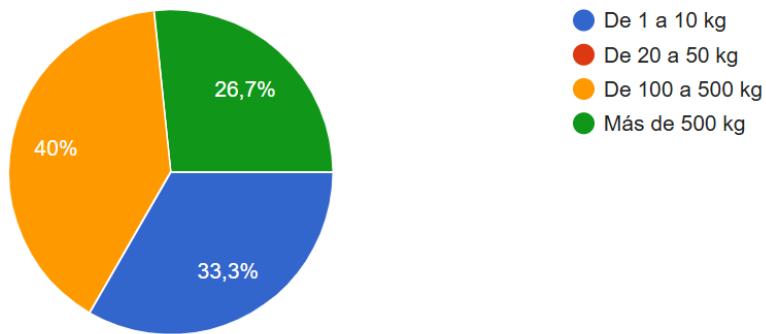


Figura 38 Kilogramos de alimentos producidos por cosecha (Google Formularios, 2025)

En la Figura 39 se muestran los principales consumidores de los encuestados.

#### **Análisis cuantitativo de la distribución:**

La gráfica se divide en las siguientes categorías:

**Consumo propio (80%, azul):** Este segmento representa la mayor parte de las respuestas. Esto indica que la producción de alimentos de los encuestados está orientada principalmente al autoconsumo, probablemente para satisfacer necesidades familiares o personales.

**Venta local (20%, rojo):** Este segmento refleja una menor proporción, sugiriendo que solo una minoría de los encuestados destina su producción al mercado local.

No se reportan respuestas para las categorías Venta nacional ni Venta al extranjero, lo que demuestra que estas modalidades de distribución no son relevantes o viables para los encuestados.

**Interpretación:** la gráfica muestra que la mayoría de los encuestados producen alimentos para su propio consumo, lo cual podría estar relacionado con prácticas agrícolas tradicionales, limitaciones en la escala de producción o preferencias personales. Un 20% destina sus alimentos a la venta local, indicando la existencia de un mercado reducido pero importante a nivel comunitario. La ausencia de producción para venta nacional o venta al extranjero puede deberse a barreras como infraestructura limitada, costos elevados o falta de acceso a mercados más amplios.

13. ¿Para qué tipo de clientes es tu producción de alimentos?

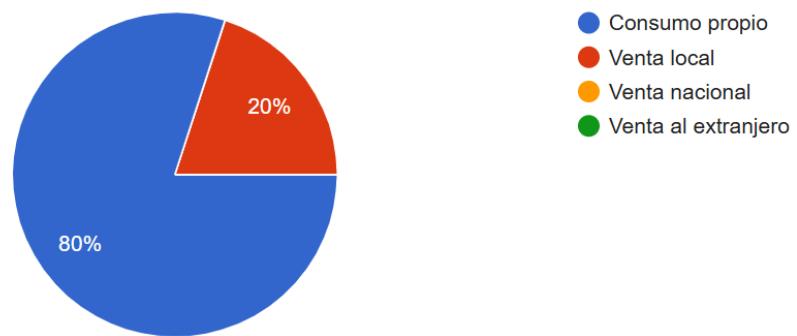


Figura 39 Principales consumidores de los encuestados (Google Formularios, 2025)

En la Figura 40 se muestra los principales métodos de captación de agua para los encuestados.

#### **Distribución de datos en la encuesta:**

**Recolectar agua de lluvia (73.3%, 11 respuestas):** Este método es claramente el más preferido, indicando una tendencia fuerte hacia su uso como estrategia principal de captación de agua. Esto probablemente se debe a su accesibilidad y eficacia en diversas regiones.

**Recolectar agua de niebla (0%, 0 respuestas):** No recibió votos, lo que sugiere que

este método no es reconocido o viable entre los encuestados.

**Pozos (20%, 3 respuestas):** Representa una alternativa común, aunque considerablemente menos popular en comparación con la recolección de agua de lluvia.

**Cisternas o tanques (26.7%, 4 respuestas):** También se consideran efectivos, destacando su utilidad en determinadas circunstancias.

**Tanques de Geomembrana con captación pluvial (6.7%, 1 respuesta):** Aunque menos frecuente, este método puede ser específico para ciertos contextos técnicos.

**Interpretación:** los resultados de la encuesta reflejan una clara preferencia por el método de recolección de agua de lluvia, el cual se considera el más efectivo por la mayoría de los encuestados (73.3%). Esto sugiere que la disponibilidad y adaptabilidad de este método lo convierten en la opción más práctica. Otros métodos, como los pozos y las cisternas o tanques, tienen menor aceptación, pero aún se reconocen como alternativas importantes. La falta de respuestas para la recolección de agua de niebla indica que este método podría carecer de promoción o conocimiento entre los participantes. Los métodos menos preferidos, como tanques de geomembrana con captación pluvial, podrían requerir mejoras en su accesibilidad o percepción.

14. ¿Cuál es el método de captación de agua que consideras más efectivo?

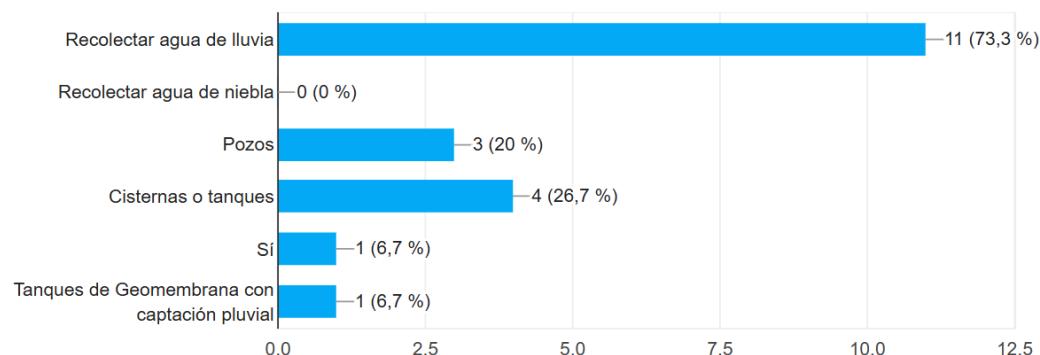


Figura 40 Principales métodos de captación de agua para los encuestados (Google Formularios, 2025)

En la Figura 41 se muestran los posibles costos del sistema de captación propuesto para los encuestados y sus preferencias de precio.

### **Análisis cuantitativo:**

La gráfica circular refleja las respuestas a la pregunta: "¿Cuánto estarías dispuesto a invertir en un módulo de cultivo de riego autónomo?" con un total de 15 participantes. Los datos se distribuyen de la siguiente manera:

**\$5,000 a \$10,000 (azul):** Representa el 73.3% de las respuestas. Este rango sobresale como la opción predominante, indicando que la mayoría de los encuestados prefiere una inversión económica.

**\$20,000 a \$30,000 (rojo):** Abarca el 13.3% de los encuestados, lo que sugiere un interés menor en rangos de inversión más altos.

**\$40,000 a \$50,000 (naranja) y más de \$50,000 (verde):** Ambos segmentos tienen un 6.7% cada uno, lo que muestra un interés marginal en inversiones significativamente mayores.

**Interpretación:** El análisis de la gráfica sugiere que la mayoría de los encuestados priorizan opciones de bajo costo, con un 73.3% dispuesto a invertir entre \$5,000 y \$10,000 en módulos de cultivo de riego autónomo. Esto podría reflejar restricciones presupuestarias, una percepción de riesgo al realizar inversiones más altas o una preferencia por alternativas accesibles. Los rangos de inversión más elevados, aunque menos populares, aún representan una minoría interesada, posiblemente debido a la confianza en las ventajas tecnológicas o la escalabilidad de este tipo de sistemas.

15. ¿Cuánto estarías dispuesto a invertir en un módulo de cultivo de riego autónomo?

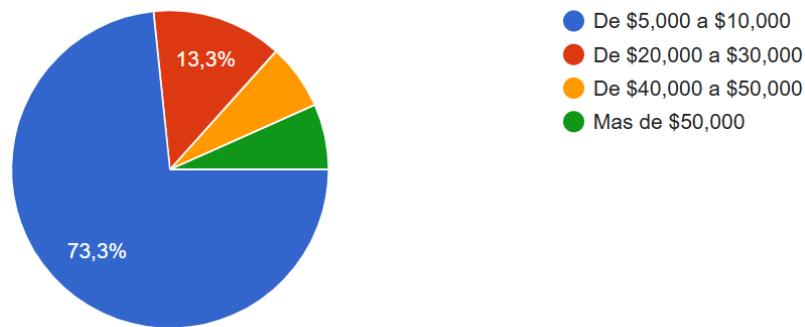


Figura 41 Costos de inversión del sistema propuesto para el encuestado (Google Formularios, 2025)

El análisis detallado de las gráficas provenientes del estudio de mercado aborda aspectos significativos clave para el proyecto de investigación sobre el Sistema de captación de agua de lluvia y niebla para el riego en hidroponía vertical en Amealco de Bonfil, en el estado de Querétaro, determinando un perfil demográfico, donde el 80% de los encuestados son hombres que viven de zonas rurales y predominando un rango de edad de entre 26 y 76 años en actividad agrícola y de empleo general.

La mayoría utiliza terrenos de cultivo a cielo abierto con una producción enfocada al autoconsumo, donde los principales alimentos de siembra son el maíz y avena.

Así mismo, se prefiere el riego por inundación considerando la captación de agua de lluvia por parte de los sistemas de bordo, qué a contar con un sistema de riego autónomo.

El 73.3% de los encuestados está dispuesto a invertir entre \$5,000 y \$10,000 MXN en módulos de cultivo autónomo, reflejando una preferencia por soluciones accesibles.

Durante el recorrido por la localidad se identificaron los siguientes invernaderos clave que se encuentran con un déficit de recursos hídricos para satisfacer el riego requerido por el cultivo que implementan. También se realizaron entrevistas a cada uno de los ejidatarios que son los propietarios de estos invernaderos de autoconsumo y comercial para conocer únicamente sus requerimientos hídricos, que tipo de cultivos producen, todo a manera de consulta para obtener la información suficiente en el desarrollo del diseño que dará respuesta al problema de la pérdida de cosechas por la falta de agua en estos invernaderos.

En la Figura 42 se muestra el primer invernadero de autoconsumo visitado en la comunidad llamada “El Capulín”, que cuenta con las dimensiones mínimas para el cultivo personal.



Figura 42 Invernadero No. 1 con vista exterior e interior, ubicado en la comunidad de “El Capulín” en Amealco de Bonfil (Elaboración propia, 2023)

En las Figuras 43 se muestran fotografías del exterior e interior del primer invernadero identificado en la comunidad de “El Capulín”.



Figura 43 Vistas del invernadero No. 1 en la comunidad de “El Capulín” en Amealco de Bonfil en Querétaro (Elaboración propia, 2023)

En el siguiente invernadero que se visitó se identificaron un incremento en las necesidades principales, las cuales serán mostradas en la Figura 44, este tipo de invernadero es de autoconsumo y venta local de jitomate, el cual requiere diferentes cantidades de recursos hídricos.



Figura 44 Invernadero No. 2 de cultivo de jitomate (Elaboración propia, 2023)

En la Figura 45 se muestra un invernadero del tipo comercial con mayor requerimiento de recursos hídricos.



Figura 45 Invernadero No. 3 de venta al extranjero (Elaboración propia, 2023)

Este tipo de invernadero es exclusivo de comercio al extranjero y requiere mayor cantidad de recursos hídricos e implica un mayor gasto en la producción de cultivo de jitomate.

En la siguiente Tabla 1 se presenta la comparativa de los 3 tipos de invernaderos identificados en la comunidad:

Tabla 1 Comparativa de la especificación técnica de los 3 invernaderos.

Especificación Técnica	Invernadero No. 1	Invernadero No. 2	Invernadero No. 3
<b>Tipo de invernadero</b>	Pequeño de autoconsumo	Mediano de autoconsumo y venta local	Grande de autoconsumo y comercial
<b>Total, de personas que cultivan</b>	4	4	10
<b>Superficie del invernadero</b>	20 m <sup>2</sup>	1600 m <sup>2</sup>	5000 m <sup>2</sup>
<b>Sistema de riego</b>	Acarreo con cubetas de 19 l	Goteo	Goteo
<b>Cantidad de agua disponible de riego</b>	30 l	2000 l	5000 l
<b>Cantidad de agua requerida para riego</b>	200 l	3500 l	7000 l
<b>Periodicidad de riego</b>	Diario por las noches	Diario por las mañanas	Diario por las tardes
<b>Tipo de cultivo</b>	Variedad de chile, acelga, lechuga, jitomate, cherry, fresa, cilantro y maíz	Jitomate	Jitomate
<b>Proveedor de agua</b>	Tubería municipal	Bordo	Bordo y tubería municipal
<b>Bordo para captación de agua</b>	NO	SI	SI

Tomando en cuenta los datos obtenidos de los 3 invernaderos, se identificaron algunos requerimientos posibles para evaluar en la siguiente Tabla 2:

Tabla 2 Lista de posibles requerimientos a evaluar.

Lista de requerimientos previos identificados.
Recolectar un 33.3 % de Agua (200 L) diarios como mínimo para riego.
Almacenamiento de Agua para Invernaderos con una Superficie de 20 – 100 m <sup>2</sup> .
Dosificación del riego por día.
Disponibilidad de 80 L de agua almacenada.
Riego de 6.4 L diarios para chile serrano en hidroponía vertical.
Recolección de 73 L de agua x día mínimo x 20 m <sup>2</sup> para pepino.

