

**FACULTAD DE  
CIENCIAS AGRONÓMICAS  
Y DE LOS ALIMENTOS**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DE  
VALPARAÍSO**

**TALLER DE TÍTULO**

**PROYECTO DE INNOVACIÓN**

Diseño y evaluación de un sistema de captación de aguas lluvias en invernadero en Chile central para aumentar la disponibilidad de agua de riego en periodo estival

LAURA REGINA BRUNA CÁCERES

QUILLOTA, CHILE

2019

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS Y DE LOS ALIMENTOS  
ESCUELA DE AGRONOMÍA

TALLER DE TÍTULO

Taller de Título presentado como parte de los requisitos para optar al título de  
Ingeniero Agrónomo

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUAS  
LLUVIAS EN INVERNADERO EN CHILE CENTRAL PARA AUMENTAR LA  
DISPONIBILIDAD DE AGUA DE RIEGO EN PERIODO ESTIVAL**

LAURA REGINA BRUNA CÁCERES

APROBACIÓN

	<b>Nombre</b>	<b>Firma</b>
Profesor Guía	Sr. ÍTALO CUNEO A. Ingeniero Agrónomo, M.Sc., Dr.	_____

Quillota, marzo 2019

## Índice

Resumen .....	1
1. Definición del Problema u Oportunidad.....	2
2. Objetivos .....	5
2.1. Objetivo General.....	5
2.2. Objetivos Específicos .....	5
3. Estado del Arte .....	6
3.1. Caracterización hidrológica de la región de Valparaíso .....	6
3.2. Sistema de captación de aguas lluvias (SCALL).....	7
3.3. Captación de aguas lluvias en la región de Valparaíso .....	10
3.4. Captación de aguas lluvia en invernadero .....	11
3.5. Análisis económico y rentabilidad de SCALLs .....	11
4. Metodología.....	12
4.1. Diseño del sistema de captación y almacenamiento de aguas lluvias que se acople al sistema de riego del invernadero .....	12
4.1.1. Estimación de la precipitación de diseño .....	12
4.1.2. Estimación de escorrentía producida por el área de captación .....	12
4.1.3. Dimensionamiento de canaletas y tuberías .....	12
4.1.4. Estructura de almacenamiento y conexiones al sistema de riego.....	13
4.2. Monitoreo del nivel de agua y evaluación de su calidad para riego.....	13
4.3. Análisis económico y operacional .....	14
5. Referencias .....	15
6. Plan de trabajo .....	17
7. Resultados esperados .....	18
8. Cargos y funciones .....	18
9. Presupuesto .....	19
9.1. Presupuesto total por cuenta (\$).....	19
9.2. Presupuesto total por año (\$) .....	20
Anexos .....	21

## Resumen

La zona mediterránea de Chile se ha caracterizado por ser una de las zonas más aprovechables en términos agrícolas a lo largo de la historia del país, destacándose hoy la región de Valparaíso por sustentar a la mayoría de los agricultores dedicados al cultivo de hortalizas bajo condiciones controladas en invernaderos. No obstante, en las últimas décadas la zona ha experimentado una disminución progresiva de la oferta hídrica, tanto de cauces superficiales como subterráneos, provocando que los pequeños y medianos agricultores visualicen un futuro desfavorable para la sostenibilidad de sus cultivos demandantes de este recurso. A modo de adaptación a las nuevas condiciones, se propone la captación de aguas de lluvia como una medida mitigatoria a la escasez hídrica que actualmente se encuentra afectando a este territorio, por lo que a continuación se detalla un proyecto de conducción y captación de la escorrentía producida por las lluvias en los techos de invernaderos localizados en la zona de Quillota, región de Valparaíso. El diseño se ha basado en determinar las condiciones pluviométricas del sector, considerando caudales e intensidades máximas, para ser ingresados a un software elaborador de planos de bajadas de aguas lluvias; establecer un sistema de conducción de aguas hacia un estanque acumulador; y finalmente hacer uso de este recurso en el sistema de riego, previa evaluación de su calidad, considerando el cumplimiento de la norma chilena de calidad de aguas para dicho uso.

## 1. Definición del Problema u Oportunidad

Durante las últimas décadas, en Chile se han registrado reducciones significativas en la oferta hídrica, trayendo como consecuencia una de las peores situaciones de déficit de agua de los últimos 100 años (Núñez *et al.*, 2013). Actualmente en la región de Valparaíso, se presentan bajo condición de escasez hídrica las provincias de Quillota, Marga Marga, Petorca, Valparaíso, San Felipe y Los Andes. Esta resolución fue redactada luego de que se observaran las siguientes situaciones: baja acumulación de nieve en la cordillera, disminución de caudales superficiales en período estival, rendimiento bajo lo normal de las fuentes subterráneas, disminución en un 50% del rendimiento de los sistemas de extracción de agua potable y alcanzar un índice de escasez (asociado a caudales superficiales) sobre el umbral establecido (MOP, 2018). Sumado a ello, en agosto de 2015 se declaró como área de restricción para nuevas extracciones de aguas subterráneas a cinco sectores hidrogeológicos de la cuenca del Aconcagua, ya que estos sectores presentan una demanda comprometida ampliamente superior a la oferta sustentable (MOP, 2015).

Esta situación revela la necesidad de un uso racional del recurso hídrico, más aún por parte del sector silvoagropecuario, quien representa un 63% del uso consuntivo de agua en la región de Valparaíso, destinada principalmente al riego de cultivos. Es por esto que los pequeños y medianos agricultores de la región, que a su vez están siendo afectados por la escasez hídrica, visualizan un futuro desfavorable; puesto que la demanda por este recurso va en aumento y la obtención de nuevos derechos de aprovechamiento es cada vez menos viable (ODEPA, 2010).

