

**INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA**  
**COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE**  
SUBCOORDINACIÓN DE CONSERVACIÓN DE CUENCAS Y SERVICIOS AMBIENTALES

**INFORME FINAL**  
**Proyecto RD1907.1**

**Relación Agua - Energía para apoyar la producción de alimentos en la zona de influencia del tren maya, tramo Palenque - Carrillo Puerto.**



**Participantes:**

Dr. Javier Ramírez Luna  
Mtra. Marcia A. Yañez Kernke  
Dr. Eduardo Venegas Reyes  
Ing. Emir Delgado Quezada  
Mtro. Klaus Werner Wruck Spillecke  
Dr. Ulises Dehesa Carrasco  
Apoyos:  
Olga García Villa

**México, 2019**

## CONTENIDO

<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Desarrollo del Área Demostrativa de Producción Protegida y Sistemas Productivos de Fresa, Arándano y Aguacate basados en Sistema de Desalinización .....</b>	<b>3</b>
1.1 Proyecto Ejecutivo área demostrativa.....	4
1.1.1 Proyecto ejecutivo para cultivo de aguacate .....	5
1.1.1.1 Diseño Agronómico.....	5
1.1.1.1.1 Cálculo de requerimiento de riego.....	5
1.1.1.1.2 Cálculo con CROPWAT.....	10
1.1.1.1.3 Lámina de Riego.....	18
1.1.1.1.4 Intervalo de Riego.....	18
1.1.1.1.5 Tiempo de riego.....	19
1.1.1.1.6 Unidades Operacionales.....	19
1.1.1.2 DISEÑO HIDRÁULICO .....	19
1.1.1.2.1 Selección de un emisor.....	20
1.1.1.2.2 Arreglo de emisores.....	21
1.1.1.2.3 Trazo.....	21
1.1.1.2.4 Caudal requerido.....	22
1.1.1.2.5 Diseño de la tubería.....	23
1.1.1.2.6 Pérdida de carga.....	24
1.1.1.2.7 Filtro.....	24
1.1.1.2.8 Carga requerida por la bomba.....	25
1.1.1.2.9 Bomba.....	25
1.1.1.3 DISEÑO ENERGÉTICO.....	26
1.1.1.3.1 Principio fotoeléctrico.....	26
1.1.1.3.2 Selección de módulos solares.....	27
1.1.2 Proyecto ejecutivo del invernadero para cultivo de fresa y arándano.....	30
1.1.2.1 Descripción general del invernadero.....	30
1.1.2.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	32
1.1.2.2.1 Actividades en el Terreno Destinado al Invernadero.....	32
1.1.2.2.1.1 Desmonte y eliminación de escombros.....	32
1.1.2.2.1.2 Nivelación del terreno y marcado del terreno.....	32
1.1.2.2.1.3 Ahoyado y cimentación.....	33
1.1.2.2.1.4 Estructura Metálica del Invernadero.....	35
1.1.2.2.1.5 Columnas.....	35
1.1.2.2.1.6 Arcos.....	36
1.1.2.2.1.7 Largueros.....	37
1.1.2.2.1.8 Soporte tipo W.....	38

1.1.2.2.1.9	Canaletas.....	38
1.1.2.2.1.10	Conducto de evacuación.....	39
1.1.2.2.1.11	Cable de acero .....	39
1.1.2.2.1.12	Cubiertas del Invernadero .....	40
1.1.2.2.1.13	Plástico .....	40
1.1.2.2.1.14	Malla antiáfidos .....	41
1.1.2.2.1.15	Sujeción de cubiertas.....	41
1.1.2.2.1.16	Cortinas enrollables .....	42
1.1.2.2.1.17	Caseta de ingreso.....	42
1.1.2.2.1.18	Calefacción del Invernadero .....	43
1.1.2.3	<i>Diseño de estructura del invernadero</i> .....	43
1.1.2.4	<b>CATÁLOGO DE PARTES</b> .....	49
1.1.2.5	<b>CATÁLOGOS DE PRECIOS</b> .....	50
1.2	<b>IMPLEMENTACIÓN DE ÁREA DEMOSTRATIVA PARA CULTIVO DE AGUACATE</b> .....	52
1.2.1	<i>Generalidades del cultivo de aguacate</i> .....	52
1.2.1.1	<i>Requerimientos climáticos y edáficos</i> .....	53
1.2.2	<i>Suministro y plantación de cultivo de aguacate</i> .....	56
1.2.3	<i>Instalación del sistema de riego</i> .....	60
1.2.3.1	<i>El riego en el aguacate</i> .....	60
1.2.3.2	<i>Suministro de material</i> .....	60
1.2.3.3	<i>Instalación de micro-Aspersores</i> .....	61
1.2.3.4	<i>Instalación de líneas de distribución</i> .....	64
1.2.3.5	<i>Sistema de fertirriego</i> .....	66
1.3	<b>IMPLEMENTACIÓN DE ÁREA DEMOSTRATIVA PARA CULTIVO DE ARÁNDANO Y FRESA</b> .....	68
1.3.1	<i>Levantamiento de zona inundable</i> .....	68
1.3.2	<i>Instalación de estructura PTR en 200 m<sup>2</sup> para protección de cultivos</i> .....	69
1.3.2.1	<i>Distribución y ubicación de material para armado de estructura</i> .....	70
1.4	<b>SISTEMA DE DESALINIZACIÓN IMPLEMENTADO EN PROYECTOS PRODUCTIVOS</b> .....	75
1.4.1	<i>Tolerancia de los cultivos a la Salinidad</i> .....	77
1.4.2	<i>Instalación de sistema desalinizador</i> .....	80
1.4.2.1	<i>Construcción de plancha de concreto</i> .....	80
1.4.2.2	<i>Construcción e instalación de estructura y paneles solares</i> .....	82
1.4.2.2.1	<b>Diseño de estructura</b> .....	82
1.4.2.2.2	<b>Proceso de fabricación</b> .....	86
1.4.2.2.3	<b>Proceso de instalación</b> .....	88

1.4.3	Sistema desalinizador en cultivos.....	92
1.4.3.1	Estudio paramétrico .....	92
1.4.3.2	El agua de riego .....	92
1.4.3.3	CULTIVO DE AGUACATE.....	96
1.4.4	Unidad experimental con riego hidropónico para cultivo de fresa y arándano.....	98
1.4.4.1	Características de los cultivos.....	99
1.4.4.1.1	Fresa .....	99
1.4.4.1.2	Arándano .....	102
1.4.4.2	Sistema NF-PV de cuatro membranas .....	104
1.4.4.2.1	Sistema Hidropónico .....	106
1.4.4.2.2	Sistema NF-PV de cuatro membranas .....	109
1.4.4.3	Resultados de la evaluación del sistema de desalinización .....	111
1.4.4.4	Metodología.....	117
1.4.4.5	Resultados .....	120
1.4.4.6	Artículo .....	120
<b>2</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>141</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>142</b>