## 11.2 Resultados de la etapa de *Crear*

Con base en la observación de campo, entrevistas de consulta, literatura, sistemas de captación existentes y los requerimientos obtenidos durante la etapa de Escuchar se logró identificar los puntos clave a resolver tomando en cuenta el historial climatológico de la localidad para determinar si el prototipo a fabricar puede operar en cualquier época del año o bien sea en temporada de lluvias y contando con la humedad relativa superior al 60 %; se determinó que es posible diseñar un sistema que permita la captación de agua proveniente de fuentes naturales como lluvia y niebla para almacenar y abastecer los cultivos en invernaderos única y exclusivamente de autoconsumo y en una superficie dentro de los 20 m<sup>2</sup>.

En este punto, se inicia la etapa de Crear, con el desarrollo de las primeras ideas conceptuales capaces de resolver problema de la comunidad; y con el asesoramiento del director de tesis y maestros de la materia de prototipos fue posible realizar una lluvia de ideas, para ello, se realizaron bocetos rápidos de manera tradicional a papel y lápiz, dando como resultado 4 alternativas de respuesta

En la Figura 46 se muestra el primer acercamiento de concepto de diseño capaz de cumplir con el objetivo general.

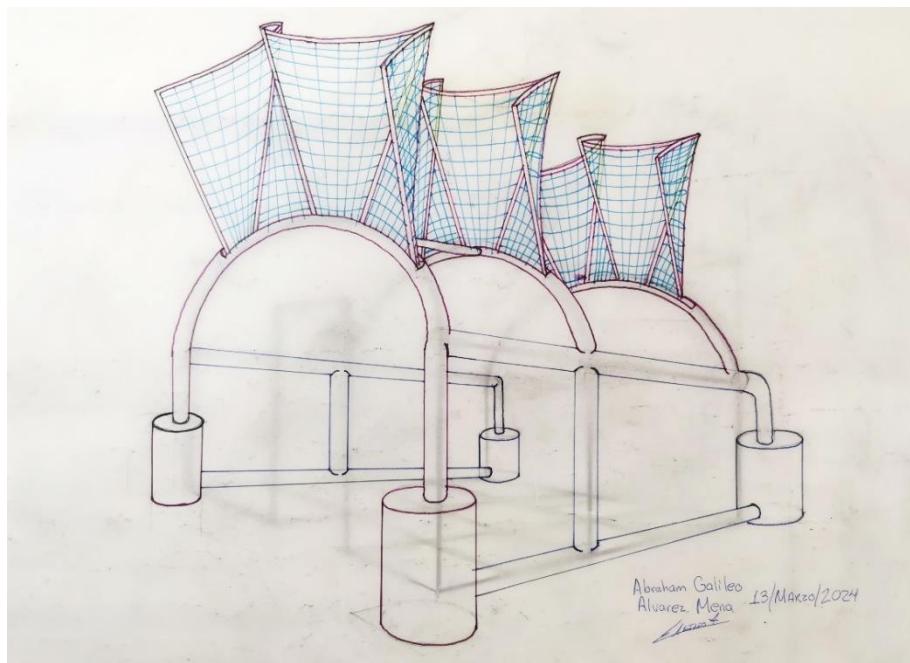


Figura 46 Propuesta conceptual No. 1 (Elaboración propia, 2024)

En la Figura 46 se implementa el sistema dual de captación de agua de lluvia y de niebla a través de la incorporación de un techo curvo conectado a tuberías de PVC hidráulico para transferir el agua captada hacia cuatro contenedores capaces de almacenar hasta 50 litros cada uno, a su vez, en la parte superior se integran tres paneles de malla Raschel que es el tipo de malla exclusivo para realizar la captación de agua de niebla tomando en cuenta la densidad de sombra que sea la más efectiva, ya sea, 30 %, 50 % o bien 80 % de cobertura.

A continuación, se muestra la Figura 47 como la segunda propuesta de diseño conceptual del sistema de captación de agua pluvial y niebla.

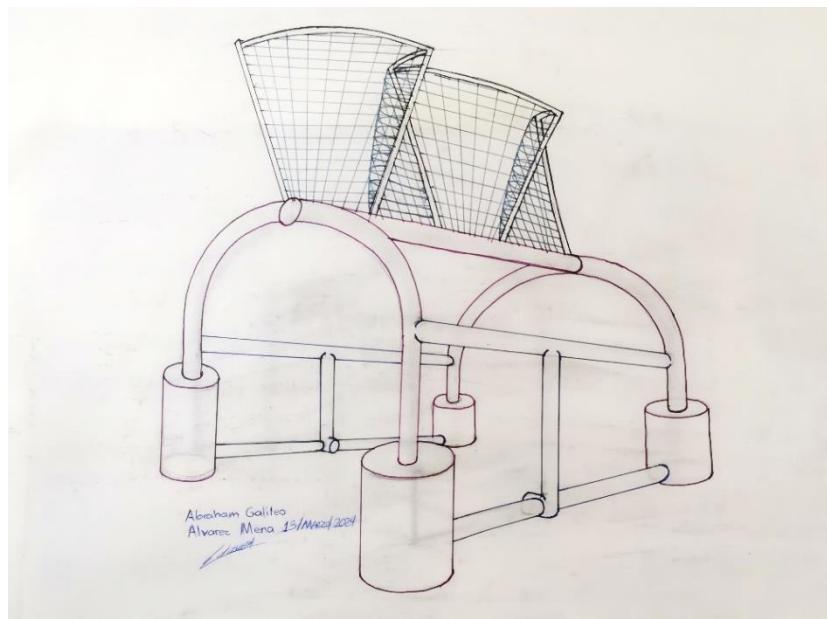


Figura 47 Propuesta conceptual No. 2 (Elaboración propia, 2024)

En la propuesta No. 2 de la Figura 47 se plantea un diseño similar al primero con la única diferencia en la colocación dirección de los paneles de malla atrapa niebla Raschel y un techo curvo conectado al sistema de tuberías de PVC hidráulico que se incorpora al sistema de riego por goteo del invernadero.

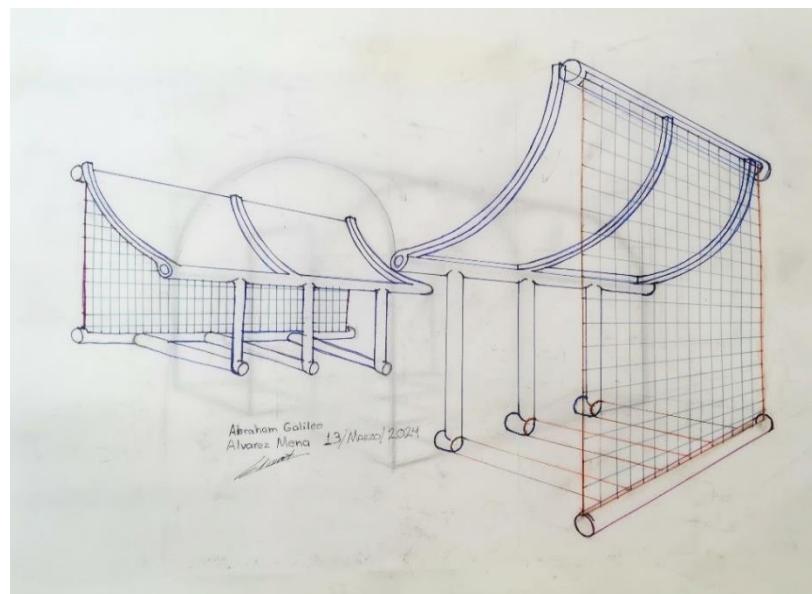


Figura 48 Propuesta conceptual No. 3 (Elaboración propia, 2024)

En la tercera propuesta conceptual de diseño se propone la implementación de un sistema combinado de captación de agua pluvial y de neblina mediante el abatimiento de dos estructuras superiores capaces de permitir la captación de agua pluvial y al mismo tiempo contendrá un rollo de malla atrapaniebla Raschel que se desglosará verticalmente desde la estructura hasta el suelo integrándose en el sistema de riego por goteo.

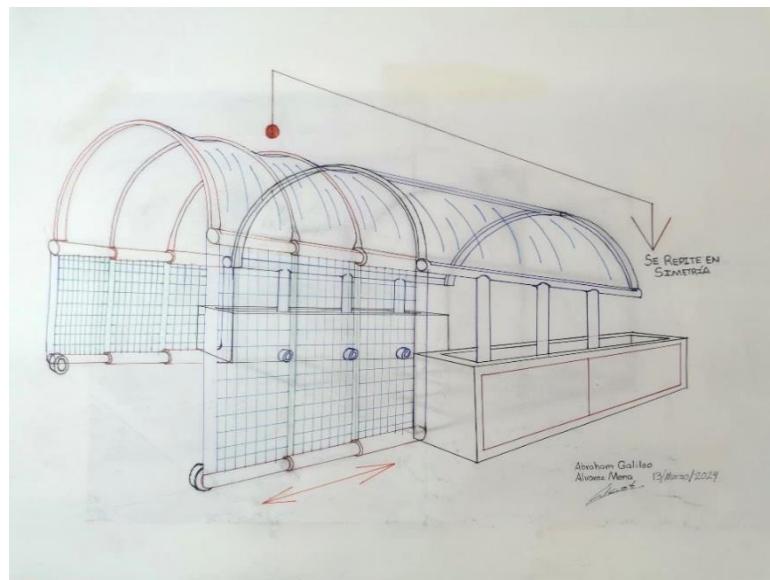


Figura 49 Propuesta conceptual No. 4 (Elaboración propia, 2024)

En la cuarta propuesta de diseño se propone un sistema de doble de captación de agua pluvial y de neblina con paneles de malla Raschel integrados a un sistema corredizo partiendo del frente y parte posterior del invernadero a la vez que se incorporan un par de sistemas de almacenamiento del agua captada para el riego por goteo dentro del invernadero.

Sin embargo, tomando en cuenta la composición y estructura de los invernaderos localizados en la comunidad; no cuentan con las características suficientes para soportar las cuatro propuestas mostradas anteriormente, por lo cual, se determinó continuar con otras variables de diseño acorde a los invernaderos existentes con los que cuentan los ejidatarios.

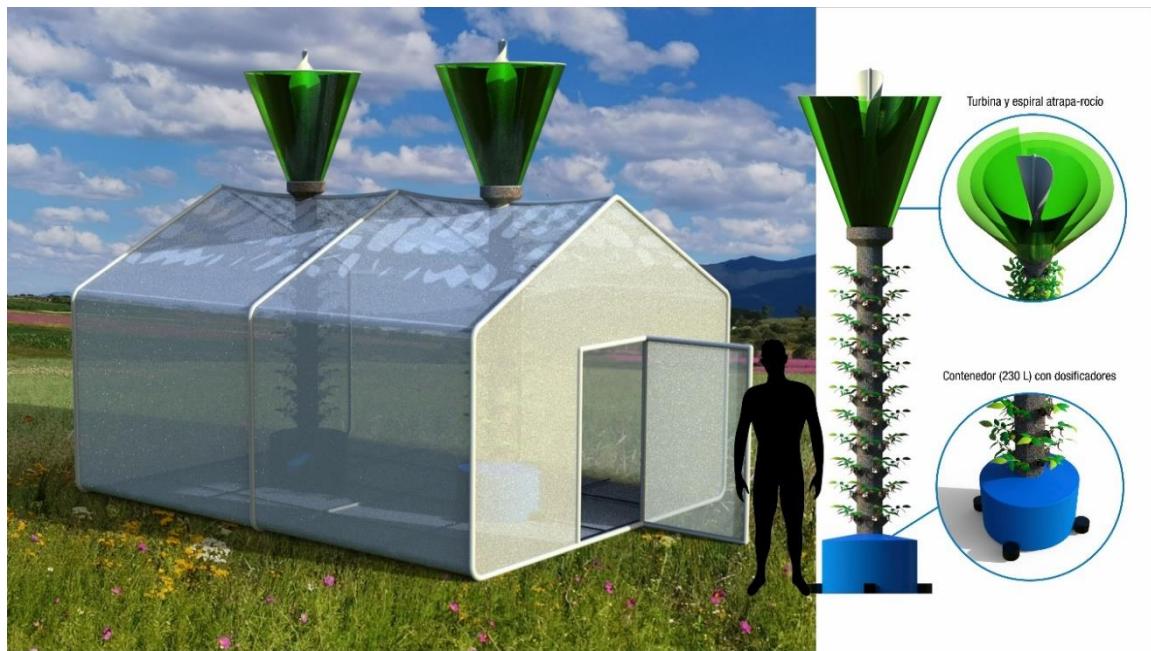


Figura 50 Propuesta conceptual No. 5 (Elaboración propia, 2024)

En la quinta propuesta de diseño se propone la integración de un cultivo hidropónico capaz de unificar dos sistemas de captación de agua: pluvial a través de la malla Raschel de forma cónica facilitando la captura de niebla y a su vez se integra una turbina con dos hélices que permitan atraer aire y condensarlo al interior de la hidroponía vertical y se almacene en el contenedor de 200 L; permitiendo el riego directo al cultivo hidropónico y el agua restante será dirigida al sistema de almacenamiento conectado a la red de riego por goteo del invernadero.

La utilización del sistema de turbina para generar agua del aire es una patente de uso internacional con altos costos de implementación y mantenimiento, por tal motivo, esta propuesta se descartó, aunque también se identificó otro fallo en la presentación de la malla Raschel en forma cónica, ya que es necesario instalar este tipo de malla Raschel de manera vertical, permitiendo el escurrimiento de la gota atrapa en esta malla.