Si observamos a lo largo de la historia, diversas culturas se han visto enfrentadas a una situación de escasez hídrica, y en algunos casos, adaptaron sus construcciones para la captación y almacenamiento de agua proveniente de la lluvia. Hoy, esta opción se está reevaluando, con el fin de aumentar la disponibilidad de agua como una respuesta a la gran demanda de este recurso en el sector silvoagropecuario. Cabe mencionar que en Chile, según el Artículo 10° del Código de Aguas (DFL N°1122, 1981), el uso de las aguas pluviales corresponde al dueño del predio donde éstas precipiten, mientras éstas no fluyan a cauces naturales de uso público. Considerando esto, se han instalado proyectos tipo en la zona central del país, los cuales proponen almacenar agua de lluvia captada desde superficies impermeables y utilizarla posteriormente para consumo animal o en

regadío. Los métodos se han diferenciado en el tipo de superficie impermeable escogida: desde el tejado de las casas o bodegas de los agricultores, o bien, mediante la instalación de una superficie impermeable en suelos erosionados y posicionados en laderas. El volumen de agua captado en los techos de casas y bodegas queda limitado a la baja superficie que abarca la estructura, pero ha mostrado buenos resultados para el regadío de pequeños invernaderos, de consumo familiar principalmente. Es por esto que se ha buscado aumentar la superficie de captación, a través de la instalación de superficies impermeables en laderas de cerros, en donde se genera más escorrentía comparado con el suelo descubierto y la calidad del agua se ve favorecida debido a la baja cantidad de sedimentos arrastrados por la misma.

No obstante, estas estructuras no son las únicas capaces de generar escorrentía en superficies impermeables dentro de un predio agrícola, también se puede observar esta situación en los techos de invernaderos, puesto que excluyen el ingreso de aguas pluviales. Los invernaderos se han implementado y desarrollado con el principal objetivo de modificar las condiciones del entorno natural, y así, establecer un cultivo bajo condiciones óptimas que le permitan alcanzar su máxima productividad. Estas condiciones variarán acorde al lugar geográfico y la especie con la que se esté trabajando, pero en general se busca hacer un uso más eficiente del suelo, agua, energía, nutrientes y del espacio (Castilla, 2007).

Según el último Censo Agropecuario y Forestal, realizado en 2007, en la región de Valparaíso se concentra una gran superficie de hortalizas y flores bajo condiciones controladas (1.582 ha), equivalente al 56% de la superficie de invernaderos a nivel nacional. Dentro de los cultivos que se presentan en esta superficie de invernaderos en la región, se puede observar (Anexo 1) que en su mayoría corresponde a hortalizas y flores, siendo el tomate la hortaliza más representativa con un 52% y luego le sigue el cultivo de flores con un 19%.

Una de las características que presentan los invernaderos es que no se permite el ingreso de aguas lluvias, por lo que la reposición del agua evapotranspirada depende totalmente del riego. Considerando que los cultivos bajo invernadero se encuentran localizados mayoritariamente en zonas donde el abastecimiento de agua, ya sea por cauces subterráneos o superficiales, se ve cada vez más limitado; esta condición podría

perjudicar el rendimiento de los cultivos, ya que el estrés por déficit hídrico afecta diversos procesos en la planta. Con el objetivo de aumentar la eficiencia del riego en la agricultura y así potenciar el cuidado y preservación del recurso, se han adoptado métodos que incluyen nuevas tecnologías, como lo es el uso de sistemas de riego presurizado del tipo goteo o microaspersión, como también la implementación de sistemas hidropónicos. Este último se caracteriza por establecer el cultivo en recipientes impermeables, los cuales pueden contener un sustrato inerte orgánico o inorgánico que es regado con una solución nutritiva; o bien, establecerse directamente sobre una película líquida circulante con la solución nutritiva (Alpi y Tognoni, 1999). Dentro de las ventajas que presenta el cultivo hidropónico se destaca el menor consumo de agua por kilogramo de producto y una mayor producción por superficie empleado (Jaques y Hernández, 2005), por lo que se propone a la hidroponía como una alternativa en aquellas zonas afectadas tanto por la degradación de los suelos como por la escasez de agua.

Considerando la ventaja de que las aguas pluviales corresponde al dueño del predio donde éstas precipiten y las problemáticas y oportunidades anteriormente planteadas, surge la idea de evaluar la factibilidad económica y técnica de un nuevo método de recolección de aguas lluvia en los techos de invernadero para utilizarla en el riego del cultivo asociado; el cual permita aprovechar esta fuente alternativa de agua, y al mismo tiempo, aumentar la disponibilidad de agua para utilizarla en riego del cultivo asociado.

## **2. Objetivos**

### *2.1. Objetivo General*

Diseñar y evaluar un sistema de captación y almacenamiento de aguas lluvias en invernadero situado en Chile central para aumentar la disponibilidad agua de riego en periodo estival.

### *2.2. Objetivos Específicos*

1. Diseñar sistema de captación, conducción y almacenamiento de aguas lluvias que se acople al sistema de riego del invernadero.
2. Cuantificar volumen de agua almacenada y evaluar su calidad para usarla en el sistema de riego.
3. Generar un análisis operacional y económico que evalúe la rentabilidad del diseño.

### 3. Estado del Arte

#### 3.1. Caracterización hidrológica de la región de Valparaíso

La región de Valparaíso presenta un clima templado de tipo mediterráneo, el cual se caracteriza por poseer un periodo invernal frío y con precipitaciones, junto a un periodo estival seco y de elevadas temperaturas (Luebert y Pliscoff, 2006). Estas condiciones han demostrado ser propicias para el desarrollo de una agricultura intensiva y productiva, destinando una gran superficie para este fin.

La hidrología es la ciencia enfocada al estudio del ciclo hidrológico del planeta y los procesos que éste involucra, describiendo y prediciendo las variaciones espaciales y temporales del movimiento del agua sobre y debajo de la superficie terrestre. Uno de sus objetivos es determinar eventos de diseño, a partir de datos registrados en redes de medición de los diferentes fenómenos hidrológicos (Breña y Jacobo, 2006). En Chile, la Dirección General de Aguas (DGA) cuenta con una red del orden de 500 estaciones, las que tienen la facultad de transmitir información en tiempo real, mediante satélites y GPRS. Esta tecnología permite contar con datos de precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, entre otros.