## TABLAS

Tabla 1 Datos climatológicos de la estación San Jose, Servicio Meteorológico Nacional (2016).....	7
Tabla 2 Cultivos seleccionados .....	9
Tabla 3 Rangos recomendados para la uniformidad de emisión, Keller – Bliesner (1990).....	11
Tabla 4 Valores de Ea en climas áridos, Keller (1978).....	11
Tabla 5 Valores de Ea en climas húmedos, Keller (1978).....	11
Tabla 6 Eficiencia de aplicación típicas para diferentes sistemas de riego, Ojeda et al. (2004).....	11
Tabla 7 Conductividad eléctrica del suelo máxima tolerable por el cultivo obtenida a partir del extracto de saturación del suelo, Ayers y Westcot (1976).....	12
Tabla 8 Evapotranspiración de referencia para Cuernavaca.....	13
Tabla 9 Precipitación efectiva para Cuernavaca.....	14
Tabla 10 Medida ponderada de cultivos .....	17
Tabla 11 Datos de la Boquilla #11 – Amarillo (4.37 mm) .....	20
Tabla 12 Catálogo de partes.....	49
Tabla 13 Catálogo de precios .....	50
Tabla 14 Diámetros de riego (m) .....	63
Tabla 15. Cultivos leñosos.....	79
Tabla 16 Clasificaciones del agua de riego por su valor de CE (salinidad) utilizado por el Laboratorio de Salinidad de Riverside (Richards, 1954) .....	92
Tabla 17 Clasificaciones del agua de riego por el índice de RAS (sodicidad) utilizado por el Laboratorio de Salinidad de Riverside (Richards, 1954) .....	93
Tabla 18 Clasificación del agua de riego con base en el valor de la CE y el índice de RAS propuesta por Ayers y Westcot (1985), siendo utilizado por la FAO a partir de 1987. ....	95

## FIGURAS

Figura 1 Esquema de la superficie a regar. ....	4
Figura 2 Esquema de líneas de distribución del agua.....	5
Figura 3 Página oficial del Servicio Meteorológico Nacional. ....	6
Figura 4 Normales Climatológicas. ....	6
Figura 5 Lista de las Normales Climatológicas del estado de Morelos.....	7
Figura 6 Estadísticas agrícolas 2014-2015 del DR016 Estado de Morelos. ....	9
Figura 7 Datos meteorológicos de la estación meteorológica de Cuernavaca .....	13
Figura 8 Resultados del requerimiento de riego obtenido .....	14
Figura 9 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de maíz.....	15
Figura 10 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de frijol .....	15
Figura 11 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de cebolla .....	15
Figura 12 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de jitomate .....	15
Figura 13 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de caña de azúcar .....	16
Figura 14 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de mango.....	16
Figura 15 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de otras hortalizas .....	16
Figura 16 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de limón .....	16
Figura 17 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de alfalfa .....	17
Figura 18 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de sorgo.....	17
Figura 19 Esquema de la superficie a regar. ....	20
Figura 20 Arreglo de aspersores y separación de subunidades.....	21
Figura 21 Líneas de distribución de cada subunidad. ....	22
Figura 22 Curva característica del filtro.....	25
Figura 23 Curva característica de la bomba. ....	26
Figura 24 Creación de un campo eléctrico permanente, a través de una PN, entre dos capas dopadas respectivamente de (huecos) electrones positivos (P) y electrones con carga negativa (N) donde el material permanece eléctricamente neutro. ....	27
Figura 25 Dimensiones de los Módulos Solares LDK-240D-20.....	28
Figura 26 Vista frontal y trasera de los Módulos Solares LDK-240D-20.....	28
Figura 27 Cara Características eléctricas de los Módulos Solares LDK-240W-20, STC*es una condición estándar de medida: Irradiación 1000 W/m <sup>2</sup> , Temperatura del módulo 25 °C, Distribución espectral AM 1.5, NOCT: irradiación 800 W/m <sup>2</sup> , Temperatura del módulo 45 +- 2° .....	29
Figura 28 Perspectiva “A” del invernadero.....	44

Figura 29 Perspectiva “B” del Invernadero diseñado. ....	44
Figura 30 Perspectiva “C” del invernadero diseñado. ....	45
Figura 31 Perspectiva “D” del invernadero diseñado. ....	45
Figura 32 Plano invernadero.....	46
Figura 33 Plano estructura metálica del invernadero .....	47
Figura 34 Detalles del invernadero .....	48
Figura 35 Componentes del microaspersor .....	62
Figura 36 Caudal vs presión de microaspersores. ....	63
Figura 37. Esquema de fertirrigación .....	66
Figura 38 Tolerancia de los cultivos a la salinidad .....	78
Figura 39 Poste estructural.....	83
Figura 40 Detalles del soporte lateral. ....	84
Figura 41 Detalles de ensamble de travesaños con la estructura principal .....	85
Figura 42 Diagrama conceptual para evaluar la calidad del agua de riego con base en el valor de la CE y el índice de RAS propuesta por Richards (1954) y utilizado por el Laboratorio de Salinidad de Riverside (U.S. Salinity Laboratory).....	94
Figura 43 Diagrama conceptual del sistema NF-PV.....	105
Figura 44 Diseño estructura para soporte de cultivo de fresa .....	106
Figura 45 Estructura para cultivo .....	107
Figura 46 Suministro de agua para cultivo hidropónico.....	109
Figura 47 Diagrama conceptual del sistema NF-PV.....	110
Figura 48 Irradiancia solar y flujo del rechazo durante el experimento.....	112
Figura 49 Voltaje y corriente suministrados a la bomba por el sistema fotovoltaico. ....	112
Figura 50 Potencia suministrada a la bomba en función de la irradiancia solar. ....	113
Figura 51 Presiones del sistema en función de la irradiancia solar.....	113
Figura 52 Producción de permeado en función de la irradiancia solar.....	114
Figura 53 Producción de permeado en función de la irradiancia solar.....	114
Figura 54 CE y SDT en el permeado en función de la presión de entrada P1. ....	115

## ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Suministro de planta de aguacate.....	56
Ilustración 2 Limpieza de área para plantación de aguacate.....	57
Ilustración 3 Excavación de Pozos para plantación de Aguacate .....	58
Ilustración 4 Mezcla y acarreo de Materia Orgánica .....	58
Ilustración 5 Plantación de aguacate .....	58
Ilustración 6 Relleno de pozos.....	59
Ilustración 7 Formación de cajetes en cada planta .....	59
Ilustración 8 Conclusión de plantación de aguacate .....	59
Ilustración 9 Parte de material suministrado para instalación de sistema de riego.....	61
Ilustración 10 Aspersor instalado en cultivo de aguacate.....	64
Ilustración 11 Tubería PVC suministrada.....	64
Ilustración 12 Tendido y colocación de tubería .....	65
Ilustración 13 Unión de tuberías .....	65
Ilustración 14 Armado de sistema de riego con fertirriego .....	67
Ilustración 15 Explicación del funcionamiento para puesta en marcha .....	67
Ilustración 16 Venturi instalado.....	67
Ilustración 17 Trazo y excavación de zanjas.....	68
Ilustración 18 Construcción de mampostería .....	69
Ilustración 19 Relleno y nivelación de piso .....	69
Ilustración 20 Suministro de tubería PTR y Zintro para armado de arco techo.....	70
Ilustración 21 Suministro de plástico blanco para arco-techo.....	70
Ilustración 22. Trazo y Excavación de pozos para instalación de tubos para arco techo. ....	71
Ilustración 23 Colocación de tubería PTR fijada con cemento. ....	71
Ilustración 24 Colocación de tubería arco-zintro .....	72
Ilustración 25 Fijación de tuberías para arco-techo.....	72
Ilustración 26 Extensión de plástico para invernadero .....	73
Ilustración 27 Colocación de plástico.....	73
Ilustración 28 Colocación de plástico en arco-techo. ....	74
Ilustración 29 Colocación de alambre Zig Zag para fijación de plástico. ....	74
Ilustración 30 Vista final de la instalación de arco-techo .....	75
Ilustración 31 Trazo para excavación de zanjas .....	80
Ilustración 32 Excavación de zanjas para mampostería .....	80

Ilustración 33 Relleno y nivelación de área para plancha de concreto .....	81
Ilustración 34 Construcción de mampostería .....	81
Ilustración 35 Construcción de plancha de concreto para colocación de sistema desalinizador .....	81
Ilustración 36 Perforación de las placas de sujeción y anclaje.....	86
Ilustración 37 Presentación de piezas antes de soldar. ....	86
Ilustración 38 Proceso de soldadura.....	87
Ilustración 39 Proceso de soldadura de elementos secundarios.....	87
Ilustración 40 Pre ensamblado de la estructura para paneles fotovoltaicos con primer.....	88
Ilustración 41 Pintura final de la estructura. ....	88
Ilustración 42 Pre armado de la estructura. ....	89
Ilustración 43 Orientación de la estructura.....	89
Ilustración 44 Armado de la estructura.....	90
Ilustración 45 Instalación de paneles fotovoltaicos. ....	90
Ilustración 46 vista lateral de la estructura .....	91
Ilustración 47 Vista frontal.....	91
Ilustración 48 Planta de aguacate transplanteda. ....	98
Ilustración 49 Cultivo de aguacate tratada con agua salobre .....	98
Ilustración 50 Planta de fresa. ....	100
Ilustración 51 Planta de arándano. ....	103
Ilustración 52 Unidad de Nanofiltración.....	106
Ilustración 53 Unidad de Nanofiltración.....	111
Ilustración 54 Cultivo de fresa.....	115
Ilustración 55 Cultivo de fresa regada con agua salobre tratada.....	116
Ilustración 56 Producción de fresa y arándano .....	117
Ilustración 57 Plántulas de fresa. ....	118
Ilustración 58 Acondicionamiento de las plántulas de fresa y arándano.....	118
Ilustración 59 Estructura para riego hidropónico .....	119
Ilustración 60 Estructura 1 para riego por goteo .....	119
Ilustración 61 Estructura con cultivos.....	119
Ilustración 62 Cultivos en crecimiento.....	120

## **RESUMEN EJECUTIVO**

Como parte de las actividades del proyecto se llevó a cabo la construcción de un área demostrativa en el IMTA con enfoque de proyectos productivos agro-silvo-pastoriles; como estrategia para el desarrollo productivo de zonas de inundación como Palenque-Tenosique, áreas naturales protegidas presentes en Tenosique-Calakmul y zonas de cenotes y ríos subterráneos como en Calakmul-Carrillo Puerto. Con esto, se busca favorecer el desarrollo de zonas rurales marginales habilitando tierras de cultivo que en circunstancias actuales no son aprovechadas. Además de lograr aumentar la disponibilidad hídrica local mediante el tratamiento de agua salobre lo que se traduce en estabilidad social y favorece la producción alimentaria.

En el presente informe se reporta la construcción de un área experimental para la producción de fresa, arándano y aguacate basados en agua proveniente de un sistema de desalinización alimentado con energía solar.

Este informe se integra de lo siguiente: Implementación de área demostrativa para cultivo de Aguacate, establecimiento de área demostrativa para cultivo de arándano y fresa, y la puesta en marcha del sistema de desalinización implementado en proyectos productivos.

El establecimiento del área demostrativa para cultivo de aguacate consistió en la limpia, poda, deshierbe y excavación del terreno para la plantación de aproximadamente 60 plantas de aguacate hass en sus variedades normal, Jiménez y Méndez, a este cultivo, se le implementó el riego por micro-aspersión con ferti-riego.

Para el cultivo de arándano y fresa se realizó: limpia, deshierbe, excavación de zanja, mampostería y relleno para levantamiento de piso en área inundable en época de lluvias intensas. Además, se realizó la construcción de una estructura de protección de cultivos (arco-techo) con PTR y plástico para invernadero, cubriendo una superficie total de 200 m<sup>2</sup>, para el cultivo de arándano; se suministraron 60 plántulas de Arándano azul (Blueberry)



variedad Biloxi, mientras que, para el cultivo de fresa, se adquirieron aproximadamente 450 plántulas de fresa.

Los resultados obtenidos relacionados con la implementación del sistema de desalinización en los proyectos productivos (aguacate, arándano y fresa), fueron satisfactorios ya que a la fecha las plántulas de aguacate se mantienen en crecimiento al igual que las plántulas de arándano y fresa estas últimas con producción frutal.

Se construyó el sistema de desalinización por nanofiltración alimentado por energía fotovoltaica y se logró implementar el sistema de riego por micro-aspersión y agua para consumo humano.

Se llevó a cabo el diseño, construcción y evaluación experimental de un sistema de desalinización por nanofiltración alimentado con energía fotovoltaica, en los resultados se pudo observar una relación casi lineal entre la producción de permeado y la intensidad de la irradiancia solar, lo cual también se refleja de esta manera para la producción de permeado y la presión de entrada del sistema. Se pudo observar que la CE y los SDT disminuyeron conforme se incrementó la presión de entrada del sistema.

Además, se pudo observar que la cantidad y calidad del permeado varió conforme cambió la presión de entrada, la cual a su vez depende de la irradiancia solar, por lo que se puede concluir que los sistemas NF-FV no producen agua con parámetros de calidad fijos, sin embargo, si pueden producir agua en un rango que queda por debajo de 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que lo coloca en la clasificación C1 de agua de baja salinidad.

Al sistema de desalinización se le implemento un potabilizador esto con el objetivo de poder utilizar el agua para consumo humano.

## **1 Desarrollo del Área Demostrativa de Producción Protegida y Sistemas Productivos de Fresa, Arándano y Aguacate basados en Sistema de Desalinización**

Por un lado, el Tren Maya será el principal proyecto de infraestructura del sexenio 2018-2024 y conectará las principales zonas turísticas de la Península de Yucatán. Con la construcción del Tren, se plantea, además, detonar la economía local a partir del impulso a proyectos productivos agroecológicos.