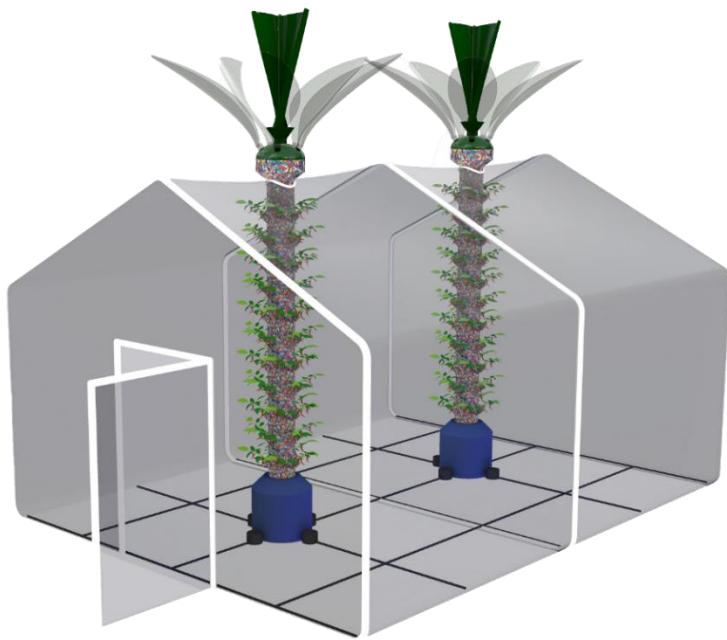


Figura 51 Propuesta conceptual No. 6 (Elaboración propia, 2024)

En la sexta propuesta conceptual se propone un diseño similar al anterior con la diferencia en que se elimina el sistema cónico de malla Raschel, se mantiene el sistema de turbinas y se integran captadores de agua pluvial en forma de hoja, haciendo biomimésis, es decir, diseño inspirado en la naturaleza ya que en su funcionamiento es capaz de atraer agua del medio ambiente en su superficie, bien conocido como rocío, generado de la humedad relativa superior al 60 %, sin embargo, esta propuesta fue descartada, ya que no es posible captar la suficiente cantidad de agua pluvial y no cuenta con la malla Raschel atrapa niebla capaz de aprovechar la humedad relativa del lugar de implementación del prototipo.

Hasta este punto se pauso el desarrollo de propuestas que se integran dentro de los invernaderos ya construidos por parte de los ejidatarios de la comunidad de “El Capulín”, puesto que, no cuentan con los materiales y estructuras soportables para estos diseños, así mismo, agregando los altos costos de fabricación e instalación, no es viable realizar las seis propuestas previas.

Se determinó que es factible y viable construir un sistema de hidroponía vertical independiente al invernadero que integre los dos sistemas de captación de agua antes vistos para evitar la pérdida de cosechas en los invernaderos, ayudando a producir nuevos alimentos de autoconsumo en este sistema que es capaz de ahorrar hasta un 70 % de agua, cuenta con un mayor rendimiento, ya que producen entre tres y diez veces más cantidad de cultivos que la agricultura en campo abierto y en la misma superficie, se evita la propagación de plagas debido a que no existe contacto con la tierra y no solo se puede implementar en campo sino también en la ciudad (Iberdrola, 2024).

A continuación, se muestran los nuevos diseños de sistemas de hidroponías verticales con captadores de agua pluvial y de niebla para alimentar los cultivos en este sistema.

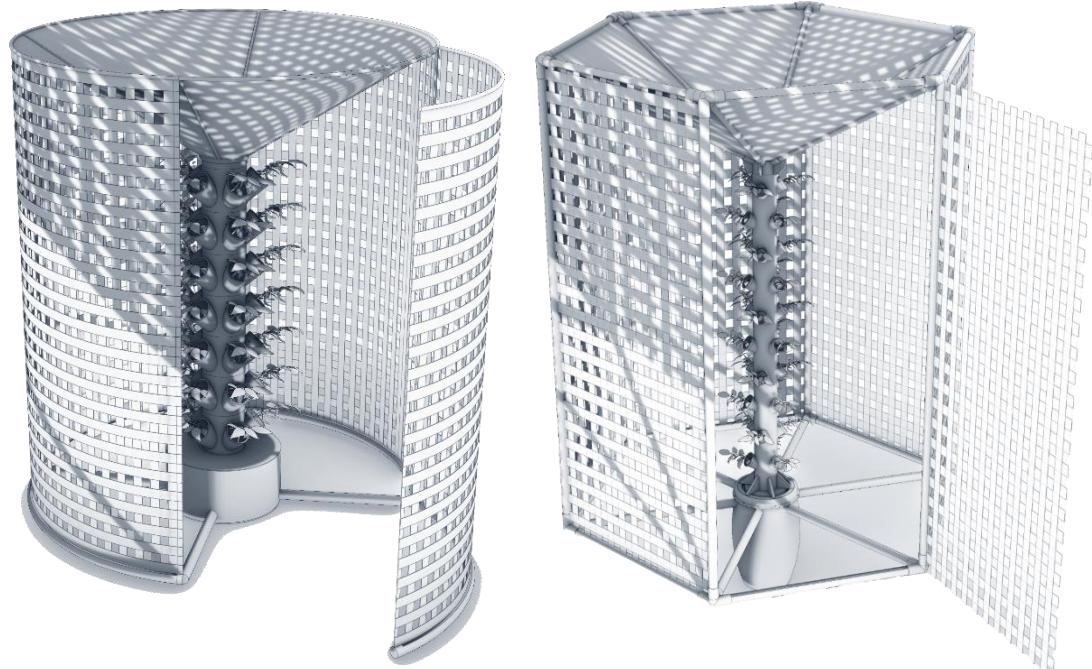


Figura 52 Diseño de un sistema de hidroponía vertical con captación de agua pluvial y de niebla (Elaboración propia,2024)

La Figura 52 muestra dos diseños de hidroponía vertical que integran un sistema dual en sinergia de captación de agua pluvial y malla atrapa niebla Raschel incorporados a un contenedor de almacenamiento de agua subterráneo con una capacidad inicial de 35 L conectados a un sistema de riego por absorción conducido, que es una técnica para mantener los cultivos hidratados, que consiste en la disposición de un material absorbente introducido por un extremo en la tierra a la altura cercana de las raíces de las plantas y por el otro en el interior de un depósito de agua, pudiendo ser varias tiras de material absorbente las que se introduzcan en el depósito de agua para alimentar el cultivo hidropónico.

Tomando en cuenta los dos últimos diseños, se selección como diseño ganador el siguiente que se muestra en la Figura 53:

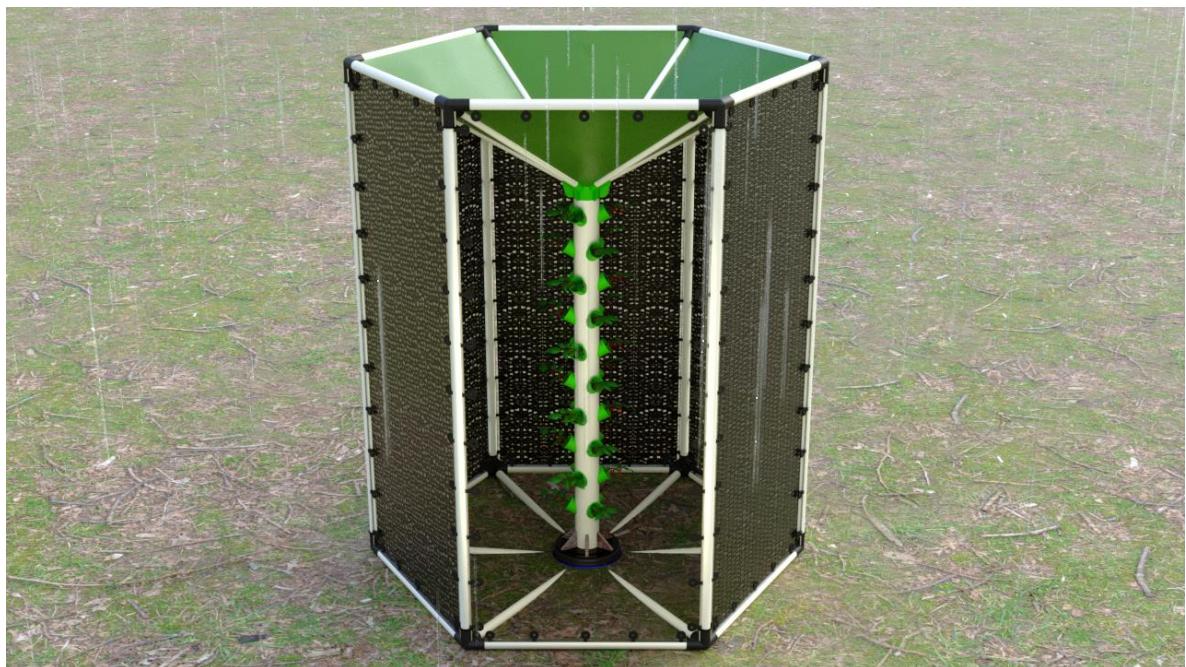


Figura 53 Diseño seleccionado (Elaboración propia, 2024)

El diseño final seleccionado incorpora lo indispensable para dar respuesta a los deseos y necesidades del usuario, ya que cuenta con un sistema de hidroponía vertical y un sistema dual de captación de agua pluvial ubicado en la parte superior del modelo 3D en forma de embudo poligonal de seis lados, permitiendo el deslizamiento del agua de lluvia hacia el

tubo central de la hidroponía y dirigiéndose al contenedor principal colocado bajo tierra para facilitar el libre tránsito dentro del mini complejo de invernadero, al mismo tiempo, se incorporan seis paneles de malla atrapa niebla Raschel con tres tipos de cobertura, al 30 %, 50 % y 80 % respectivamente, facilitando la captación de agua de niebla y permitiendo la condensación de la humedad relativa superior al 60 % y dirigiéndose al sistema de tubería inferior a través del escurrimiento directo al contenedor subterráneo. Una vez contenida la cantidad que agua disponible, esta es trasladada mediante el uso de un material absorbente conectado a la raíz de los cultivos para su posterior crecimiento, contribuyendo a evitar la pérdida de la producción agrícola de invernadero en la comunidad.

A continuación, en la Figura 54 se ejemplifica el funcionamiento del diseño seleccionado a manera de esquema:

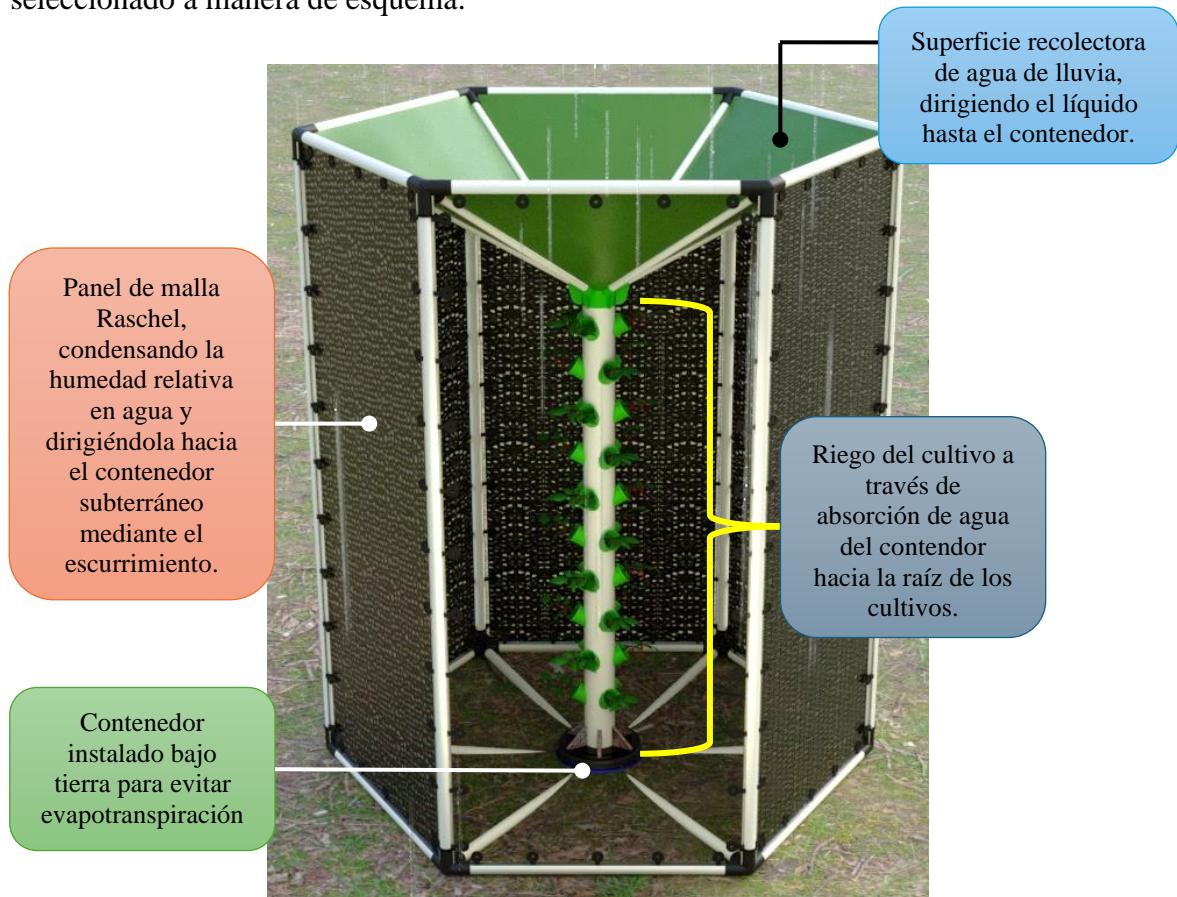


Figura 54 Esquema de funcionamiento del sistema seleccionado  
(Elaboración propia, 2024)

### 11.2.1 Etapa de experimentación previa al prototipado.

Posteriormente a la selección del diseño principal como se mostró con anterioridad, se desarrolló un proceso de experimentación para conocer estadísticamente las posibilidades de captar agua proveniente de la humedad relativa (niebla) considerando las condiciones climatológicas de lugar de estudio.