La información necesaria para diseñar un sistema de captación, distribución y almacenamiento de aguas lluvias debe estar basada en un periodo de observación superior a 10 años, siendo lo más adecuado una observación igual o superior a 30 años (UNESCO, 2015). Los datos necesarios corresponden a precipitación media anual y mensual, como también la precipitación máxima ocurrida en 24 horas y la mayor intensidad alcanzada en una hora (Rodríguez *et al.*, 2014). Con la disponibilidad de esta información se puede determinar la precipitación de diseño del sistema, en términos de su probabilidad de ocurrencia a través de funciones de distribución de probabilidad. Tanto la UNESCO (2015) como la FAO (2013) estiman conveniente trabajar con una probabilidad de ocurrencia superior al 50% (promedio simple), ya que sólo se estaría reduciendo el abastecimiento de aguas a la mitad de los años en funcionamiento. Para poder asegurar una oferta más estable en el tiempo, se recomienda trabajar con una probabilidad de excedencia del 90%, ya que se considera más rentable desde el punto de vista económico (UNESCO, 2015). Esto quiere decir, por ejemplo, que tan sólo uno de cada

diez años no se logrará capturar la precipitación de diseño; y el resto de los años se logrará acumular el volumen de lluvia esperado. Para poder predecir la precipitación de diseño considerando los valores extremos asociados a los registros de lluvias, se recomienda ajustar los datos a la función de probabilidad de Distribución de Gumbel, puesto que corresponde a la más utilizada en hidrología (Campos, 1998; UNESCO, 2015), mediante la siguiente ecuación:

$$F(X) = e^{-e^{-d(x-\mu)}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

En donde:

F(X) = Función de distribución de probabilidad

x = variable aleatoria o precipitación de diseño

e = constante de Neper

d y  $\mu$  = parámetros de la distribución de Gumbel (Anexo 2)

En la región de Valparaíso se cuenta con la presencia de la estación meteorológica Quillota (Anexo 3), la cual es la única que contiene toda la información necesaria para el diseño de un sistema de captación de aguas lluvias.

### 3.2. Sistema de captación de aguas lluvias (SCALL)

Según define la FAO (2013), se comprende como técnica de captación y aprovechamiento de agua de lluvia, aquella obra o procedimiento técnico capaz de, tanto individualmente como combinadas, aumentar la disponibilidad de agua; ya sea para uso doméstico, animal o vegetal dentro del predio. A continuación, se especifica los principales componentes de un sistema de captación de aguas lluvias en superficies impermeables, ya que se acomoda a lo propuesto en este proyecto:

a. *Superficie de captación*: corresponde al componente más importante del sistema. Cada superficie receptora de las precipitaciones presenta una capacidad de infiltración y escorrentía característica, y son estos parámetros los que definen la facilidad con que el agua podría ser captada y conducida. Aquellas superficies porosas (como el suelo) logran infiltrar el agua con mayor facilidad, a diferencia de las superficies poco permeables o impermeables (como laderas y techos) que producen escorrentía fácilmente. La cantidad de lluvia que generará escorrentía se puede calcular mediante la siguiente fórmula propuesta por la FAO (2013):

$$\text{Escorrentía (mm)} = \text{Coef. escorrentía} \times \text{precipitación de diseño (mm)} \quad (\text{Ecuación 2})$$

El coeficiente de escorrentía es característico de cada material, y además, es importante para determinar el caudal que podrá ofrecer una determinada superficie de drenaje.

El área de captación tendrá directa relación con el volumen de agua que se puede almacenar, considerando además la precipitación de diseño del sistema. Esto se resume en la siguiente expresión:

$$V_c = A \times E \quad (\text{Ecuación 3})$$

En donde:

$V_c$  = volumen de captación ( $m^3$ )

$A$  = superficie de captación ( $m^2$ )

$E$  = escorrentía ( $m$ )

b. *Sistema de conducción*: es la estructura encargada de recibir el agua producto de la escorrentía y guiarla hacia el lugar de almacenamiento, siendo las canaletas y tuberías las más utilizadas para este fin. Sus dimensiones deben ser adecuadas al volumen de escorrentía y la boca de salida debe ser suficiente para transportar el caudal máximo, en función de la duración e intensidad de la precipitación (FAO, 2013). Para calcular el caudal de conducción en tuberías y canaletas se recomienda el uso del método racional:

$$Q_c = C_e \times I \times A \quad (\text{Ecuación 4})$$

En donde:

$Q_c$  = Caudal máximo de conducción ( $m^3/s$ )

$C_e$  = Coeficiente de escorrentía del material (adimensional)

$A$  = Área de captación ( $m^2$ )

$I$  = Intensidad de precipitación máxima de diseño ( $m/s$ )

La intensidad de precipitación representa la cantidad de agua caída en función del tiempo, y ésta, se puede relacionar con la frecuencia con que ocurre un evento en particular (tiempo de retorno). Esta relación se puede apreciar en las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (curvas IDF), las cuales han sido establecidas a partir de datos de precipitaciones máximas ocurridas en 24 horas, permitiendo establecer intensidades de diseño asociadas a un periodo de retorno y a una determinada duración de lluvia. La curva IDF correspondiente a Quillota (Anexo 5) permite obtener ecuaciones matemáticas para determinar la intensidad de la localidad en cuestión, mediante la determinación de las variables duración y periodo de retorno, a través de la siguiente expresión (UNESCO, 2007):

$$I = \frac{62,29 \times T^{0,2132}}{D^{0,4488}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

En donde:

$I$  = intensidad de precipitación (mm/h)

$T$  = periodo de retorno (años)

$D$  = duración (minutos)

La duración de la precipitación de diseño, para que sea aplicada en el método racional, se considera igual al tiempo de concentración ( $T_c$ ), entendiéndose  $T_c$  como el tiempo que demora el caudal generado por la escorrentía en viajar desde el punto más alejado de la superficie de captación hasta su punto de salida; en otras palabras, es la duración necesaria para que se alcance el caudal máximo (Bentancor *et al.*, 2014). Existen diversos métodos para estimar el tiempo de concentración, siendo el más utilizado, la ecuación de Kirpich (Brière, 2005):

$$T_c = \frac{0,0195 L^{0,77}}{s^{0,385}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

En donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración (min)

$L$  = máxima distancia en que viaja el agua sobre la superficie (m)

$s$  = pendiente promedio del camino seguido por el agua (m/m)

c. *Cisterna de acumulación*: para almacenar el agua captada y conducida existen varias alternativas. La más utilizadas comúnmente son el estanque de plástico y ferrocemento, ya que, al ser un sistema cerrado, presenta la ventaja de reducir la evaporación. También se ha observado el uso de tanques flexibles de PVC, siendo su fácil transporte una ventaja adicional. El criterio para determinar el volumen de la cisterna queda sujeto al diseñador, quien puede considerar el volumen de captación, o bien, la demanda hídrica del cultivo como el factor principal de diseño.