La zona del proyecto “Tren Maya”, está localizada entre ecosistemas frágiles, áreas naturales protegidas, regiones de media a muy alta vulnerabilidad, patrimonio arqueológico, además de registrar altas precipitaciones y contar con áreas de inundación (Chiapas, Tabasco) y áreas de sequía intermitente (Quintana Roo). Estas condiciones se pueden agudizar con el aumento de los flujos turísticos que demandarán agua, alimentos y energía.

Ante este escenario, se realizó un área demostrativa en el IMTA con enfoque de proyectos productivos (aguacate, arándano y fresa); como estrategia para el desarrollo productivo de zonas de inundación como Palenque-Tenosique, áreas naturales protegidas presentes en Tenosique-Calakmul y zonas de cenotes y ríos subterráneos como en Calakmul-Carrillo Puerto.

Los proyectos productivos, según la fuente de abastecimiento, pueden incluir cosecha de agua de lluvia, bombeo con energía alternativa para frutales, reforestación y conservación de la vida silvestre, explotación forestal, desalinización de agua salobre para riego en hortalizas, producción de bio-energía, etc. En este caso, se utilizó bombeo con uso de energía renovable.

El enfoque de estos proyectos, además de su socialización y capacitación, se forman cadenas de valor que impulsan el comercio de hortalizas y frutos en toda la zona del Tren Maya para atender la posible mayor demanda.

Por otro lado, tomando como referencia el plan nacional de desarrollo del gobierno federal (2019-2024), en las que se establece que uno de los temas prioritarios es garantizar el derecho humano al agua en zonas de alta vulnerabilidad. La Subcoordinación de Conservación de Cuencas y Servicios Ambientales, ha venido desarrollando una serie de proyectos basados en sistemas de desalinización. En específico estos proyectos tienen como objetivo Incrementar la disponibilidad

hídrica de buena calidad en zonas vulnerables para aplicaciones de riego agrícola, para consumo humano y/o animal. Un ejemplo de este trabajo son los resultados que se han venido generando en el marco del proyecto 879 de problemas nacionales de CONACyT. Sin embargo, a pesar de los resultados exitosos del proyecto, la integración de la desalinización en sistemas productivos sigue siendo una tarea pendiente en el área que necesita ser estudiada. Por lo anterior, en la Subcoordinación de Conservación de Cuencas y Servicios Ambientales, se tiene como objetivo principal integrar aplicaciones de sistemas productivos donde se utilicen las energías alternativas, en particular la solar, como herramienta para potenciar el desarrollo local de comunidades marginadas de manera sostenible, entre estas las comunidades y zonas de desarrollo del Tren Maya.

Por lo anterior, se ha desarrollado un área demostrativa en las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, mediante la cual se busca mostrar la pertinencia y viabilidad de la integración de la tecnología en los sistemas productivos.

### 1.1 Proyecto Ejecutivo área demostrativa

Se cuenta con una superficie de aproximadamente 1,826.16 m<sup>2</sup> y un caudal disponible de 2 L/s y se pretende aplicar una lámina diaria de 5 mm.

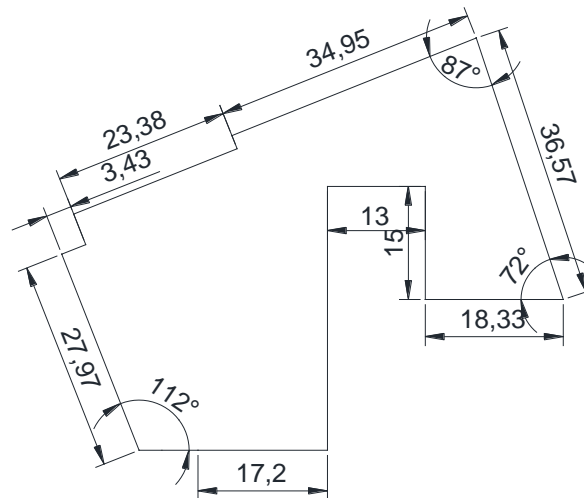


Figura 1 Esquema de la superficie a regar.

El área disponible será utilizada de la siguiente manera:

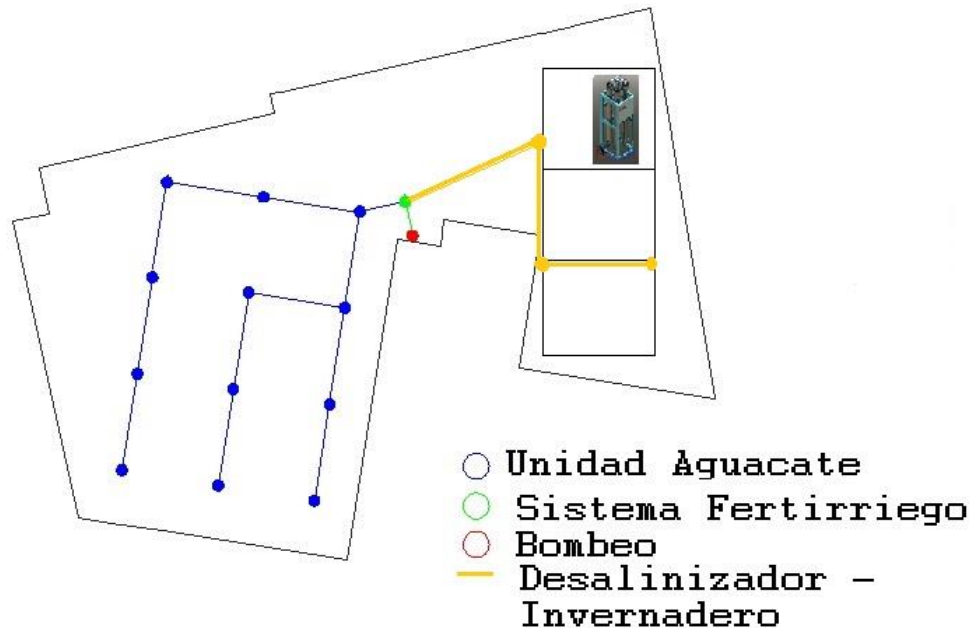


Figura 2 Esquema de líneas de distribución del agua

Como se observa en la figura 2, el punto rojo es la fuente de abastecimiento. Mismo que se trasladará a tinacos con el objetivo de alterar la salinidad de la misma, posteriormente esta pasará por el proceso de desalinización obteniendo agua libre de salinidad y lista para ser distribuida ya sea al cultivo de aguacate o a los invernaderos con cultivo de fresa y arándano.