Con el objetivo de medir la captación de agua de niebla se instaló un modelo captador con las especificaciones detalladas más adelante como se muestran en la Figura 55



Figura 55 uso de materiales caseros para la fabricación del experimento (Elaboración propia, 2024)

En esta fase se inició con la búsqueda de elementos caseros para la realización de la experimentación. Se utilizó un garrafón de 21 L de marca conocida, el cual fue graduado litro por litro con el objetivo de medir el nivel de agua de la humedad relativa del medio ambiente como se muestra en la Figura 55; posteriormente se fue graduando el envase hasta cubrir los 21 L con los que cuenta el garrafón para considerar una aproximación más exacta, seguido del armado de la estructura que soportará la malla atrapa niebla Raschel.



Figura 56 Ensamble de la estructura, malla Raschel y contenedor (Elaboración propia, 2024)

En esta fase se ensambló la estructura de PVC al envase, posteriormente se dimensiona la malla atrapa niebla Raschel para cortar a la medida de la estructura y finalmente colocarla en la misma con la suficiente tensión para facilitar el escurrimiento de las partículas de agua hacia en envase como se muestra en la Figura 56.

Una vez terminado el prototipo de experimentación, se llevó al lugar de estudio para la realización de pruebas durante el mes de mayo de 2024 como se muestran en las siguiente Figura 57:



Figura 57 Instalación del prototipo experimental (Elaboración propia, 2024)

Esta fue la fase de instalación del prototipo experimental durante el mes de mayo de 2024 en la comunidad de “El Capulín”, donde se monitoreó durante un mes bajo las condiciones climatológicas de sequía severa (CONAGUA, 2024), sin embargo, tomando en cuenta el archivo histórico meteorológico de Amealco en el mes de mayo como se muestra en la Figura 58 y comparado en campo, desafortunadamente no hubo las condiciones climáticas favorables para lograr la recolección de agua de niebla en ese tiempo.

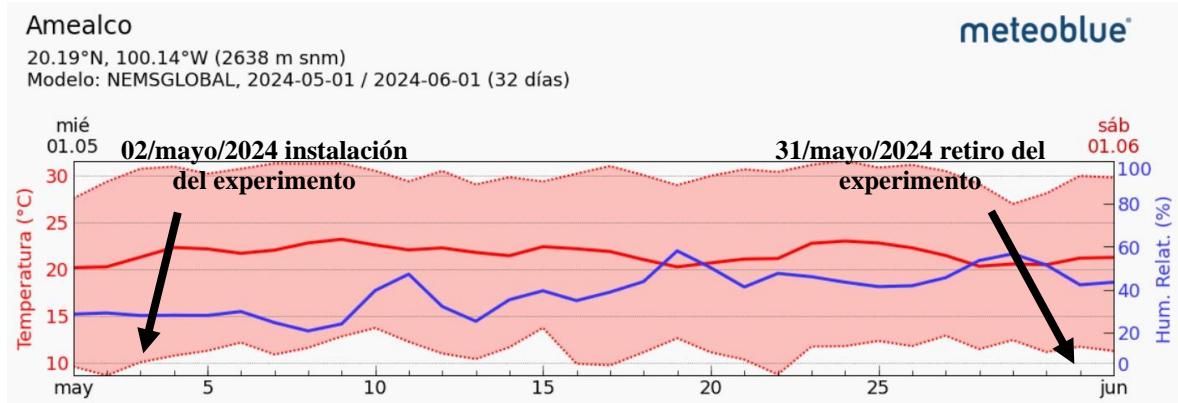


Figura 58 Histórico meteorológico de Amealco de Bonfil de Querétaro ( (Meteoblue, 2024)

### 11.2.2 Lista de materiales y costos.

A continuación, se presenta la siguiente Tabla 5 con la lista de materiales que se utilizaron para la fabricación del prototipo funcional con sus respectivos costos:

*Tabla 3 Lista de materiales y precios para la fabricación del prototipo*

IMAGEN	NOMBRE	CAPACIDAD - MEDIDAS	MARCA	PRECIO
	Malla atrapaniebla	4.5 m x 6 m Cobertura: 30, 50 y 80 %	Hortomallas	\$1050 + \$430 envío
	Lona		Plast-Tel	\$755
	Tubos PVC Sanitario	Varios	Home Depot	\$650
	Codos y Conexiones Y de PVC Sanitario	Varios	Home Depot	\$603
	Pegamento para PVC	50 ml 2 tubos	FOSET	\$160
	Tambo con tapa	35 L	Genérico	\$250
	Ojillo para malla sombra	10.5 cm x 3.8 cm		\$650

	Cono para Coladera de bote	8 x 8 x 8.5 cm 32 pzas.	COFLEX	\$288
	Tubo Grande de PVC	4" x		\$150
	Adaptadores de Acrílico con corte láser	Varios	Elaboración Propia	\$1050
	Barra de aluminio de $\frac{1}{4}$ "	Varios	Metales Díaz	\$550
	Cinchos	Varios		\$75
	Soportes de Plástico Reciclado	Varios	Material: Triplamex, Elaboración Propia	\$250
			<b>TOTAL:</b>	<b>\$ 6911 MXN</b>

Una vez adquiridos los materiales necesarios durante esta etapa de Crear, se inició la etapa de Entregar, donde se materializó el prototipo funcional en el lugar de implementación, para monitorear y validar la función y la operación del mismo en un periodo de junio a agosto de 2024.

En conclusión, se logró cumplir con reto de diseñar un sistema que permita la captación de agua proveniente de fuentes naturales para los invernaderos de hidroponía vertical.

### 11.3 Resultados de la etapa de *Entregar*

En esta etapa se realizó el armado del prototipo funcional para su implementación en el lugar de estudio como se muestran en la Figura 59:



Figura 59 Armado del prototipo funcional (Elaboración propia, 2024)

En la Figura 59 se muestra el armado del prototipo que fue instalado en la comunidad de “El Capulín” en Amealco de Bonfil. Se utilizó tornillería convencional, uso exclusivo de maquinaria propia de corte láser para piezas de acrílico de espesor de 6 mm de soporte para dar mayor resistencia a los componentes que sostienen la malla atrapa niebla Raschel.

Se ancló el tubo principal de hidroponía vertical a la tapa del contenedor para mantener la verticalidad del sistema y darle soporte, así mismo, el contenedor fue barrenado para insertar los tubos de PVC que alimentarán este mismo con la recolección de agua de lluvia y de niebla para alimentar al cultivo colocado en el tubo principal.



Figura 60 Instalación del prototipo en el lugar de estudio (Elaboración propia, 2024)

En la figura 60 se muestra la instalación del primer prototipo funcional de captación de agua de lluvia y niebla, instalado el día sábado 18 de junio de 2024.

Durante la instalación del prototipo, se realizó primeramente la excavación del contenedor de 35 L quedando sellado con el tubo principal de la hidroponía vertical, posteriormente, se fueron colocando los tubos de PVC que conectan al contenedor para después colocar el PVC vertical de soporte y unirlo con travesaños al tubo de PVC principal de la hidroponía, en seguida se instalaron los panales de malla atrapa niebla Raschel con la mayor tensión posible y de forma vertical a 90° con la ayuda de los broches sujetadores especiales conectados a dos varillas de aluminio de  $\frac{1}{4}''$  de  $\varnothing$ .

A lo largo de las pruebas y monitoreo, se logró captar el 100 % de agua pluvial y niebla en el contenedor de 35 litros de capacidad, debido a que hubo fuertes lluvias en el lugar de estudio en las fechas del 20 de junio de 2024 al 22 de junio de 2024, con un

volumen de precipitación durante esas fechas de 52 mm (Meteoblue, 2024), equivalente a 52 litros; como se muestra en la figura 61 del reporte del histórico meteorológico de Amealco de Bonfil; donde la línea azul continua representa el porcentaje de humedad relativa, la línea roja la temperatura y las barras azules indican el volumen de precipitación

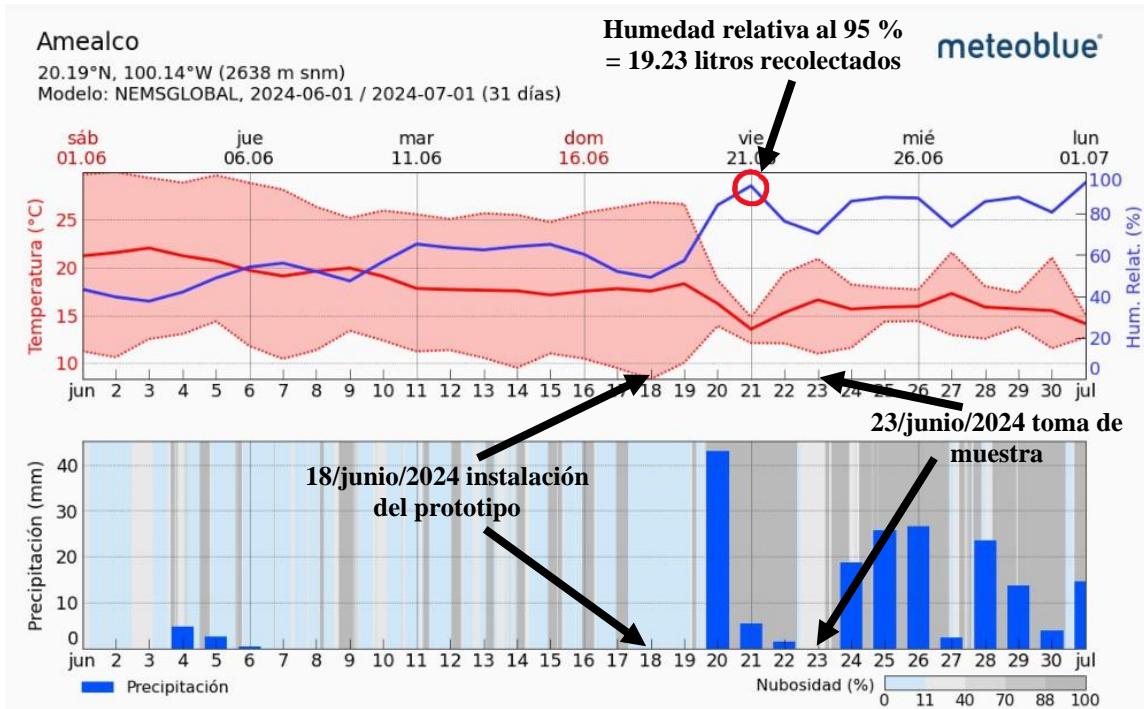


Figura 61 Histórico meteorológico de Amealco de Bonfil (Meteoblue, 2024)

en mm.

A continuación, en la Figura 62 se muestra el contenedor al 100 % de su capacidad tomando en cuenta las fechas con respecto al histórico meteorológico de Amealco de Bonfil.



Figura 62 Muestra de captación de agua de lluvia y niebla  
23 de junio de 2024 (Elaboración propia, 2024)

### 11.3.1 Etapa de ajustes del prototipo

En esta etapa de se identificaron diversos fallos durante la etapa de operación del prototipo, los cuales fueron derrumbes del prototipo debido a los fuertes vientos y golpes de grandes gotas de lluvia que desestabilizaron la estructura del sistema.

Estos sucesos fueron registrados el día domingo 26 de junio de 2024, por tal motivo, se retiró el prototipo para analizar los componentes dañados y validar la utilidad de los componentes intactos.

Los puntos específicos débiles que se identificaron fueron los conectores estructurales principales, ya que fueron hechos con impresión 3D de plástico PLA y no soportaron las fuerzas de la naturaleza y fueron reemplazados por componentes industriales modificados, como se muestra en la Figura 63.



Figura 63 Rediseño de los conectores principales (Elaboración propia, 2024)

Durante el proceso de construcción del prototipo, éste estuvo a prueba con las fuerzas de la naturaleza y durante una fuerte tormenta se identificó que los conectores principales de la estructura no tenían suficiente resistencia, por tal motivo, se diseñó un modelo especial de conector con los mismos materiales de PVC, dando como resultado una estructura más fuerte y estable.

En la siguiente Figura 64 se realiza la reinstalación de la segunda versión con las modificaciones pertinentes acorde a los fallos detectados en la primera versión del prototipo.



Figura 64 Reinstalación de la segunda versión del prototipo (Elaboración propia, 2024)

En la Figura 64 se muestra la colocación de la malla atrapa niebla Raschel al 50 % de cobertura en cada panel vertical del sistema poligonal de la hidroponía vertical.

En la siguiente Figura 65 de muestra la instalación de lona y macetas en el tubo principal de hidroponía vertical.



Figura 65 Instalación del sistema de captación de agua pluvial (Elaboración propia, 2024)

Para la instalación de la lona se dividió en seis partes triangulares que conectaron no los travesaños de los paneles de la malla atrapa niebla Raschel y con el conector central superior del tubo principal de la hidroponía, con el objetivo de canalizar toda el agua pluvial de la superficie de la lona en contacto hacia el contenedor subterráneo. En la siguiente Figura 66 se muestra la segunda versión del prototipo ya instalado al 100 %.



Figura 66 instalación final de la segunda versión del prototipo  
(elaboración propia, 2024)

El presente estudio confirma que la implementación de un sistema dual de captación de agua pluvial y de niebla, en combinación con tecnologías de hidroponía vertical, representa una solución alternativa para mitigar la escasez de agua en áreas agrícolas vulnerables como en la comunidad de “El Capulín” en Amealco de Bonfil del Estado de Querétaro. Sin embargo, el estudio señala áreas de mejora, en particular la necesidad de aumentar la capacidad de almacenamiento de agua y dar seguimiento a los tipos de cultivos que pueden ser producidos en este sistema.