Se puede considerar un cuarto componente, que corresponde al sistema de filtrado, el cual generalmente se ve asociado al consumo de agua potable. Para el caso de agua de lluvia, Helmreich y Horn (2009) mencionan que en su mayoría corresponde a agua de baja contaminación, pero queda sujeto a la calidad de la atmósfera. Generalmente las zonas rurales presentan una baja contaminación atmosférica, pero se debe considerar las cercanías con el área industrial, ya que aumenta la probabilidad de contaminación con partículas, metales pesados y contaminantes orgánicos.

### 3.3. *Captación de aguas lluvias en la región de Valparaíso*

La mayoría de los sistemas de captación de aguas lluvias presente en el país han sido implementados mediante la ejecución de diversos proyectos financiados con fondos concursables, en donde los principales usos que se le ha dado al agua captada y almacenada ha sido para el abastecimiento de agua potable para las familias de pequeños agricultores, como también para el regadío de cultivos. En el año 2015 se financió el proyecto “Establecimiento de plantaciones con fines productivos de *Aristotelia chilensis* (Maqui) en zonas rurales de la Región de Valparaíso a través de la utilización de sistemas de captación de aguas lluvia (SCALL)”, por el Fondo de Innovación para la Competitividad FIC-R del Gobierno Regional de Valparaíso, siendo el único documentado hasta el momento para esta zona. Este proyecto se basó en la captación de aguas lluvias a través de una geomembrana instalada en ladera, para conducir y almacenarla en pequeños estanques de 30 m<sup>3</sup> y satisfacer así la demanda del cultivo en el periodo estival. Los resultados revelaron que el diseño hidrológico propuesto por la UNESCO (2015) es aceptado, ya que se observó en los años posteriores que las lluvias en la zona podrían llenar hasta tres de estos pequeños estanques; lo que asegura la disponibilidad de este recurso al agricultor en la región en cuestión.

### 3.4. *Captación de aguas lluvia en invernadero*

El Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia (CIDECALLI) en México ha desarrollado un prototipo que corresponde a la cisterna para riego modelo COLPOS 5, en donde el propósito de la cisterna diseñada es almacenar el agua captada en los techos de invernaderos y mantenerla en condiciones de calidad para cultivos hidropónicos, con una capacidad de 2000 m<sup>3</sup> (Anaya, 2008). A pesar de que exista este modelo propuesto por el CIDECALLI, no se ha documentado los resultados de haber implementado esta propuesta.

Debido a la importancia que están tomando los diseños propuestos por el CIDECALLI, es que Rodríguez *et al.* (2014) se han basado en éstos para proponer un nuevo diseño de sistemas de captación en invernadero y lo han evaluado en la producción de pepino persa en Michoacán. Este estudio revela que la captación del agua de lluvia en los invernaderos representa una solución viable a los efectos de sequía y a la sobre explotación de los mantos acuíferos en dicha ciudad, ya que el agua captada en los techos del invernadero logró suplir al 100% la demanda hídrica del cultivo durante la temporada.

### 3.5. *Análisis económico y rentabilidad de SCALLs*

Salazar y Casanova (2013) proponen que el análisis económico óptimo para evaluar los sistemas de captación de aguas lluvias implementados en sistemas de riego corresponden al análisis costo-beneficio del diseño, considerando los costos de implementación y la inversión necesaria para desarrollar el sistema, en comparación a las utilidades que reciben los agricultores al utilizar el agua almacenada en los sistemas de riego para diversos cultivos.

## 4. Metodología

### 4.1. *Diseño del sistema de captación y almacenamiento de aguas lluvias que se acople al sistema de riego del invernadero*

#### 4.1.1. *Estimación de la precipitación de diseño*

Para determinar la precipitación de diseño se ha trabajado con la información recopilada a partir de la estación hidrometeorológica de Quillota (Anexo 3), la cual contiene datos a partir del año 1979 hasta el año 2017 (Anexo 4), en donde la precipitación promedio corresponde a 333,77 *mm*. No obstante, considerando que la probabilidad de excedencia debe ser superior al promedio simple, se ha definido una probabilidad de excedencia del 90%; y ajustados los datos a la función de probabilidad de Distribución de Gumbel, se ha determinado la precipitación de diseño de 135,46 *mm* para Quillota.

#### 4.1.2. *Estimación de escorrentía producida por el área de captación*

Considerando que en la región de Valparaíso se ve predominantemente el invernadero tipo capilla, se contemplará trabajar con las dimensiones propuestas por este modelo (Anexo 6), por lo que se considerará una superficie de captación equivalente a 240  $m^2$  (correspondiente a un invernadero). La cubierta, sobre la cual se llevará a cabo la captación de agua de lluvia, corresponde a polietileno, el cual presenta un coeficiente de escorrentía de 0,9 (Rodríguez *et al.*, 2014). En base a esta información, se ha calculado la escorrentía que se generará sobre la superficie del invernadero mediante el uso de la (ecuación 2) la cual corresponde a 121,91 *mm*. A su vez, se ha determinado el volumen a almacenar anualmente mediante el uso de la (ecuación 3), obteniéndose un resultado de 29,26  $m^3$  de agua en la localidad de Quillota.

#### 4.1.3. *Dimensionamiento de canaletas y tuberías*

El dimensionamiento del sistema de conducción se hará en base a los resultados obtenidos por Rodríguez *et al.* (2014), ya que demostraron haber realizado un diseño que tolerara el peso del agua captada. Como se mencionó anteriormente, el caudal máximo de conducción se obtendrá mediante el método racional (ecuación 4), por lo que se ha debido determinar inicialmente el tiempo de concentración (equivalente a la duración) mediante la (ecuación 5), la cual adquiere un valor de 1,29 minutos. Además, se ha definido un tiempo de retorno de 10 años debido a que se relaciona a la vida útil que presenta tanto un invernadero, el sistema de canaletas y el hidroacumulador. En base a

estos parámetros, se ha estimado una intensidad de 90,68  $mm/h$  mediante la (ecuación 5) y un caudal máximo de 0,00544  $m^3/s$  (5,44  $l/s$ ).

Obtenido los parámetros necesarios para estimar las dimensiones de canaletas y tuberías, se elaborará un plano de la red de conducción a través de un software de diseño de desagües pluviales en edificaciones HydraSoftware DESAGÜES versión 3.0. Éste permitirá obtener los diámetros y pendientes necesarios para cada tramo de tuberías y canaletas, lo que será evaluado por un técnico asesor en construcción.