### 1.1.1 Proyecto ejecutivo para cultivo de aguacate

#### 1.1.1.1 Diseño Agronómico

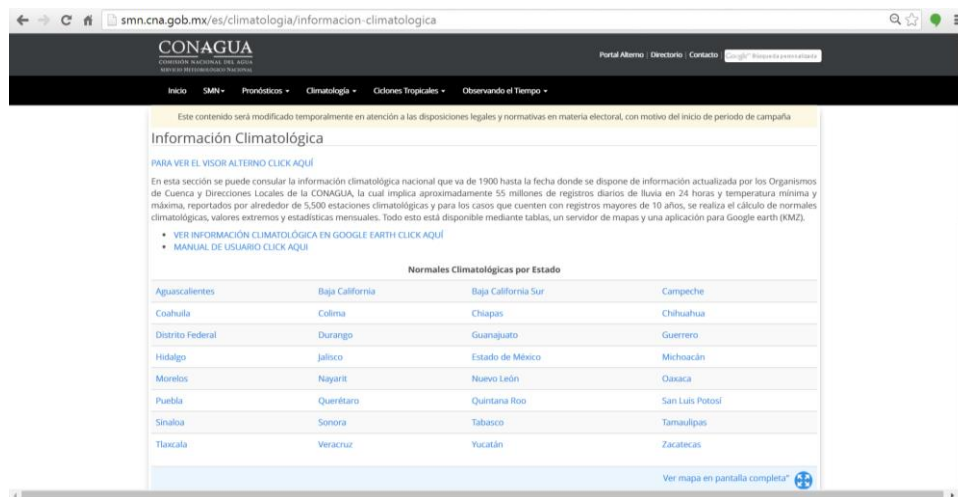
##### 1.1.1.1.1 Cálculo de requerimiento de riego

Los datos climatológicos históricos de algún sitio de interés pueden ser obtenidos de alguna de las siguientes bases de datos: Normales Climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional, ERICK III del IMTA, Climwat de la FAO, etc. En nuestro caso por su fácil disponibilidad se obtuvieron los datos del Servicio Meteorológico Nacional, para ello se accedió a su página oficial (<http://smn.cna.gob.mx>), una vez entrado a la página nos dirigimos a **Climatología Información Climatológica** tal como se muestra en la Figura 3.



*Figura 3 Página oficial del Servicio Meteorológico Nacional.*

Una vez entrado a la Información Climatológica seleccionamos el estado de interés (Figura 4) y aparecerán las estaciones climatológicas disponibles.



*Figura 4 Normales Climatológicas.*

La estación que se selecciono fue la de San Jose, y se recomienda que entre más años de datos se tengan es mejor por lo cual se seleccionó el periodo 51-10 ya que es el que cuenta con más datos (Figura 5).

NOMBRE	MUNICIPIO	CLAVE	NORMALES 1951-2010	NORMALES 1971-2000	NORMALES 1981-2010	MEDIAS Y EXTREMAS DIARIAS	MEDIAS Y EXTREMAS MENSUALES
ADICHRICO D-4	YECAPITLA	00017068	NORM 51-10	NORM 71-00	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
AHUEHUETZINGO	FUENTE DE IXTLA	00017069	NORM 51-10	-	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
ALPONOCAN	TETELA DEL VOLCAN	00017060	NORM 51-10	NORM 71-00	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
ALPUYUCA	XOCHTEPEC	00017072	NORM 51-10	NORM 71-00	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
APANCINGO	COATLAN DEL RIO	00017061	NORM 51-10	NORM 71-00	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
APLUYUCA	XOCHTEPEC	00017070	-	-	-	-	-
ATLATLAHUACAN	ATLATLAHUACAN	00017001	NORM 51-10	NORM 71-00	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
AXOCHAPAN	AXOCHAPAN	00017030	NORM 51-10	-	-	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
C.A.E. LA VICTORIA	ZACATEPEC	00017026	NORM 51-10	NORM 71-00	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
C.B.T.A. 154 HUITZILAC	HUITZILAC	00017009	NORM 51-10	NORM 71-00	-	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
CHAWARRIA	COATLAN DEL RIO	00017062	NORM 51-10	-	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
COATLAN DEL RIO	COATLAN DEL RIO	00017059	NORM 51-10	NORM 71-00	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
COLONIA EMPLEADO	CUERNAVACA	00017002	NORM 51-10	NORM 71-00	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
CUAUTLA (DGE)	CUAUTLA	00017005	NORM 51-10	NORM 71-00	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
CUAUTLA (SMN)	CUAUTLA	00017003	NORM 51-10	NORM 71-00	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
CUAUTLA	TEPECAL	00017073	NORM 51-10	NORM 71-00	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
CUENTEPEC	TEMIXCO	00017058	NORM 51-10	NORM 71-00	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
CUERNAVACA (DGE)	CUERNAVACA	00017004	NORM 51-10	NORM 71-00	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
CUERNAVACA (OBS)	CUERNAVACA	00017067	-	-	-	-	-
E.T.A. 040 AMACUZAC	AMACUZAC	00017044	NORM 51-10	NORM 71-00	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
E.T.A. 118 YECAPITLA	YECAPITLA	00017043	NORM 51-10	NORM 71-00	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
EL HIGUERON	JOZUTLA	00017074	NORM 51-10	-	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
EL LIMON	TEPALCINGO	00017057	NORM 51-10	NORM 71-00	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
EL RODEO	MICATLAN	00017006	NORM 51-10	NORM 71-00	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
EL VIGIA	TLANEPANTLA	00017066	NORM 51-10	NORM 71-00	NORM 81-10	MED-EXT DIA	MED-EXT MES
ESCUELA DE BIOLOGIA UAEM	CUERNAVACA	00017037	-	-	-	-	-

Figura 5 Lista de las Normales Climatológicas del estado de Morelos

De las normales lo datos que se consideraron son: la temperatura máxima normal, la temperatura mínima normal, la precipitación total normal, la evaporación total normal, latitud y altitud, estos datos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Datos climatológicos de la estación San Jose, Servicio Meteorológico Nacional (2016).

ESTADO DE: MORELOS				
ESTACION: 00017004 CUERNAVACA				
LATITUD: 18° 55' 07''		LONGITUD: 099° 14' 03''		
ALTURA: 1510.0 MSNM		PERIODO: 1951 – 2010		
Mes	Temp. Max. (°C)	Temp. Min. (°C)	Precipitación (mm)	Evaporación (mm)
Enero	25.2	12.2	13.6	158.3
Febrero	26.5	13.3	7.2	171.8
Marzo	28.8	15.0	5.6	222.1
Abril	30.1	16.6	15.5	228.1
Mayo	29.7	17.3	57.7	219.3
Junio	27.1	16.8	250.9	168.3
Julio	26.2	16.0	266.7	162.0
Agosto	26.1	15.9	268.1	153.6
Septiembre	25.1	15.7	256.3	132.7
Octubre	25.9	14.9	100.2	147.6
Noviembre	25.8	13.7	16.7	147.0
Diciembre	25.2	12.7	5.2	146.4



Para conocer los cultivos potenciales de la zona se consultaron las estadísticas agrícolas 2014-2015 por distritos de riego encontrando que para el DR016 Estado de Morelos y los cultivos sembrados son:

CONCENTRADO DISTRITAL							Cuadro 3.13	
							AÑO AGRÍCOLA 2013/14	
Superficie sembrada y cosechada, rendimiento, producción, precio medio rural y valor de la cosecha por ciclo, modalidad y cultivo							1a. parte	
016 ESTADO DE MORELOS, MOR.								
Ciclo	Modalidad	Cultivo	Superficie (Ha)		Rend. (Ton/Ha)	Producción (Ton)	P.M.R. (\$/Ton)	Valor de la cosecha (Miles \$)
			Sembrada	Cosechada				
<b>TOTAL GENERAL</b>			<b>20 140</b>	<b>18 328</b>	<b>75.63</b>	<b>1 386 110</b>	<b>796</b>	<b>1 102 661.69</b>
<b>Otoño-Invierno</b>			<b>2 349</b>	<b>2 349</b>	<b>9.91</b>	<b>23 279</b>	<b>5 082</b>	<b>118 296.50</b>
	<b>Riego</b>		<b>2 349</b>	<b>2 349</b>	<b>9.91</b>	<b>23 279</b>	<b>5 082</b>	<b>118 296.50</b>
		Calabacita (Calabacín)	243	243	12.00	2 916	3 000	8 748.00
		Cebolla	307	307	25.00	7 675	4 000	30 700.00
		Frijol (Alubia)	388	388	3.00	1 164	30 000	34 920.00
		Gladiola	145	145	15.50	2 248	4 600	10 338.50
		Jitomate (Tomate Rojo)	31	31	27.00	837	4 500	3 766.50
		Maíz Grano	899	899	5.00	4 495	2 700	12 136.50
		Okra	5	5	10.00	50	7 000	350.00
		Otras Hortalizas	187	187	12.00	2 244	5 000	11 220.00
		Otros Cultivos	109	109	10.00	1 090	3 300	3 597.00
		Pepino	14	14	25.00	350	4 500	1 575.00
		Tomate de Cáscara (Tomatillo)	21	21	10.00	210	4 500	945.00
<b>Primavera-Verano</b>			<b>1 865</b>	<b>1 865</b>	<b>9.72</b>	<b>18 136</b>	<b>4 870</b>	<b>88 319.50</b>
	<b>Riego</b>		<b>1 865</b>	<b>1 865</b>	<b>9.72</b>	<b>18 136</b>	<b>4 870</b>	<b>88 319.50</b>
		Arroz	524	524	12.00	6 288	5 100	32 068.80
		Cebolla	77	77	25.00	1 925	4 000	7 700.00
		Frijol (Alubia)	162	162	3.00	486	30 000	14 580.00
		Gladiola	4	4	15.50	62	4 600	285.20
		Jícama	64	64	30.00	1 920	4 500	8 640.00
		Jitomate (Tomate Rojo)	24	24	27.00	648	4 500	2 916.00
		Maíz Grano	718	718	5.00	3 590	2 700	9 693.00
		Otras Hortalizas	66	66	12.00	792	5 000	3 960.00
		Otros Cultivos	140	140	10.00	1 400	3 300	4 620.00
		Pepino	20	20	25.00	500	4 500	2 250.00
		Sorgo Grano	45	45	7.00	315	2 100	661.50
		Tomate de Cáscara (Tomatillo)	21	21	10.00	210	4 500	945.00

CONCENTRADO DISTRITAL							Cuadro 3.13	
Superficie sembrada y cosechada, rendimiento, producción, precio medio rural y valor de la cosecha por ciclo, modalidad y cultivo							AÑO AGRÍCOLA 2013/14	
016 ESTADO DE MORELOS, MOR.							2a. parte	
Ciclo	Modalidad	Cultivo	Superficie (Ha)		Rend. (Ton/Ha)	Producción (Ton)	P.M.R. (\$/Ton)	Valor de la cosecha (Miles \$)
			Sembrada	Cosechada				
<b>Perennes</b>			<b>14 993</b>	<b>13 181</b>	<b>101.21</b>	<b>1 334 020</b>	<b>636</b>	<b>848 968.89</b>
	Riego		14 993	13 181	101.21	1 334 020	636	848 968.89
		Aguacate	55	55	15.00	825	20 000	16 500.00
		Alfalfa	57	57	70.00	3 990	1 200	4 788.00
		Caña de Azúcar	13 502	11 690	112.00	1 309 235	565	739 717.89
		Guaje	35	35	8.00	280	6 000	1 680.00
		Limón	130	130	12.00	1 560	3 500	5 460.00
		Mango	120	120	17.00	2 040	3 500	7 140.00
		Otros Cultivos	306	306	10.00	3 060	3 300	10 098.00
		Otros Forrajes Verde	32	32	25.00	800	1 400	1 120.00
		Otros Frutales	400	400	12.00	4 800	4 500	21 600.00
		Papayo	46	46	20.00	920	5 500	5 060.00
		Rosal	310	310	21.00	6 510	5 500	35 805.00
<b>Segundos Cultivos</b>			<b>933</b>	<b>933</b>	<b>11.44</b>	<b>10 675</b>	<b>4 410</b>	<b>47 076.80</b>
	Riego		933	933	11.44	10 675	4 410	47 076.80
		Arroz	136	136	12.00	1 632	5 100	8 323.20
		Cacahuate	15	15	2.00	30	10 000	300.00
		Cebolla	35	35	25.00	875	4 000	3 500.00
		Frijol (Alubia)	38	38	3.00	114	30 000	3 420.00
		Jícama	117	117	30.00	3 510	4 500	15 795.00
		Jitomate (Tomate Rojo)	16	16	27.00	432	4 500	1 944.00
		Maíz Grano	382	382	5.00	1 910	2 700	5 157.00
		Otras Hortalizas	53	53	12.00	636	5 000	3 180.00
		Otros Cultivos	54	54	10.00	540	3 300	1 782.00
		Pepino	18	18	25.00	450	4 500	2 025.00
		Sorgo Grano	48	48	7.00	336	2 100	705.60
		Tomate de Cáscara (Tomatillo)	21	21	10.00	210	4 500	945.00

Figura 6 Estadísticas agrícolas 2014-2015 del DR016 Estado de Morelos.

De ellos se seleccionaron 10 los cuales se presentan en el cuadro siguiente:

Tabla 2 Cultivos seleccionados

Cultivo	Superficie (ha)
1. Maíz Grano	718
2. Frijol	388
3. Cebolla	307
4. Jitomate	31
5. Caña de azúcar	13502
6. Mango	120
7. Otras hortalizas	187
8. Limón	130
9. Alfalfa	57
10. Sorgo	45

### 1.1.1.1.2 Calculo con CROPWAT

El requerimiento de riego es la lámina de agua que ha perdido un cultivo, cultivado bajo condiciones óptimas y sin restricciones de suelo y agua, por medio de la evapotranspiración y que no ha sido restituida por aportaciones naturales de agua a su zona de raíces. La ecuación general para estimar los requerimientos de riego neto para un intervalo de tiempo definido es la siguiente:

$$Rr_n = ET_r - Pe - Am$$

Donde:

$Rr_n$  = Requerimiento de riego neto, en *mm*.

$ET_r$  = Evapotranspiración real, en *mm*.