Teniendo en cuenta los resultados, fue necesario realizar una tercera versión del prototipo con un nuevo diseño para cubrir mayor cantidad de área y recolectar la mayor cantidad de agua proveniente del medio ambiente, por lo tanto, en la siguiente etapa de Entregar se planteó un nuevo sistema que se mostrará a continuación.

### 11.3.2 Tercer versión del prototipo para UAQ Campus Amealco

En la siguiente Figura 67 se muestra el Campus Amealco donde fue instalado el tercer prototipo para alumnos, profesores y campesinos de la región.



Figura 67 Campus Amealco de la Universidad Autónoma de Querétaro  
(Noticias de Querétaro, 2022)

Como parte de la asignatura de Estancia se realizó una vinculación con el Campus Amealco de la Universidad Autónoma de Querétaro y se llevó a cabo una conferencia organizada por la Facultad de Ingeniería del mismo Campus como parte del programa de Cultura Verde de la Facultad; presentado el proyecto ante el alumnado, profesorado, así mismo, se contó con la presencia de productores campesinos de Amealco el día 25 de octubre de 2024 como se muestra en la Figura 68.

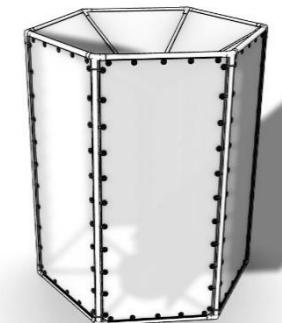


Figura 68 Conferencia en la Facultad de Ingeniería del Campus Amealco  
(Elaboración propia, 2024)

Durante la presentación se expuso el objetivo del proyecto, los alcances y ventajas del mismo, así como, los costos iniciales, la temporalidad de uso del sistema. La percepción de la audiencia fue positiva, pues algunos de los productores quedaron satisfechos, esperando regresar para los resultados y conclusiones del proyecto, sin embargo, otra parte de la audiencia no comprendió del todo el funcionamiento o bien no fue resiliente a este tipo de tecnología propuesta. El hecho es que los resultados de la conferencia fueron satisfactorios para concretar el proyecto con la versión final del prototipo y realizar todas las mejoras, con el objetivo de cubrir mayor cantidad de área de recolección de agua pluvial y de niebla, y la implementación de diversas plantas de consumo, cultivadas por alumnos, profesores y campesinos de la región del Campus de Amealco, contribuyendo a un mejor estudio en la calidad de los alimentos producidos en este nuevo sistema que tiene nuevas mejoras y nuevo diseño en comparación con el anterior ya mostrado.

En la siguiente Tabla 4 se realizó una comparativa de las métricas y volúmenes de captación de agua pluvial y de niebla para validar cual diseño es factible para instalar en el Campus Amealco, y estos fueron los resultados:

*Tabla 4 Comparativa de rendimiento de la versión 2 vs versión 3 del sistema de captación de agua pluvial y de niebla.*

<b>Comparativa de la capacidad de captación de agua pluvial y de niebla para ambos diseños.</b>	
<b>Diseño Hexagonal (Versión 2)</b>	<b>Diseño Cuadrangular (Versión 3)</b>
	21 litros x día con una precipitación pluvial de 110 mm
	32 litros x día de captación de niebla al 70 % de humedad relativa.
	53 litros captados por día en conjunto
	18.8 litros x día con una precipitación pluvial de 110 mm
	48 litros x día de captación de niebla al 70 % de humedad relativa.
	66.8 litros captados por día en conjunto.

Con base en el nuevo estudio y con nuevos datos que indican que la eficiencia promedio de captación en una malla Raschel registrada en una investigación realizada en la localidad de La Palma, situada en la Sierra Norte del Perú, a una altitud superior a los 2800 metros sobre el nivel del mar fue de 1.77 L/m<sup>2</sup>/día; durante un periodo de 92 días, comprendido entre noviembre de 2018 y enero de 2019 (Vásquez Ramírez, Cieza León , & Cieza León , 2020); se reconfiguró el sistema de captación agua pluvial y de niebla como se muestra en la Figura 69 y sus especificaciones técnicas como parte del protocolo de ensayo del prototipo final.

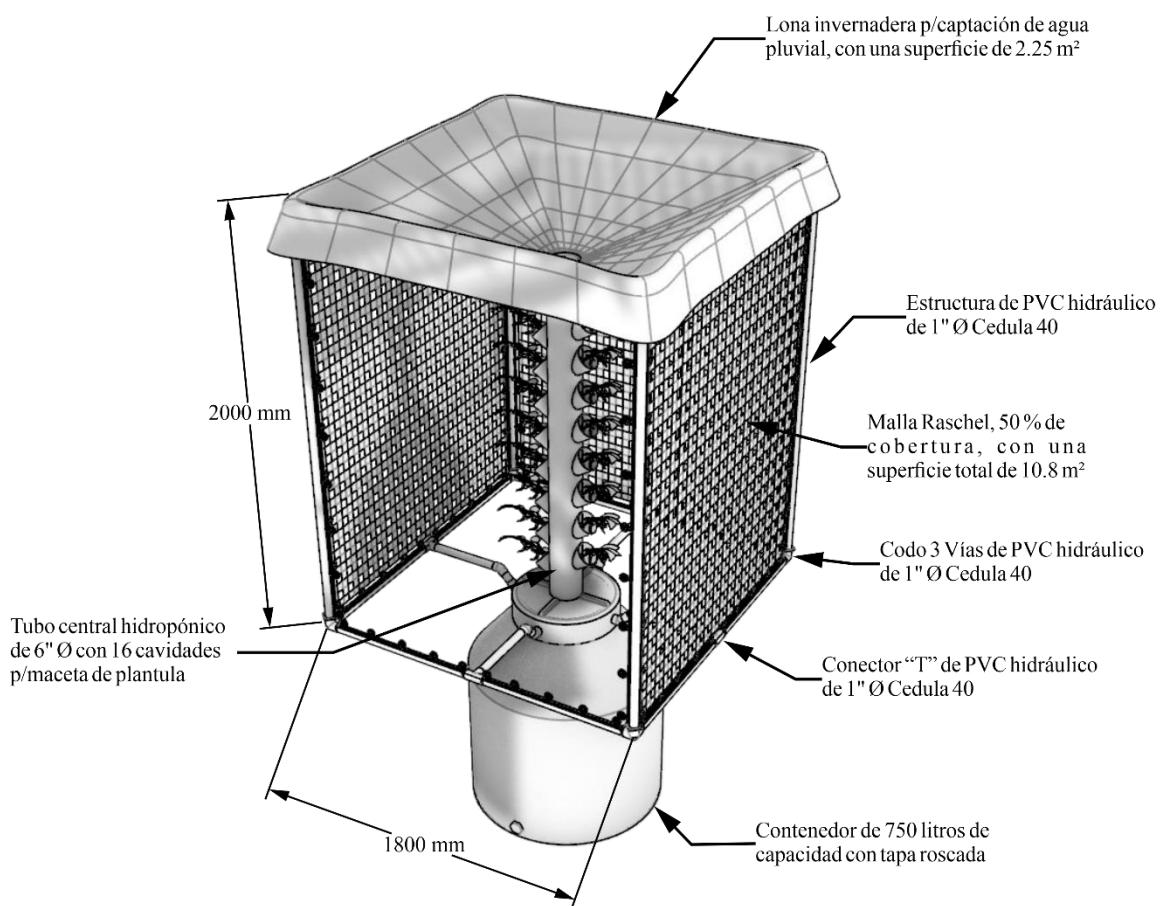


Figura 69 Especificaciones Técnicas de la versión 3 del prototipo final (Elaboración propia, 2025)

### 11.3.3 Reinstalación de la versión 3 del prototipo

Se realizó la instalación de la versión final del sistema de captación de agua pluvial y de niebla en la Facultad de Ingeniería del Campus de Amealco, realizando la excavación para la colocación del contenedor, que permitirá almacenar el agua recolectada como se muestra en la Figura 70.



Figura 70 Excavación y colocación del sistema de almacenamiento (Elaboración propia)

Posteriormente se colocó el sistema de hidroponía vertical como se muestra en la Figura 71, ya con las cavidades para la integración de las 16 macetas de plántula de espinaca para las pruebas de validación del funcionamiento del sistema.



Figura 71 Instalación del sistema de hidroponía vertical (Elaboración propia, 2025)

Se procedió con el armado de la estructura de PVC Hidráulico Cedula 40, que soportará ambos sistemas de captación de agua pluvial y niebla como se muestra en Figura 72.



Figura 72 Estructuración del sistema (Elaboración propia, 2025)

A continuación, se realizó la integración de ambos sistemas de captación de agua, tanto el pluvial como el de niebla como se muestra en la Figura 73. Se integró 4 paneles de malla Raschel al 50 % de cobertura con superficie total de 10.8 m<sup>2</sup>, utilizando broches especiales para su sujeción, posteriormente se conectó por la parte de arriba de la hidroponía vertical el sistema de captación de agua de lluvia, utilizando lona de invernadero con una superficie total 2.25 m<sup>2</sup>.



Figura 73 Instalación de mallas Raschel y captador pluvial  
(Elaboración propia, 2024)

Finalmente, se incorpora una mini bomba sumergible capaz de realizar la irrigación del cultivo hidropónico conectado a un sistema electrónico que automatiza su encendido que se activa justo en el momento que un sensor detecta un índice de humedad bajo, aunado a esto se integra en el mismo sistema electrónico un lector led que mide los niveles de agua que hay en el interior del sistema de almacenamiento, con el objetivo de prever que el

contenedor disponga del agua requerida para el cultivo hidropónico; todo este sistema funciona en sinergia gracias a un panel solar de 10 W de potencia y una batería de 12 V de salida, siendo suficiente voltaje para activar la mini bomba que consume 12 V, puesto que, muchas de las comunidades de Amealco no cuentan con energía eléctrica.

En la Figura 74 se muestran los componentes principales para la medición e irrigación del sistema de captación de agua del cultivo hidropónico.

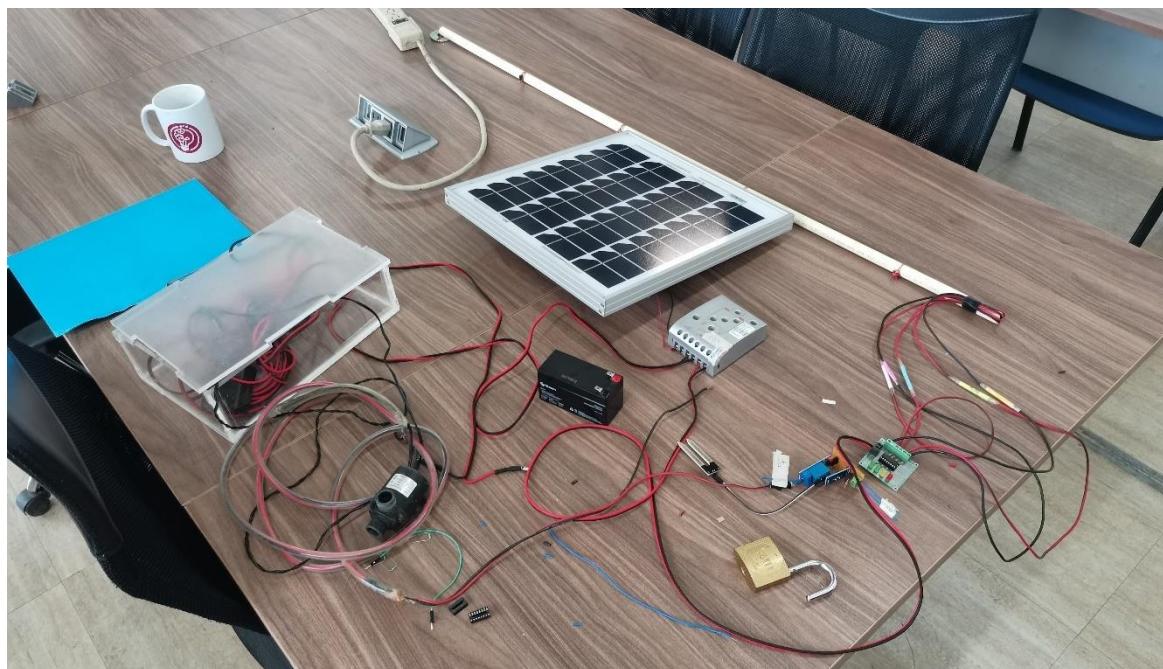


Figura 74 Sistema de medición de nivel de agua y automatización del riego hidropónico  
(Elaboración propia, 2024)

En la Figura 75 se muestra el sistema completo al 100 % instalado en Campus de Amealco para realizar la validación de funcionamiento. El sistema quedó instalado y operando el miércoles 11 de diciembre de 2024, sin embargo, durante el periodo de noviembre a mayo se registran los menores o nulos niveles de precipitación y humedad relativa en el municipio de Amealco de Bonfil, algo que retrasó la optima validación del sistema, sino hasta febrero que se registraron algunos niveles de captación.



Figura 75 Sistema de captación de agua pluvial y de niebla para el riego en hidroponía vertical (Elaboración propia, 2024)

#### **11.3.4 Pruebas y validación del sistema de captación de agua del cultivo hidropónico**

En esta etapa se realizaron todas las pruebas de funcionalidad; tanto de resistencia, monitoreo y medición de captación de agua pluvial y de niebla, con base en los registros del histórico meteorológico y en tiempo real, así como el correcto funcionamiento del cordón hidropónico y la mini bomba.

Con el objetivo de validar el sistema de mallas Raschel de atrapa niebla, se independizó un panel de malla Raschel con 50 % de cobertura; el panel se conectó a un

contenedor de 5 litros de capacidad como se muestra en la Figura 76. Esta actividad se realizó el 14 de febrero de 2025.