#### *4.1.4. Estructura de almacenamiento y conexiones al sistema de riego*

Debido a que el agua precipitada y captada en los techos probablemente traiga sedimentos y agentes contaminantes, se incorporará en este diseño una vía de escape para las primeras precipitaciones de la temporada, la cual estará instalada antes del estanque y cumplirá además una función de limpieza del sistema de conducción.

Considerando que el volumen a almacenar se encuentra bordeando los 30  $m^3$ , para almacenar el agua de lluvia captada se instalará un estanque flexible de igual volumen y con dimensiones de 6,5m x 6,5m x 1m. Dicho hidroacumulador, desde fábrica, se entregará con dos válvulas laterales de entrada/salida y dos tapas de registro. Para proteger al hidroacumulador de acciones humanas u otros animales e incidencia de rayos UV, se considerará un cierre perimetral de 8,5m x 8,5m protegido con malla Raschel a una altura de dos metros.

Adicionalmente, frente a una situación de sobrepasar el nivel máximo de almacenamiento del estanque flexible, se implementará un sistema de evacuación de aguas almacenadas con destino al canal del predio, evitando así generar erosión producto de la escorrentía y se logrará aportar agua de lluvia a la napa freática de la zona.

Para el regadío del cultivo asociado, se acoplará una de las salidas laterales del estanque flexible al sistema de riego mediante la instalación de una válvula solenoide de tres vías, lo que permitirá conectar el sistema de riego a las dos fuentes de abastecimiento de agua.

#### *4.2. Monitoreo del nivel de agua y evaluación de su calidad para riego*

Periódicamente se estimará el nivel del agua acumulada en el estanque a través de caudalímetros conectados tanto a la válvula de entrada como a las dos de salida, en

donde cada uno de éstos estará conectado a una placa programable tipo Arduino que facilitará la lectura del flujo de agua en el tiempo. Paralelamente, cada mes se tomará muestras del agua acumulada para su posterior evaluación de contenido de parámetros químicos, salinidad y sólidos disueltos totales; todo ello, con el objetivo de cumplir con la Nch1333 (Norma de requisitos de calidad del agua para diferentes usos). El análisis será efectuado por el laboratorio de suelos y análisis foliar de la PUCV.

#### *4.3. Análisis económico y operacional*

El análisis operacional del diseño será elaborado por el director del programa en conjunto con el técnico en construcción, en donde se documentarán las observaciones respecto al diseño hidrológico y la estimación del volumen a almacenar, como también, al diseño estructural y el comportamiento de los materiales escogidos; con el fin de minimizar la inversión necesaria en estructura.

El análisis económico que evalúe la rentabilidad del diseño considerará los costos de implementación y mantención, como también la inversión necesaria para establecer el diseño propuesto; costos que serán comparados a los beneficios económicos que recibe el agricultor al incrementar la seguridad de riego, obteniéndose una relación Costo/Beneficio. Para establecer los beneficios económicos se debe considerar los requerimientos hídricos de cada ciclo del cultivo asociado a la superficie del invernadero, lo que determinará la superficie que se logrará abastecer durante el verano con la cantidad de agua almacenada gracias a las lluvias. Así, se podrá estimar la disminución de pérdidas en la producción debido al déficit hídrico que puede ocurrir durante el periodo estival; y en caso de asegurar la disponibilidad de agua durante el verano y quede un excedente, estimar un posible aumento de la superficie cultivada o un aumento de los ciclos productivos dentro del invernadero y las utilidades que ello conllevaría.

## 5. Referencias

- Alpi, A. y F. Tognoni. 1999. Cultivo en invernadero. 3ª ed. 347 p. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Anaya, M. 2008. Objetivos y logros del Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del agua de Lluvia (CIDECALLI). Boletín del Archivo Histórico del Agua. p. 92-98.
- Bentancor, L., L. Silveira y M. García. 2014. Incidencia de la intensidad de lluvia en el tiempo de concentración de microcuencas del Uruguay. *Agrociencia Uruguay* 18(2):106-116.
- Breña, A., y M Jacobo. 2006. Principios y fundamentos de la hidrología superficial. 288 p. Coordinación General de Vinculación y Desarrollo Institucional de la Rectoría General de la Universidad Autónoma Metropolitana, D.F., México. Disponible en: <http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologica.html>. Leído el 20 de julio de 2018.
- Brière, F. 2005. Distribución de agua potable, colecta de desagüe y de agua de lluvia. 395 p. Presses internationales Polytechnique, Montréal, Canadá.
- Campos, D. 1998. Estimación estadística de la precipitación máxima probable en San Luis Potosí. *Ingeniería Hidráulica en México* 13(3):45-66.
- Castilla, N. 2007. Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo. 2ª ed. 462 p. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España.
- FAO. 2013. Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe. 270 p. Food and Agricultural Organization, Santiago, Chile.
- Helmreich, B. y H. Horn. 2009. Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination* 248:118-124.
- INIA. 2016. Técnicas de captación, acumulación, y aprovechamiento de aguas lluvias. 184 p. Boletín N° 321. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional Rayentué. Tengo, Chile.
- Jaques, C. y J. Hernández. 2005. Valoración productiva de lechuga hidropónica con la técnica de película de nutrientes (nft). *Naturaleza y Desarrollo* 3(1):11-16.
- Luebert, F. y P. Plissock. 2006. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. 316 p. Editorial Universitaria. Santiago, Chile.

MOP. 2013. Estrategia nacional de recursos hídricos 2012-2025. 40 p. Ministerio de Obras Públicas. Disponible en [www.mop.cl/documents/ENRH\\_2013\\_OK.pdf](http://www.mop.cl/documents/ENRH_2013_OK.pdf). Leído el 10 de julio de 2018.

MOP. 2015. Determinación de la disponibilidad de aguas subterráneas en el valle del río Aconcagua. IT DARH N°163. SDT N°372. Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile.

Núñez, J., D. Rivera, R. Oyarzún, y J. Arumí. 2013. Chile a secas: vulnerabilidad chilena frente a la sequía y déficit hídrico extremo desde la interfaz ciencia- política. Instituto de Políticas Públicas UDP. Concepción, Chile.

ODEPA. 2010. Análisis del mercado del agua de riego en Chile: una revisión crítica a través del caso de la Región de Valparaíso. Informe final. 139 p. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Santiago, Chile. Disponible en [www.odepa.gob.cl](http://www.odepa.gob.cl). Leído el 14 de mayo de 2018.