$Pe$  = Precipitación efectiva, en *mm*.

$Am$  = Aportación del manto freático, en *mm*

Cuando el requerimiento de riego neto es ajustado por la eficiencia global del sistema de riego y las necesidades de lavado del suelo se conoce como requerimiento de riego bruto.

$$Rr_b = \frac{Rr_n}{(1 - K)EU}$$

$$K = 1 - E_a$$

$$K = FL$$

Donde:

$FL$  = Fracción de lavado, decimal.

$E_a$  = Eficiencia aplicación del sistema de riego, decimal.

$EU$  = Uniformidad de emisión, decimal.

Para calcular la FL en sistema de riego localizado se puede usar la expresión siguiente:

$$FL = \frac{EC_w}{2EC_e}$$

Donde:

$EC_w$  = Conductividad eléctrica del agua de riego

$EC_e$  = Conductividad eléctrica del extracto de suelo. Valor que se impone como objetivo a conseguir con el lavado y que depende de los cultivos a implantar.

Tabla 3 Rangos recomendados para la uniformidad de emisión, Keller – Bliesner (1990).

TIPO DE EMISOR	EMISORES POR PLANTA	TOPOGRAFÍA	RANGO DE EU
Puntual	$\geq 3$	Uniforme	90-95
Puntual	$< 3$	uniforme	85-90
Puntual	$\geq 3$	ondulada	85-90
Puntual	$< 3$	ondulada	80-90
Microasp.	-	uniforme	90-95
Microasp.	-	ondulada	85-90
Cinta riego	-	uniforme	80-90
Cinta riego	-	ondulada	70-85

Tabla 4 Valores de  $E_a$  en climas áridos, Keller (1978).

PROFUNDIDAD DE RAÍZ (m)	TEXTURA			
	muy porosa	arenosa	media	fina
$< 0.75$	0.852	0.90	0.95	0.95
0.75 – 1.50	0.90	0.90	0.95	1.00
$> 150$	0.95	0.95	1.00	1.00

Tabla 5 Valores de  $E_a$  en climas húmedos, Keller (1978).

PROFUNDIDAD DE RAÍZ (m)	TEXTURA			
	muy porosa	arenosa	media	fina
$< 0.75$	0.65	0.752	0.85	0.90
0.75 – 1.50	0.75	0.80	0.90	0.95
$> 150$	0.80	0.90	0.95	1.00

Tabla 6 Eficiencia de aplicación típicas para diferentes sistemas de riego, Ojeda et al. (2004).

Sistemas de riego	Eficiencia de aplicación (%)
Gravedad	
Surcos	35 – 85
Surcos corrugados	30 – 55
Melgas a nivel	60 – 85
Melgas en pendiente	55 – 75
Inundación sin control	15 – 35
Impulsos	50 – 85
Aspersión	
Lateral estacionario o portátil (side roll)	60 – 85
Lateral fijo	60 – 85
Cañón viajero	55 – 80
Cañón estacionario	50 – 75
Pivote central de alta presión	65 – 85

Sistemas de riego	Eficiencia de aplicación (%)
Pivote central de baja presión	75 – 90
Lateral de avance frontal movimiento lineal	80 – 90
Riego localizado	
Goteo	80 – 95
Microaspersión	75 – 90

Tabla 7 Conductividad eléctrica del suelo máxima tolerable por el cultivo obtenida a partir del extracto de saturación del suelo, Ayers y Westcot (1976).

Cultivo	$EC_e$	Cultivo	$EC_e$
Aguacate	6	Melón	16
Alfalfa	16	Naranja	8
Algodón	27	Papa	10
Brócoli	14	Rábano	9
Cebolla	8	Sorgo	18
Frijol	7	Soya	10
Fresa	4	Tomate	13
Lechuga	9	Trigo	20
Limón	8	Vid	12
Maíz	10	Zanahoria	8
Manzano y pera	8		

En el caso de no tener problemas de sales, además no tener mantos freáticos someros y al no tomar en cuenta la eficiencia del sistema de riego como es el caso del programa CROPWAT el requerimiento de riego bruto se reduce a los siguiente:

$$Rr_n = ET_r - P_e$$

$$Rr_b = \frac{Rr_n}{E_g} = \frac{ET_r - P_e}{E_g}$$

$$Rr_b = ET_r - P_e$$

Enseguida se muestra el cálculo de la evapotranspiración y precipitación efectiva.

Para el cálculo de la evapotranspiración se usó el método de Penman Monteith a través del software CROPWAT 8.0 con los datos meteorológicos de la estación meteorológica de Cuernavaca, obteniéndose los siguientes resultados.

Monthly ETo Penman-Monteith - untitled

Country: Mexico Station: Cuernavaca  
 Altitude: 1510 m. Latitude: 18.92 °N Longitude: 99.23 °E

Month	Min Temp °C	Max Temp °C	Humidity %	Wind km/day	Sun hours	Rad MJ/m <sup>2</sup> /day	ETo mm/day
January	12.2	25.2	72	173	7.9	16.8	3.24
February	13.3	26.5	72	173	8.2	18.9	3.74
March	15.0	28.8	72	173	8.9	21.8	4.52
April	16.6	30.1	72	173	9.1	23.4	5.04
May	17.3	29.7	74	173	8.9	23.2	5.05
June	16.8	27.1	77	173	7.7	21.4	4.48
July	16.0	26.2	77	173	7.7	21.3	4.33
August	15.9	26.1	77	173	7.5	20.9	4.23
September	15.7	25.1	78	173	6.7	18.9	3.76
October	14.9	25.9	75	173	7.4	18.3	3.66
November	13.7	25.8	74	173	7.7	16.8	3.35
December	12.7	25.2	73	173	7.7	15.9	3.11
Average	15.0	26.8	74	173	7.9	19.8	4.04

Figura 7 Datos meteorológicos de la estación meteorológica de Cuernavaca

Tabla 8 Evapotranspiración de referencia para Cuernavaca.

Mes	Temp Min (°C)	Temp Max (°C)	Humedad (%)	Viento (km/día)	Insolación (h)	Rad (MJ/m <sup>2</sup> /día)	ETo (mm/día)
Enero	12.2	25.2	72	173	7.9	16.8	3.24
Febrero	13.3	26.5	72	173	8.2	18.9	3.74
Marzo	15	28.8	72	173	8.9	21.8	4.52
Abril	16.6	30.1	72	173	9.1	23.4	5.04
Mayo	17.3	29.7	74	173	8.9	23.2	5.05
Junio	16.8	27.1	77	173	7.7	21.4	4.48
Julio	16	26.2	77	173	7.7	21.3	4.33
Agosto	15.9	26.1	77	173	7.5	20.9	4.23
Septiembre	15.7	25.1	78	173	6.7	18.9	3.76
Octubre	14.9	25.9	75	173	7.4	18.3	3.66
Noviembre	13.7	25.8	74	173	7.7	16.8	3.35
Diciembre	12.7	25.2	73	173	7.7	15.9	3.11
Promedio	12.2	25.2	72	173	7.9	16.8	3.24



Para calcular el requerimiento de riego se calculó la precipitación efectiva con el método de la USDA con ayuda del software CROPWAT 8.0, los resultados se muestran a continuación.