Figura 76 Prueba de validación de captación de agua de niebla  
(Elaboración propia, 2025)

La prueba de validación fue monitoreada diariamente, en un rango de 11 días, sin embargo, se logró obtener una muestra satisfactoria de 1.159 litros recolectados con relación al histórico meteorológico y en tiempo real; la muestra se realizó el 25 de febrero de 2025 y midió utilizando una probeta graduada como se muestra en la Figura 77, de igual manera, se realizó la validación del sistema de captación de agua pluvial y para esto se introdujo una barra de metal graduado para medir el nivel de agua recuperada en el sistema de almacenamiento desde el 11 de diciembre de 2024 hasta el 31 de marzo de 2025, durante este periodo se logró registrar un nivel de captación de agua pluvial de 49.77 litros como se muestra en la Figura 76 en relación al histórico meteorológico de Amealco de Bonfil que más adelante se comprueba.



Figura 77 Toma de muestras de captación pluvial y de niebla (Elaboración propia, 2025)

En la Figura 79 se muestra la validación de la captación de agua pluvial y de niebla, desde el 11 de diciembre de 2024 hasta el 31 de marzo de 2025, en relación nuevamente al histórico meteorológico de Amealco de Bonfil en tiempo real.

Para facilitar el entendimiento de las gráficas, el apartado de líneas azules y rojas indican los valores de humedad relativa y temperatura y el apartado de barras azules indican los niveles de precipitación medidos en mm como se muestra en la Figura 78. En la primera gráfica la línea azul representa los niveles de humedad relativa registrados, día por día a lo largo de un mes, la línea roja representa los niveles de temperatura del municipio, de igual manera día tras día durante un mes.

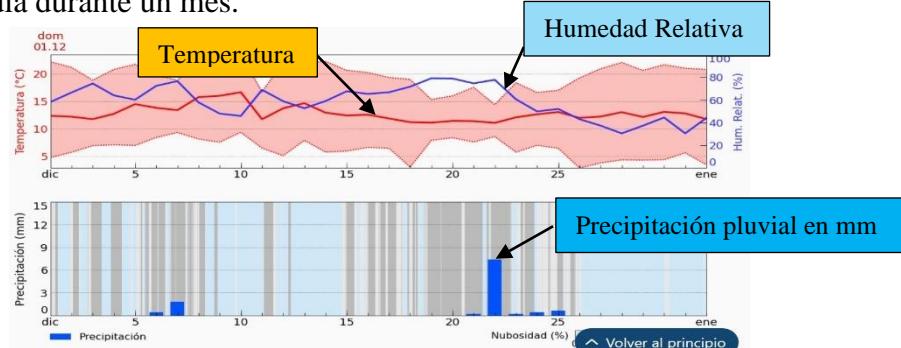


Figura 78 Ejemplo de interpretación de la grafica (Meteoblue, 2024)

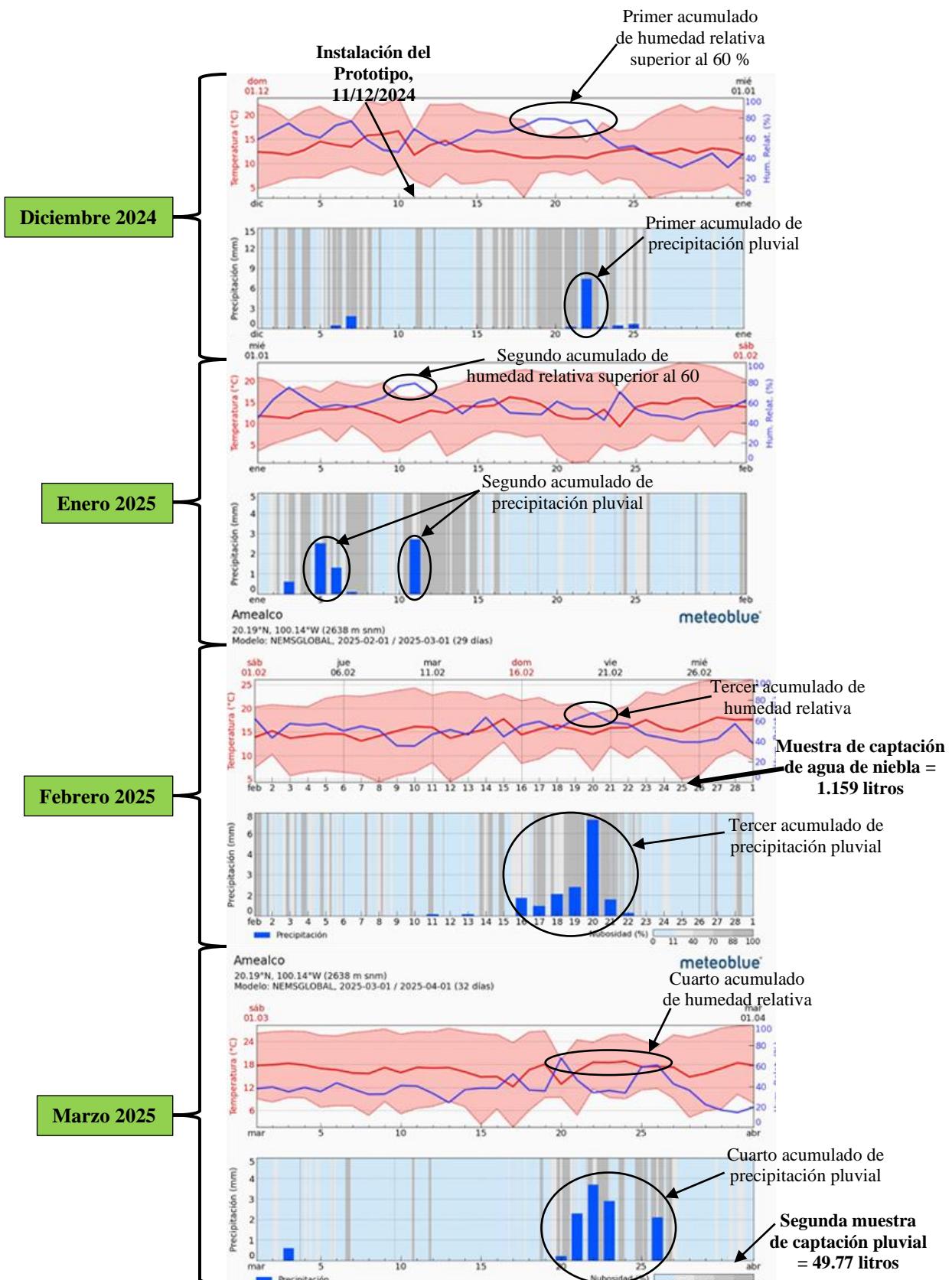


Figura 79 Histórico meteorológico de Amealco 2024 2025 (Meteoblue, 2024)

### 11.3.5 Análisis de viabilidad del sistema de captación de agua del cultivo hidropónico

En la Figura 80 se muestra un mapa conceptual de la viabilidad del prototipo, tomando como cultivo de análisis la producción de jitomate cherry.

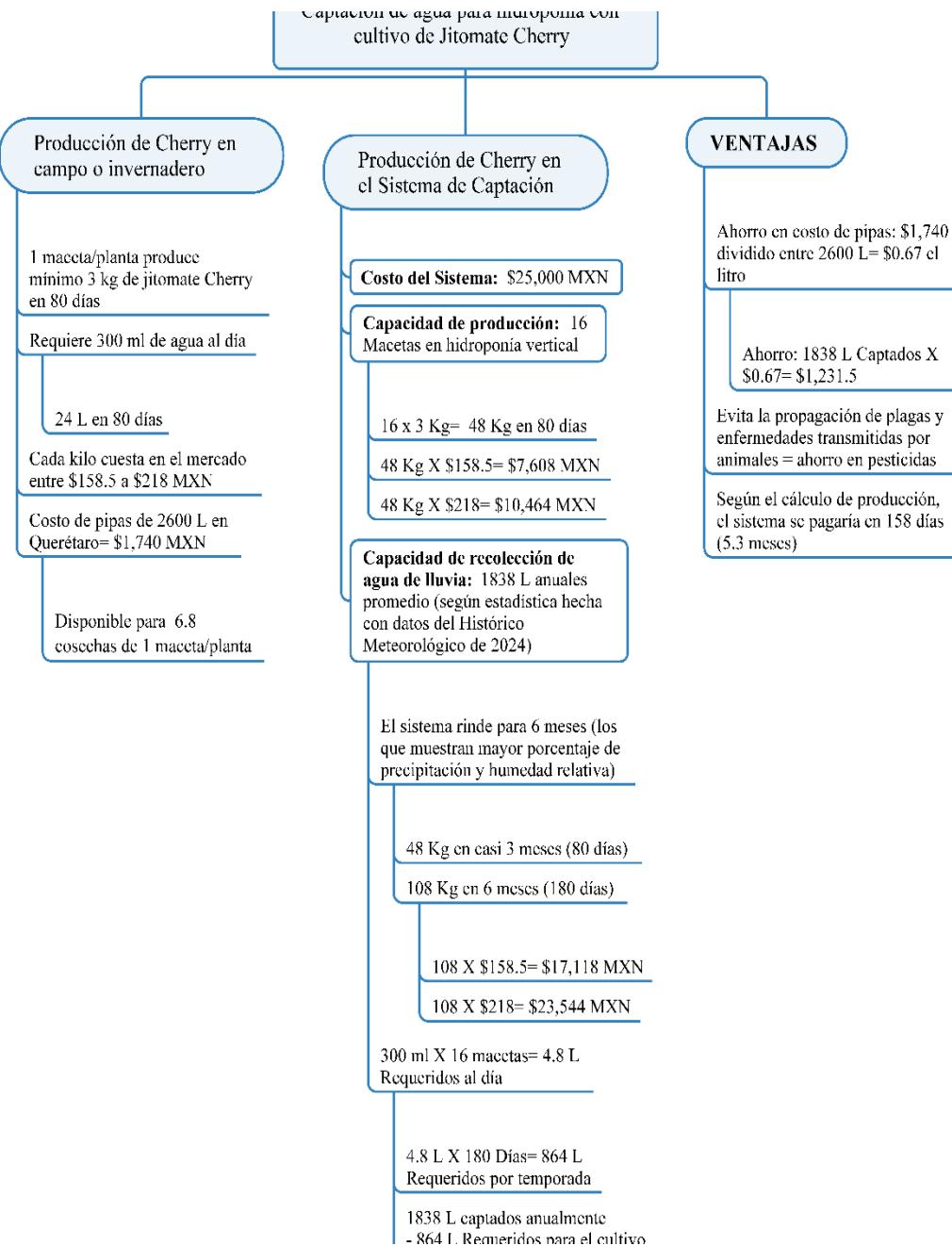


Figura 80 Análisis de viabilidad (Elaboración propia, 2024)

### 11.3.6 Análisis de viabilidad del sistema de captación de agua del cultivo hidropónico

En las Tablas 5 y 6 se muestran el cálculo de volumen de captación de agua pluvial y de niebla en los meses que registran mayor nivel en relación con el histórico meteorológico de Amealco y el volumen captado por el sistema propuesto.

Tabla 5 Cálculo de volumen de captación de agua pluvial por temporada

EQUIVALENCIA					
1 MM = 1 LITRO X M <sup>2</sup>					
Volúmenes de captación de agua de lluvia por mes del 2024 y pronóstico 2025 en Amealco de Bonfil					
AÑO		2024		2025	
MES	Volumen de precipitación en mm	Litros Recolectados x 2.25m <sup>2</sup>	Volumen de precipitación en mm	Litros Recolectados x 2.25m <sup>2</sup>	
ENERO	2.25	5.0625	7.3	16.425	
FEBRERO	9.4	21.15	17.15	38.5875	
MARZO	0.25	0.5625	11	24.75	
ABRIL	20.75	46.6875	0	0	
MAYO	36.5	82.125	54	121.5	
JUNIO	190	427.5	0	0	
JULIO	309	695.25	0	0	
AGOSTO	54.25	122.0625	0	0	
SEPTIEMBRE	173.5	390.375	0	0	
OCTUBRE	7.375	16.59375	0	0	
NOVIEMBRE	0.9	2.025	0	0	
DICIEMBRE	12.75	28.6875	0	0	
<b>TOTAL ANUAL</b>	<b>816.925</b>	<b>1838.08</b>	<b>89.45</b>	<b>201.2625</b>	

Tabla 6 Cálculo de volumen de captación de agua de niebla en tiempo real

EQUIVALENCIA				
1 M <sup>2</sup> de malla al 100% de Humedad Relativa = 1.875 L				
Volúmenes de captación de agua de niebla por mes del 2024 y pronóstico 2025 en Amealco de Bonfil				
AÑO	2024		2025	
MES	Porcentaje de humedad relativa total	Litros Recolectados x 10.8m <sup>2</sup>	Porcentaje de humedad relativa total	Litros Recolectados x 10.8m <sup>2</sup>
ENERO	0.43	8.7075	0.56	11.34
FEBRERO	0.44	8.91	0.53	10.7325
MARZO	0.35	7.0875	0.49	9.9225
ABRIL	0.38	7.695	0.43	8.7075
MAYO	0.39	7.8975	0.52	10.53
JUNIO	<u>0.7</u>	<u>14.175</u>	<u>0.68</u>	<u>13.77</u>
JULIO	<u>0.88</u>	<u>17.82</u>	<u>0.77</u>	<u>15.5925</u>
AGOSTO	<u>0.82</u>	<u>16.605</u>	<u>0.77</u>	<u>15.5925</u>
SEPTIEMBRE	<u>0.87</u>	<u>17.6175</u>	<u>0.79</u>	<u>15.9975</u>
OCTUBRE	<u>0.82</u>	<u>16.605</u>	<u>0.74</u>	<u>14.985</u>
NOVIEMBRE	<u>0.63</u>	<u>12.7575</u>	<u>0.68</u>	<u>13.77</u>
DICIEMBRE	<u>0.61</u>	<u>12.3525</u>	<u>0.59</u>	<u>11.9475</u>
<b>TOTAL ANUAL</b>	<b>7.32</b>	<b>148.23</b>	<b>7.55</b>	<b>152.9</b>

**Interpretación:** En la Tabla 5 se marca con verde los meses con el mayor nivel de precipitación de agua durante el 2024, teniendo en cuenta que los únicos meses favorables son de abril a octubre, sin embargo, este indicador no es un absoluto, puesto que debido al calentamiento global estos datos se verían afectados significativamente, sin mencionar, que

el nivel de precipitación fluya directamente sobre el municipio de Amealco de Bonfil y no en otra localidad.