ODEPA. 2018. Región de Valparaíso. Información regional 2018. 16 p. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Disponible en [www.odepa.gob.cl](http://www.odepa.gob.cl). Leído el 14 de mayo.

Rodríguez, J., E. Valdés, M. Anaya, D. Gutiérrez, M. Asanza, y L. Martínez. 2014. Diseño de sistemas de captación del agua de lluvia para producción de pepino persa (*Cucumis sativus* L.) bajo invernadero en Michoacán (México). UTCiencia 1(1):6-19

Salazar, O. y M. Casanova. 2013. Runoff Water Harvesting as a Strategy for Increasing Agricultural Production on Hillslope Areas in Arid and Semiarid Zones. Water Recycling and Water Management: 1-61.

UNESCO. 2007. Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia, para la zona centro sur de Chile. Pizarro, R., D. Aravena, K. Macaya, A. Abarza, M. Cornejo, M. Labra, M. Pavez y L. Román. 130 p. Editorial Universidad de Talca, Chile.

UNESCO. 2015. Manual de diseño y construcción de sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales de Chile. Pizarro, R., A. Abarza, C. Morales, R. Calderón, J. Tapia, P. García y M. Córdova. 94 p. Editorial Universidad de Talca, Chile.



## 7. Resultados esperados

Diseño del sistema de captación, conducción y almacenamiento de aguas lluvias que se acople al sistema de riego del invernadero: Se espera obtener un diseño adecuado a las condiciones meteorológicas de la zona, mediante la elaboración de un plano a través de Hidrasoftware, y que este diseño sea estable en su funcionamiento y de fácil acoplamiento al sistema de riego existente en el invernadero.

Cuantificación del volumen de agua almacenada y evaluación de su calidad para uso en regadío: Se espera determinar el volumen y la condición de calidad del agua almacenada, cumpliendo con la NCh1333, para ser utilizada en el riego del cultivo asociado.

Generar un análisis operacional y económico que evalúe la rentabilidad del diseño: Se espera obtener un balance anual donde se analice la relación costo/beneficio del proyecto basado en las utilidades que recibe el agricultor al aumentar la seguridad de riego durante periodos secos.

## 8. Cargos y funciones

Nombre del profesional	Formación/grado académico	Cargo en el proyecto	Funciones (N°)	Costo del personal (\$)
N.N.	Ingeniero Agrónomo	Director del Proyecto	Gestión del proyecto, diseño y monitoreo del SCALL. Análisis operacional y económico.	21.750.000
N.N.	Técnico Agrícola / Ingeniero Agrónomo	Supervisor sistema de riego	Análisis operacional de la conexión del SCALL al Sistema de Riego. Supervisor del riego.	6.200.000
N.N.	Técnico en construcción	Supervisor del SCALL	Análisis operacional del SCALL. Supervisor de instalación y monitoreo del SCALL.	5.000.000
N.N.	Obrero constructor	Obrero 1	Instalación y mantención del SCALL.	490.000

## 9. Presupuesto

### 9.1. Presupuesto total por cuenta (\$)

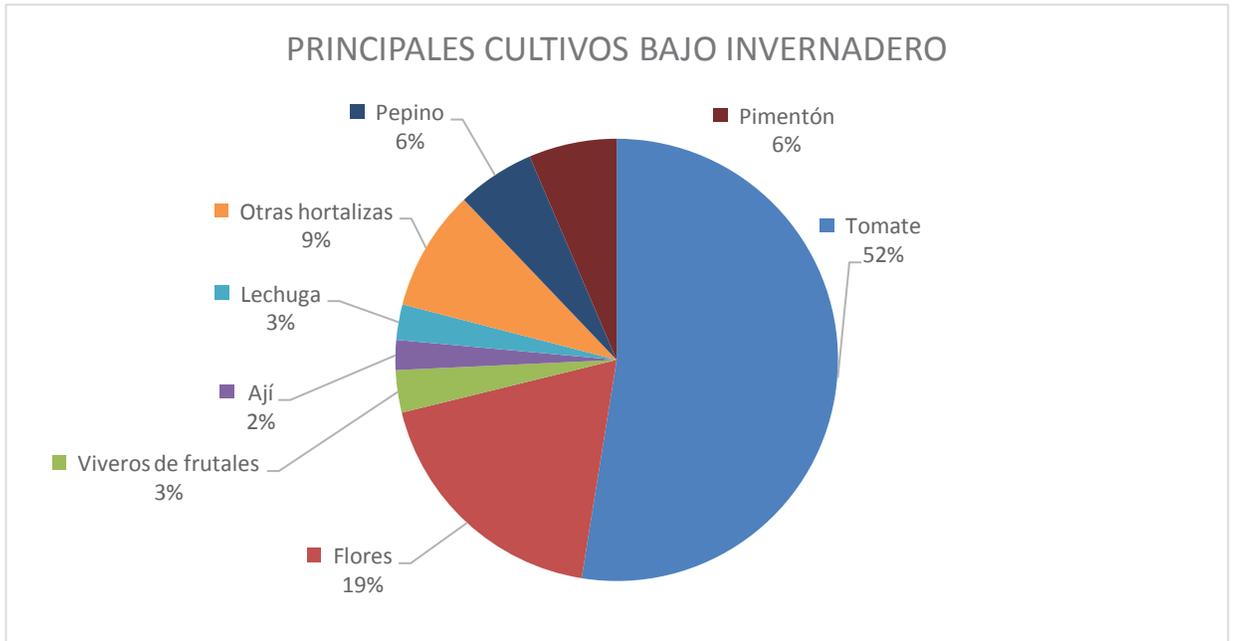
CUENTA		FONDO CONCURSABLE	APORTE EMPRESA		Total(MM\$)
			Pecuniario	No pecuniario	
A.	Total Recursos Humanos	\$ 23.408.000	\$ 6.032.000	\$ 4.000.000	\$ 33.440.000
B.	Total Subcontratos	\$ 1.353.500	\$ -	\$ -	\$ 1.353.500
C.	Total Capacitación	\$ 120.000	\$ -	\$ -	\$ 120.000
D.	Total Equipamiento	\$ 2.342.787	\$ -	\$ 402.000	\$ 2.744.787
E.	Total Difusión	\$ 500.000	\$ -	\$ 200.000	\$ 700.000
F.	Total Infraestructura	\$ 448.711	\$ -	\$ 634.810	\$ 1.083.521
G.	Total Viáticos y Movilización	\$ 6.408.000	\$ -	\$ 5.164.000	\$ 11.572.000
H.	Total Materiales e Insumos	\$ 1.063.140	\$ -	\$ 69.100	\$ 1.132.240
I.	Total Gastos Generales	\$ 1.041.280	\$ -	\$ 2.175.000	\$ 3.216.280
	Porcentaje de Aporte (%)	66,26	10,90	22,84	100,00
<b>TOTAL(\$)</b>		<b>\$ 6.685.418</b>	<b>\$ 6.032.000</b>	<b>\$ 12.644.910</b>	<b>\$ 55.362.329</b>