En la Tabla 6, de igual manera se marca con verde los posibles meses de mayor índice de humedad relativa superior al 60 %, todo indica que los meses de junio a octubre de 2024 son los más favorables para realizar la captación de agua de niebla, sin embargo, no es definitivo, debido a que dicha humedad relativa se presente directamente sobre el municipio de Amealco de Bonfil y no en otra localidad.

## **XII Discusión**

Los resultados obtenidos en el diseño del sistema de captación y abastecimiento de agua pluvial y niebla para el riego de cultivos hidropónicos verticales en Amealco de Bonfil demuestran la viabilidad técnica de integrar fuentes naturales de agua en entornos rurales con acceso limitado al recurso hídrico e incluso se demuestra que es perfectamente replicable en regiones que cuenten con los índices de humedad relativa entre el 70 y el 100 % como lo menciona (Olivas, Salinas, & Villa , 2023). A partir del análisis climatológico de la zona, se identificó que Amealco presenta un régimen de precipitación posiblemente estacional, con concentraciones de lluvia significativas entre los meses de junio a octubre, lo que permitió dimensionar un sistema de captación pluvial eficiente, capaz de almacenar hasta 1838 litros por temporada.

En cuanto a la captación de niebla, el empleo de mallas atrapanieblas tipo raschel al 50 % de cobertura mostró un desempeño aceptable en condiciones de humedad relativa superiores al 70% frente a la malla de 80 % de cobertura, registrando una eficiencia promedio de recolección de 1.875 L/m<sup>2</sup>/día, similar a lo reportado por (Vásquez Ramírez, Cieza León , & Cieza León , 2020) en zonas altoandinas del Perú. Aunque la niebla no representa un volumen significativo en comparación con la lluvia, su captación complementaria resulta estratégica durante la temporada seca, permitiendo extender la disponibilidad de agua para el sistema hidropónico.

En cuanto al uso del cordón hidropónico como método de irrigación para el sistema hidropónico vertical, resulta altamente eficiente, ya que solo se requiere como mínimo 5 minutos de transferencia para hidratar la plántula al 100 %, con una vida útil de 3 a 12 meses dependiendo del uso y condiciones ambientales.

En conclusión, el sistema diseñado constituye una alternativa sustentable y de bajo costo para la producción agrícola en zonas rurales de Querétaro, promoviendo el aprovechamiento de recursos naturales locales y reduciendo la dependencia de fuentes hídricas tradicionales. Esta propuesta puede ser replicada en otras regiones con condiciones agroclimáticas similares, contribuyendo a la resiliencia hídrica y alimentaria de comunidades rurales.

### **XIII Conclusiones**

El presente proyecto permitió demostrar que el diseño del sistema híbrido de captación de agua pluvial y niebla como fuente alternativa para el riego de cultivos hidropónicos verticales en la región de Amealco de Bonfil, Querétaro es viable técnicamente, sin embargo, es perfectible, ya que durante el proceso de construcción se identificaron componentes y materiales plásticos que pueden ser perfectamente remplazados por material metálico, aunque realizar estas modificaciones, se elevarían significativamente los costos, tanto de venta al usuario como el proceso de fabricación. A través del análisis de datos climatológicos locales, se comprobó que la combinación de estos dos métodos de captación de agua es capaz de abastecer la demanda hídrica de una unidad productiva de hidroponía en condiciones semiáridas y de acceso limitado a fuentes tradicionales de agua, no obstante, depende altamente de las condiciones climatológicas y sobre todo del agua pluvial de temporada, puesto que, fue el método de captación que registró mayor recuperación de agua en contraste con el método de captación de agua de niebla que requiere un análisis más preciso de colocación del sistema, aunque contribuye de manera complementaria durante

los periodos de estiaje maximizando el sistema en conjunto, de igual manera, está demostrado por (Vásquez Ramírez, Cieza León , & Cieza León , 2020) que la integración de una malla metálica realiza mayor captación de agua de niebla que la malla Raschel de cualquier cobertura, a pesar de ello, sigue siendo una implementación de alto costo que evitaría su compra por parte de los productores de hortalizas y campesinos de la comunidad de Amealco de Bonfil.

### **XIII Referencias bibliográficas**

- 2030 Palette. (2025). *Agua: Captación y Almacenamiento*. Obtenido de 2030 Palette: <https://2030palette.org/agua-captacion-y-almacenamiento/?lang=es>
- Abouthaus. (2025). Obtenido de Beneficios Energéticos de Construir un Casa con Invernadero Adosado: <https://about-haus.com/casa-con-invernadero/>
- Aguilar Sánchez, G., & Lara Aguazul, C. (2021). Recursos naturales y desarrollo en Amealco, Querétaro. *unam.mx*, 16.
- AQUAE FUNDACIÓN. (2021). *Causas de la escasez de agua en el mundo*. Obtenido de <https://www.fundacionaqua.org/wiki/escasez-de-agua-en-el-mundo-naciones-unidas-advierte-que-la-demanda-crecerá-hasta-un-30-por-ciento-en-2050/#:~:text=El%20agua%20en%20agricultura%20es%20utilizada%20para%20el%20riesgo>.
- AQUAE FUNDACIÓN. (24 de Agosto de 2021). *Cómo evitar las sequías con un atrapanieblas*. Obtenido de <https://www.fundacionaqua.org/wiki/atrapanieblas/>
- AQUAE FUNDACIÓN. (20 de febrero de 2023). *Día Mundial del Agua 2023: Acelerando el Cambio*. Obtenido de <https://www.fundacionaqua.org/dia-mundial-agua-2023/>
- AQUAE Fundation. (24 de Agosto de 2021). *Cómo evitar las sequías con un atrapanieblas*. Obtenido de AQUAE Fundation: <https://www.fundacionaqua.org/wiki/atrapanieblas/>
- Barrios, O. (2004). *Construcción de un Invernadero*. Obtenido de

- <https://studylib.es/doc/3586816/construcci%C3%B3n-de-un-invernadero-octavio-barrios-capdeville...>
- BBVA. (4 de septiembre de 2024). *Del cambio climático a la mala gestión del agua: causas y consecuencias de la sequía.* Obtenido de <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/del-cambio-climatico-a-la-mala-gestion-del-agua-causas-y-consecuencias-de-la-sequia/>
- Becerril, D. (15 de marzo de 2023). *Querétaro será sede del Green Tech Americas 2023.* Obtenido de Mexico Industry: <https://mexicoindustry.com/noticia/queretaro-sera-sede-del-green-tech-americas-2023>
- Bocek, A. (S.f.). *INTRODUCCION A LA CAPTACION DEL AGUA.* Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnibpcapcglclefindmkaj/https://cales.arizona.edu/azaqua/AquacultureTIES/publications/Spanish%20WHAP/GT3%20Water%20Harvesting.pdf
- CONAGUA. (2024). *Monitor de sequia de México.* Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- ECONOVA. (2025). *Sistema de captación de agua pluvial en el entorno urbano.* Obtenido de Institute of Architecture and Engineering : <https://econova-institute.com/sistema-captacion-pluvial/>
- El Salvador, E., Ntole, R., Chikavumbwa, S., Bwambale, E., Sibale, D., Jeremías, Z., . . . Petroselli, A. (2023). Rainwater harvesting in arid and semi-arid lands of Africa: Challenges and opportunities.Rainwater harvesting in arid and semi-arid lands of Africa: Challenges and opportunities. *Acta Scientiarum Polonorum*, 41-52. doi:<https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2023.22.2.03>
- Escribano, B. (2007). Una visión sostenibilista sobre la escasez del agua dulce en el mundo. *Revista internacional de sostenibilidad, tecnología y humanismo.*, 152.
- Esperanza, A. V. (2024). *Agricultura y producción de alimentos.* Obtenido de <https://agricolavallesesperanza.com/agricultura-y-produccion-de-alimentos-representan-el-70-de-consumo-mundial-de-agua/>
- Estrella, V. (26 de abril de 2020). Sequía impacta a producción agrícola de Querétaro. *El*

*Economista*, pág. 1.

- FAO. (abril de 2013). *Food and Agriculture Organization of the United Nation*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnibpcapcglclefindmkaj/https://www.fao.org/4/i3247s/i3247s.pdf
- Generación Verde. (08 de Abril de 2017). *Tipos de sistemas hidropónicos para cultivar*. Obtenido de Generación Verde: https://generacionverde.com/blog/hidroponia/tipos-de-sistemas-hidroponicos/
- Giménez, D. O., & Beltrano, J. (2015). *Cultivo en hidroponía*. Buenos Aires, Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). doi:https://doi.org/10.35537/10915/46752
- Gómez Martínez, E., Mata García, B., & González Santiago, M. V. (2017). ¿Es la agroecología un extensionismo participativo? El caso de las escuelas campesinas en México. *Kavilando. Revista de Ciencias Sociales*, 9(1), 170-183. doi:https://n2t.net/ark:/13683/ptrt/Vgt
- Google Formularios. (2025). *Google Formularios*.
- Google Maps. (2025). *Amealco de Bonfil, Querétaro*. Obtenido de Google Maps: https://www.google.com/maps/place/Amealco+de+Bonfil,+Qro./@20.1859536,-100.1949011,11.5z/data=!4m6!3m5!1s0x85d31afca0304949:0x2fb3d8c312ea0d9c!8m2!3d20.1876421!4d-100.1467011!16s%2Fm%2F09v7tmk?entry=ttu&g\_ep=EgoyMDI1MDUyMS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D
- IMNOVATION#HUB. (2025). *6 tecnologías que permiten extraer agua del aire en cualquier sitio*. Obtenido de IMNOVATION#HUB: https://www.imnovation-hub.com/es/agua/extraer-agua-aire/?\_adin=11734293023
- Iagua. (16 de 05 de 2018). *¿Cómo afecta el aumento demográfico a los recursos hídricos?* Obtenido de El aumento demográfico y su impacto en los recursos hídricos: https://www.iagua.es/blogs/pablo-gonzalez-cebrian/como-afecta-aumento-demografico-recursos-hidricos
- iagua. (2018). *Fundación Aquae*. Obtenido de ¿Sabías que solo el 0,025% del agua de la

- Tierra es potable?: <https://www.iagua.es/noticias/fundacion-aquae/sabias-que-solo-0025-agua-tierra-es-potable-infografia-fundacion-aquae>
- Iberdrola. (2024). *Iberdrola*. Obtenido de Hidroponía, una técnica de cultivo aliada de la sostenibilidad: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-hidroponia-y-ventajas>
- ICO-BO. (2025). *Instituto de Capacitación del Oriente*. Obtenido de Agua potable de la niebla: <https://ico-bo.org/agua-de-niebla/>
- IDEO. (2009). *Design Kit: The Human-Centered Design Toolkit*. Obtenido de <https://www.ideo.com/journal/design-kit-the-human-centered-design-toolkit>
- INVEUROP. (11 de abril de 2021). *Controlling the Climate*. Obtenido de ¿Cómo funciona un invernadero?: <https://inveurop.com/es/>
- Jalife Acosta, S., Quiroa Herrera, J. A., & Villanueva Solís, J. (2018). CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA: TIPOS, COMPONENTES Y ANTECEDENTES EN ZONAS ÁRIDAS DE MÉXICO COMO ESTRATEGIA DE USO SUSTENTABLE DEL AGUA. *ResearchGate*, 23. doi:10.32870/rvcs.v0i3.32
- Maguey, H. (29 de octubre de 2018). *Más de 80% del agua se va en uso agrícola y de la industria*. Obtenido de Gaceta UNAM: <https://www.gaceta.unam.mx/crisis-agua-industria/#:~:text=En%20M%C3%A9xico%20seg%C3%BAn%20la%20Comisi%C3%B3n%20de%20alrededor%20de%2010%25>.
- Matsumoto, K., & Sawaki, M. (13 de Enero de 2023). Potential of traditional domestic rainwater harvesting systems: current trends and future directions. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 344-354. doi:<https://doi.org/10.1080/13467581.2023.2214193>
- Meteoblue. (2024). *Meteoblue weather close to you*. Obtenido de Archivo meteorológico Amealco: [https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/weatherarchive/amealco\\_m%C3%A9xico\\_4018584?fcstlength=1m&year=2024&month=5](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/weatherarchive/amealco_m%C3%A9xico_4018584?fcstlength=1m&year=2024&month=5)
- METEORED. (28 de Enero de 2024). *Hidroponía, innovación verde para un futuro sostenible: el arte de cultivar nuestros alimentos en ausencia de suelo*. Obtenido de Meteored: <https://www.meteored.mx/noticias/ciencia/hidroponia-innovacion->

verde-para-un-futuro-sostenible-el-arte-de-cultivar-nuestros-alimentos-en-ausencia-de-suelo-agronomia-agricultura-campo.html

Mitchell Tada, G. (20 de enero de 2021). *La evolución de los invernaderos: De la antigua Roma al Singapur contemporáneo*. Obtenido de <https://www.archdaily.mx/mx/955137/la-evolucion-de-los-invernaderos-de-la-antigua-roma-al-singapur-contemporaneo>

Modu, F., Adam, A., Aliyu, F., Mabu, A., & Musa, M. (2020). A Survey of Smart Hydroponic Systems. *ASTES*, 233-248. doi:10.25046/aj050130

Muhlia Gutiérrez, V., Lozano Marchán, N. A., Valdivia Rivera, J. I., Iglesias Ramírez, S. A., Campos Rivera, P. A., & Bernal Serrano, D. (2023). ijos del Maíz: Resiliencia cultural y respuestas comunitarias a la inseguridad alimentaria en Amealco, Querétaro. *Reach Alliance*, 30. Obtenido de <https://reachalliance.org/case-study/food-insecurity-in-amealco-queretaro-implications-for-a-highly-indigenous-communitys-health-nutrition/#executive-summary>

Naciones Unidas. (12 de octubre de 2023). *Escasez de agua, crisis climática y seguridad alimentaria mundial: un llamamiento a la acción colaborativa*. Obtenido de <https://www.un.org/es/cr%C3%B3nica-onu/escasez-de-agua-crisis-clim%C3%A1tica-y-seguridad-alimentaria-mundial-un-llamamiento-la#:~:text=12%20de%20octubre%20de%202023&text=Actualmente%2C%202.40%20millones%20de%20personas,la%20higiene%20y%20el%20saneamiento>

NCYT. (1 de 12 de 2022). *Noticias de la Ciencia y la Tecnología*. Obtenido de ¿Qué es un Invernadero?: <https://noticiasdelaciencia.com/art/45554/que-es-un-invernadero>

Noticias de Querétaro. (1 de Enero de 2022). *Busca Facultad de Derecho formación especializada en Amealco*. Obtenido de Noticias 52: <https://noticiasdequeretaro.com.mx/2022/01/01/busca-facultad-de-derecho-formacion-especializada-en-amealco/>

ODS. (2023). *Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. Obtenido de Objetivos de Desarrollo Sustentable: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

Ojeda Bustamante, W., & Flores Velázquez, J. (2015). *CONSIDERACIONES*

- AGRONÓMICAS PARA EL DISEÑO DE INVERNADEROS TÍPICOS DE MÉXICO.* Juitepec, Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Olivas, B., Salinas, T., & Villa , M. (2023). El Agua Atmosférica para el consumo doméstico y universal? *AP AGRO Productividad*, 6. Obtenido de file:///C:/Users/deepd/Downloads/valeria\_sias,+Journal+editor,+cont-3.pdf
- Peluso, C. (13 de Octubre de 2023). How Is Population Growth Responsible for the Growing Problem of Water Scarcity. *Population Media Center*. Obtenido de <https://www.populationmedia.org/the-latest/population-growth-and-water-scarcity#intro>
- Pensador Queretano. (13 de octubre de 2023). *Comunidades indígenas de Amealco denuncian saqueo de recursos naturales*. Obtenido de <https://pensadorqueretano.com/amealco-de-bonfil/comunidades-indigenas-de-amealco-denuncian-saqueo-de-recursos-naturales/>
- Preeti, P., & Rahman, A. (2021). A Case Study on Reliability, Water Demand and Economic Analysis of Rainwater Harvesting in Australian Capital Cities. *Water MDPI*, 13(19). doi:<https://doi.org/10.3390/w13192606>
- PueblosAmerica. (2024). *El Capulín (Querétaro)*. Obtenido de Pueblos de México: <https://mexico.pueblosamerica.com/i/el-capulin-113/>
- QAMPO. (S.f.). *Cultivos protegidos e invernaderos*. Obtenido de <https://qampo.es/academy/cultivos-protegidos-e-invernaderos/>
- SADER. (2025). *Maximizando el Potencial Agrícola: Cultivos en Invernadero*. Gobierno de México. Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/maximizando-el-potencial-agricola-cultivos-en-invernadero?>
- Salas Rodríguez, J. J. (05 de Octubre de 2022). *Zanjas Filtrantes: fundamentos, diseño, selección de ubicación y construcción*. Obtenido de iagua: <https://www.ialagua.es/blogs/juan-jose-salas/zanjas-filtrantes-fundamentos-diseno-seleccion-ubicacion-y-construccion>
- Sectur. (06 de Octubre de 2019). *Amealco de Bonfil, Querétaro*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/sectur/articulos/amealco-de-bonfil-queretaro>
- SEDEMA. (2022). *Cosecha de lluvia*. Obtenido de Directorio de empresas instaladoras de

sistemas de cosecha de lluvia:

<https://www.sedema.cdmx.gob.mx/archivo/directorio-de-empresas-instaladoras-de-sistemas-de-cosecha-de-lluvia>

Shelly Pursell. (07 de Noviembre de 2023). *Diseño centrado en el usuario: qué es, etapas y ejemplos*. Obtenido de Hubspot: <https://blog.hubspot.es/website/diseno-centrado-usuario>

Sistemas Hortícolas. (13 de abril de 2023). *Estrés hídrico: ¿Qué es, cuáles son sus efectos y cómo evitarlo en tu invernadero?* Obtenido de <https://www.sistemashorticolasalmeria.com/blog/estres-hidrico-que-es-cuales-son-sus-efectos-y-como-evitarlo-en-tu-invernadero/>

Soluciones Hidropluviales. (29 de noviembre de 2012). *Captación en el mundo*. Obtenido de <https://hidropluviales.com/2012/11/29/captacion-en-el-mundo/#:~:text=La%20captaci%C3%B3n%20y%20re%C3%BAsode,vez%20m%C3%A1s%20intensos%20e%20impredecibles>.

Un Water. (2020). *United Nations*. Obtenido de El agua y el cambio climático: <https://www.unwater.org/water-facts/water-and-climate-change>

Un Water. (S.f.). *United Nations*. Obtenido de Water Scarcity: <https://www.unwater.org/water-facts/water-scarcity>

Vásquez Ramírez, L., Cieza León , L., & Cieza León , D. (27 de Noviembre de 2020). Eficiencia de captación de agua con tres tipos de malla atrapanieblas en zonas rurales altoandinas de la sierra norte del Perú. *INGENIERÍA UC*, 27(3), 319-327. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/707/70767026008/html/>

WeAreWater Fundation. (13 de Julio de 2022). *Captación de agua de lluvia, un recurso necesario*. Obtenido de WeAreWater Fundation: <https://www.wearewater.org/es/insights/captacion-de-agua-de-lluvia-un-recurso-necesario/>

## XIV Anexos



### UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

#### CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO



Santiago de Querétaro, Querétaro., a \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ del \_\_\_\_\_

Por medio de la presente, el (la) que suscribe, \_\_\_\_\_, he leído y comprendido los lineamientos del proyecto denominado **“Sistema de captación y abastecimiento de fuentes naturales de agua en invernadero hidropónico en Amealco de Bonfil, Querétaro”** y de manera libre, voluntaria y sin coerción alguna, bajo protesta de decir la verdad autorizo a los investigadores responsables a que la información y datos generados en dicho estudio sean utilizados únicamente con fines de investigación y que estos datos no se proporcionen a otras personas o instituciones. Así mismo, queda estipulado que mi participación será de manera anónima, por lo que la información y datos proporcionados por mí no serán relacionados con mi persona.

Eximo, deslindo de toda responsabilidad y estoy de acuerdo en no levantar ninguna demanda civil, penal, y reparadora del daño en contra de la Universidad Autónoma de Querétaro, de los investigadores responsables del estudio, ni de ningún empleado, profesores, estudiantes y/o voluntarios de la Institución; esto incluye a mi persona y mi familia, en caso de tener algún incidente mientras se desarrolla el estudio, dado que las variables y condiciones del mismo son adecuadas y no representan riesgo alguno.

---

Participante



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA



## Prototipo de Encuesta

Santiago de Querétaro, Querétaro., a \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ del \_\_\_\_\_

Pregunta 1.

¿Cuál es el tipo de Invernadero con el qué cuenta?

Pregunta 2.

¿Cuál es el área superficial del invernadero?

Pregunta 3.

¿Cuál es el método de riego que emplea?

Pregunta 4.

¿Qué tipo de cultivo siembra?

Pregunta 5.

¿Cuánta agua necesita para sus cultivos?

Pregunta 6.

¿De dónde obtiene el agua para su invernadero?

Pregunta 7.

¿Cuál es la periodicidad de riego?

Pregunta 8.

¿Cuenta con un bordo propio?

Pregunta 9.

¿Cuenta con un sistema de captación de agua independiente al bordo?



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

FACULTAD DE INGENIERÍA



## **Encuesta de métodos de cultivo y uso de agua**

El propósito de esta encuesta es recopilar información para comprender las necesidades y preferencias de agricultores, campesinos y emprendedores interesados en nuevos métodos de cultivo y riego. Este estudio forma parte de nuestros esfuerzos para diseñar sistemas más efectivos y adaptados a las nuevas condiciones climáticas, de uso de suelo y recursos naturales. Tu opinión es fundamental para ayudarnos a diseñar nuevos productos que realmente se ajusten a tus necesidades.

La información proporcionada será tratada de manera confidencial y anónima. Tus respuestas nunca serán vinculadas a tu nombre ni a ningún dato personal que pueda identificarte.

Tu participación en esta encuesta es completamente voluntaria, y puedes optar por retirarte en cualquier momento. Si tienes alguna pregunta antes, durante o después de la encuesta, no dudes en comunicarte con nosotros a través del correo electrónico proporcionado: [aalvarez110@alumnos.uaq.mx](mailto:aalvarez110@alumnos.uaq.mx)

1. Escribe tu correo electrónico: \*

---

1. ¿Cuál es tu principal fuente de ingresos?

Agricultura

Ganadería

Empleado general

Comerciante Otro:

2. ¿En qué rango de edad te encuentras?

De 18 a 25 años

De 26 a 40 años

De 41 a 55 años

De 56 a 76 años

Mayor de 76 años

3. ¿Cuál es tu género?

Masculino

Femenino

Otro:

4. ¿Cómo está considerada la zona donde vives?

Zona rural (campo)

Zona urbana (ciudad)

5. ¿Con qué tipo de propiedad cuentas para realizar cultivo?

Casa particular con área verde

Terreno para cultivo a cielo abierto

Invernadero

Hidroponía

Otro:

6. ¿Cuál es la superficie que utilizas para cultivar?

De 1 m<sup>2</sup> a 100 m<sup>2</sup>

De 101 m<sup>2</sup> a 1000 m<sup>2</sup>

De 1001 m<sup>2</sup> a una hectárea

Más de una hectárea

7. ¿De dónde proviene el agua de riego para tus cultivos?

Bordo particular

Presa comunitaria

Pipas de agua

Toma municipal Lluvias (por temporal)

Otro:

8. ¿Qué método de riego utilizas para tus cultivos?

Riego por goteo

Riego por aspersión

Riego por inundación Riego por gravedad

Riego hidropónico

Riego con cubetas (acarreo)

Otro:

9. ¿Cuántos litros de agua usas en cada riego para tus cultivos?

De 200 L. a 1000 L.

De 1001 L. a 3000 L.

De 3001 L. a 5000 L.

Más de 5000 L.

10. ¿Cada cuándo realizas el riego en tus cultivos?

Diario

3 veces por semana

Cada semana

Cada mes

Por temporal

Otro:

11. ¿Qué tipo de alimentos cultivas?

Maíz

Avena

Jitomate

Uva

Chile

Alfalfa

Frijol

Hortalizas

Otro:

12. ¿Cuántos kilos aproximados de alimentos produces en cada cosecha?

De 1 a 10 kg

De 20 a 50 kg

De 100 a 500 kg

Más de 500 kg

13. ¿Para qué tipo de clientes es tu producción de alimentos?

Consumo propio

Venta local

Venta nacional

Venta al extranjero

14. ¿Cuál es el método de captación de agua que consideras más efectivo?

Recolectar agua de lluvia

Recolectar agua de niebla

Pozos

Cisternas o tanques

Otro:

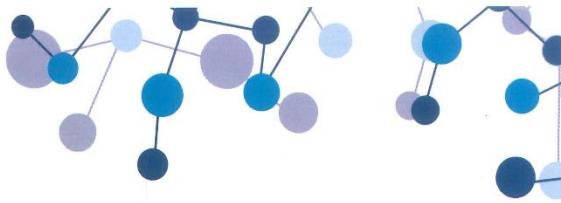
15. ¿Cuánto estarías dispuesto a invertir en un módulo de cultivo de riego autónomo?

De \$5,000 a \$10,000

De \$20,000 a \$30,000

De \$40,000 a \$50,000

Mas de \$50,000



**El Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro  
(CONCYTEQ)**

Otorga el presente

**RECONOCIMIENTO**  
a:

**ABRAHAM GALILEO ÁLVAREZ MENA**

Por su valiosa participación dentro de la categoría

**Estudiantes de Posgrado/  
Investigadores**

en el:



*Dr. Enrique Rabell García*  
**DIRECTOR GENERAL DEL CONCYTEQ**

*Lic. René Martínez Fernández*  
**SECRETARIO TÉCNICO DEL CONCYTEQ**



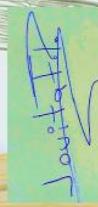
# TRADICIONAL FERIA DEL MAÍZ

De San Miguel Tlaxcaltepec.  
AMEALCO DE BONFIL, QRO.

## RECONOCIMIENTO A:

*L.D.I. Abraham Álvarez Mena*

**Por su valiosa participación como expositor en el área de transferencia tecnológica con su proyecto “Sistema de captación y abastecimiento de fuentes naturales de agua en invernadero hidropónico en Amealco de Bonfil, Querétaro” durante “La Tradicional Feria del Maíz de San Miguel Tlaxcaltepec” llevada a cabo el 15 y 16 de marzo del 2025 en el Centro de San Miguel Tlaxcaltepec, Amealco, Querétaro.**



Mtra. Jovita Flores Pascual  
Presidenta  
Comité Organizador