## 9.2. Presupuesto total por año (\$)

		Año 1	Año 2	Año 3	Total(\$)
A.	Total Recursos Humanos	\$ 12.770.000	\$ 14.520.000	\$ 6.150.000	\$ 33.440.000
	<i>Pecuniario</i>	\$ 11.970.000	\$ 12.520.000	\$ 4.950.000	\$ 29.440.000
	<i>No Pecuniario</i>	\$ 800.000	\$ 2.000.000	\$ 1.200.000	\$ 4.000.000
B.	Total Subcontratos	\$ 973.500	\$ 240.000	\$ 140.000	\$ 1.353.500
	<i>Pecuniario</i>	\$ 973.500	\$ 240.000	\$ 140.000	\$ 1.353.500
	<i>No Pecuniario</i>	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
C.	Total Capacitación	\$ 120.000	\$ -	\$ -	\$ 120.000
	<i>Pecuniario</i>	\$ 120.000	\$ -	\$ -	\$ 120.000
	<i>No Pecuniario</i>	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
D.	Total Equipamiento	\$ 2.495.261	\$ 124.763	\$ 124.763	\$ 2.744.787
	<i>Pecuniario</i>	\$ 2.093.261	\$ 124.763	\$ 124.763	\$ 2.342.787
	<i>No Pecuniario</i>	\$ 402.000	\$ -	\$ -	\$ 402.000
E.	Total Difusión	\$ -	\$ -	\$ 700.000	\$ 700.000
	<i>Pecuniario</i>	\$ -	\$ -	\$ 500.000	\$ 500.000
	<i>No Pecuniario</i>	\$ -	\$ -	\$ 200.000	\$ 200.000
F.	Total Infraestructura	\$ 815.839	\$ 133.841	\$ 133.841	\$ 1.083.521
	<i>Pecuniario</i>	\$ 407.919	\$ 20.396	\$ 20.396	\$ 448.711
	<i>No Pecuniario</i>	\$ 407.920	\$ 113.445	\$ 113.445	\$ 634.810
G.	Total Viáticos y Movilización	\$ 4.768.000	\$ 4.990.000	\$ 1.814.000	\$ 11.572.000
	<i>Pecuniario</i>	\$ 2.746.000	\$ 2.820.000	\$ 842.000	\$ 6.408.000
	<i>No Pecuniario</i>	\$ 2.022.000	\$ 2.170.000	\$ 972.000	\$ 5.164.000
H.	Total Materiales e Insumos	\$ 483.694	\$ 324.273	\$ 324.273	\$ 1.132.240
	<i>Pecuniario</i>	\$ 460.660	\$ 301.240	\$ 301.240	\$ 1.063.140
	<i>No Pecuniario</i>	\$ 23.034	\$ 23.033	\$ 23.033	\$ 69.100
I.	Total Gastos Generales	\$ 1.306.750	\$ 1.367.640	\$ 541.890	\$ 3.216.280
	<i>Pecuniario</i>	\$ 406.750	\$ 467.640	\$ 166.890	\$ 1.041.280
	<i>No Pecuniario</i>	\$ 900.000	\$ 900.000	\$ 375.000	\$ 2.175.000
<b>Total(\$)</b>		<b>\$ 23.733.045</b>	<b>\$ 21.700.517</b>	<b>\$ 9.928.767</b>	<b>\$ 55.362.329</b>
<i>Pecuniario</i>		<b>\$ 19.178.090</b>	<b>\$ 6.494.039</b>	<b>\$ 7.045.289</b>	<b>\$ 42.717.418</b>
<i>No Pecuniario</i>		<b>\$ 4.554.954</b>	<b>\$ 5.206.478</b>	<b>\$ 2.883.478</b>	<b>\$ 12.644.910</b>

## Anexos

### Anexo 1: Superficie de cultivos bajo condiciones controladas de la región de Valparaíso.

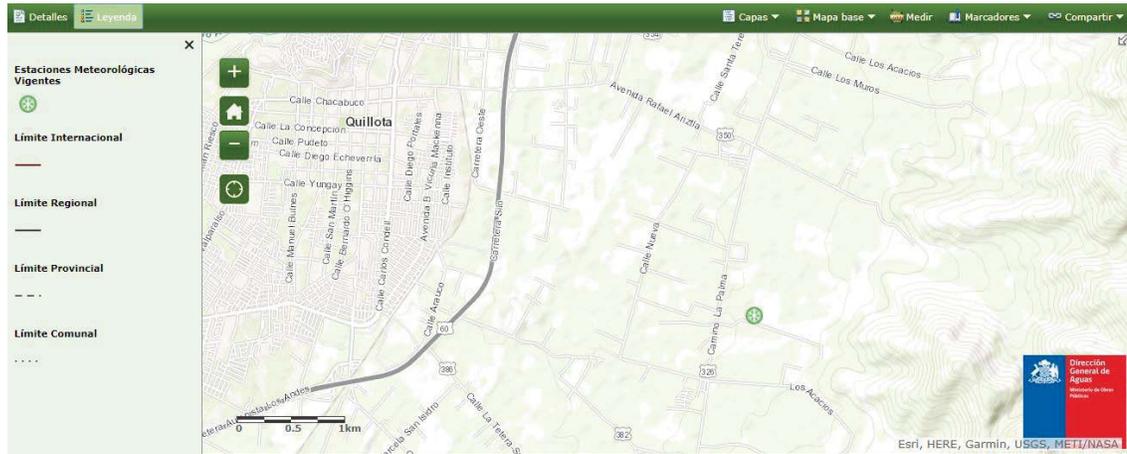


Fuente: elaboración propia a partir de datos entregados en el VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal (INE, 2007).

### Anexo 2: Determinación de los parámetros de la distribución de Gumbel, en base a la media aritmética ( $\bar{x}$ ) y la desviación estándar de la muestra ( $S$ )

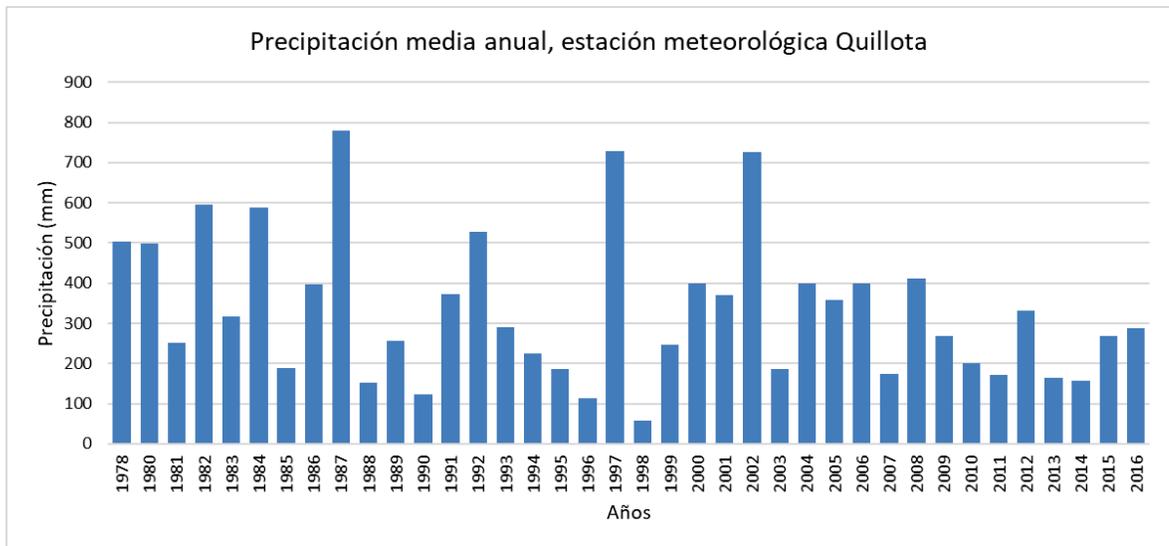
$$d = \frac{1}{0,779696 \times S} \quad ; \quad \mu = \bar{x} - 0,450047 \times S$$

**Anexo 3: Ubicación de la estación meteorológica de la DGA en Quillota**



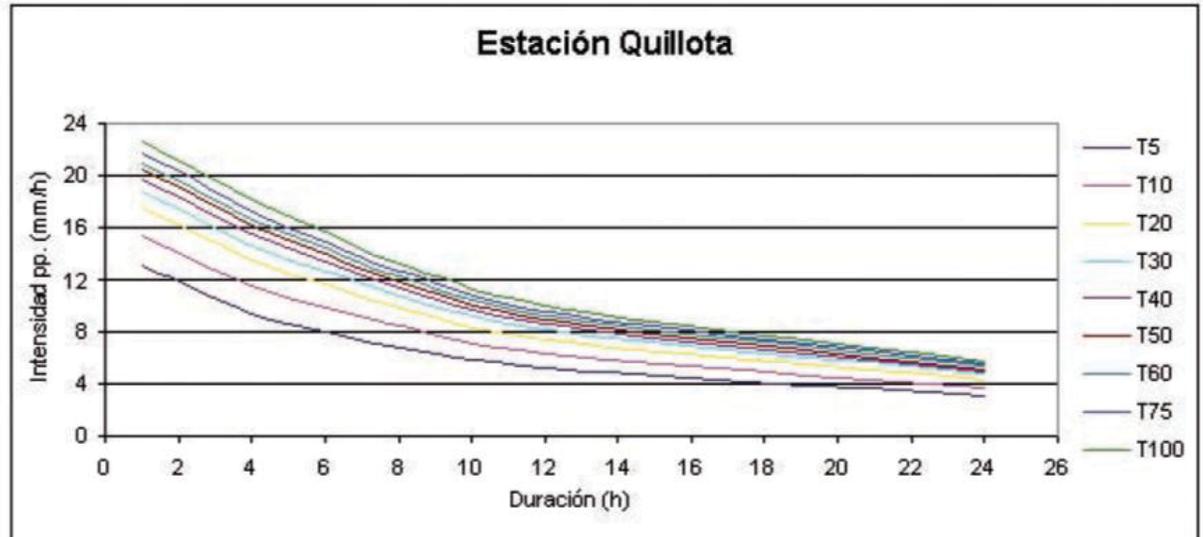
Fuente: <http://www.arcgis.com>.

**Anexo 4: Precipitaciones registradas para la estación meteorológica de Quillota**



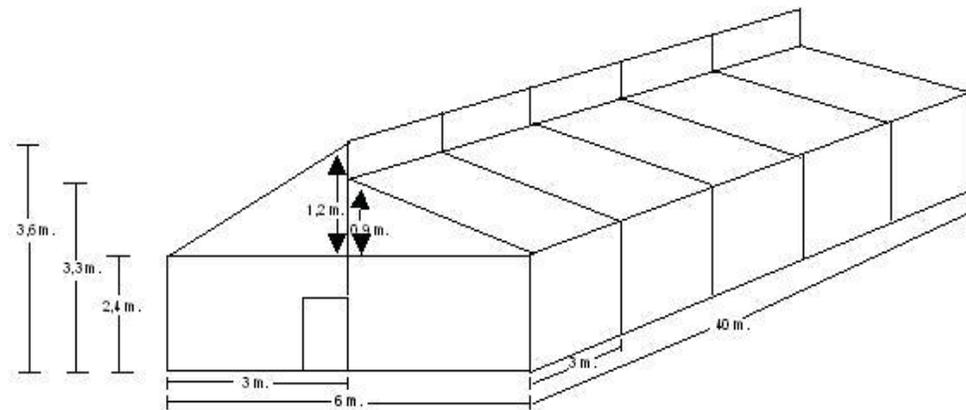
Fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados por la DGA (2018)

### Anexo 5: Curva IDF para la estación Quillota



Fuente: UNESCO (2007)

### Anexo 6: Modelo de invernadero tipo



capilla Figura 4. Invernadero tipo capilla a dos aguas en su variante con lucarna.