	Rain mm	Eff rain mm
January	13.6	13.3
February	7.2	7.1
March	5.6	5.5
April	15.5	15.1
May	57.7	52.4
June	250.9	150.1
July	266.7	151.7
August	268.1	151.8
September	256.3	150.6
October	100.2	84.1
November	16.7	16.3
December	5.2	5.2
<b>Total</b>	<b>1263.7</b>	<b>803.2</b>

Figura 8 Resultados del requerimiento de riego obtenido

Tabla 9 Precipitación efectiva para Cuernavaca.

Mes	P (mm)	Pe (mm)
<b>Enero</b>	10.4	10.2
<b>Febrero</b>	5.1	5.1
<b>Marzo</b>	5.0	5.0
<b>Abril</b>	11.5	11.3
<b>Mayo</b>	62.8	56.5
<b>Junio</b>	241.9	148.3
<b>Julio</b>	245.9	149.2
<b>Agosto</b>	225.4	144.1
<b>Septiembre</b>	260.7	151.1
<b>Octubre</b>	108.9	89.9
<b>Noviembre</b>	14.8	14.4
<b>Diciembre</b>	9.1	9.0

Una vez teniendo la evapotranspiración y la precipitación efectiva con ayuda de CROPWAT se calcula el requerimiento de riego para cada uno de los cultivos seleccionados.

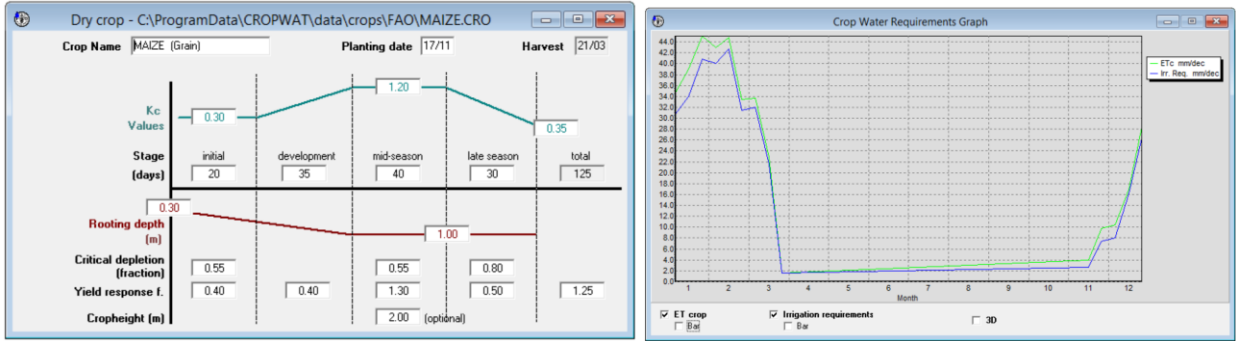


Figura 9 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de maíz.

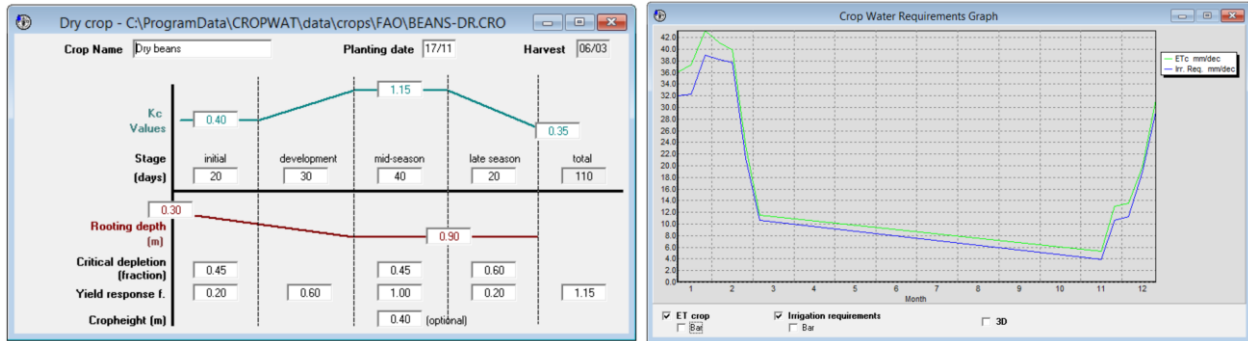


Figura 10 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de frijol

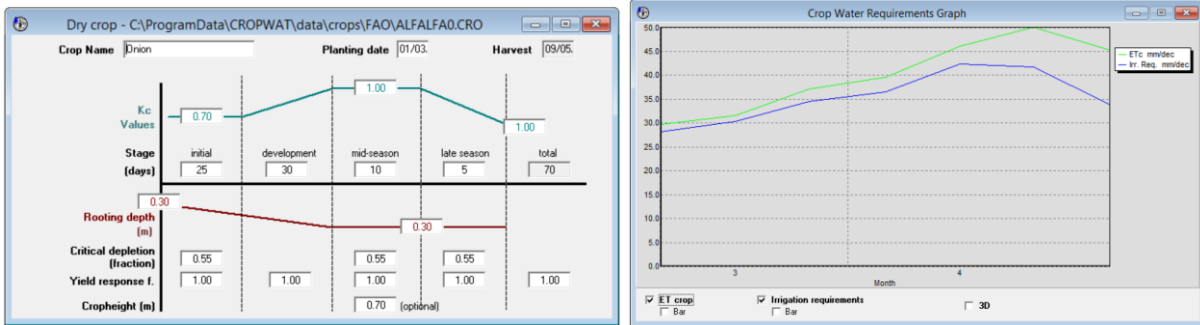


Figura 11 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de cebolla

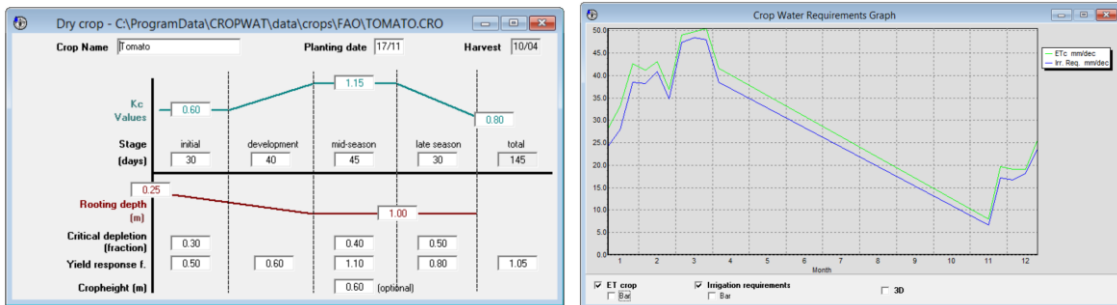


Figura 12 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de jitomate

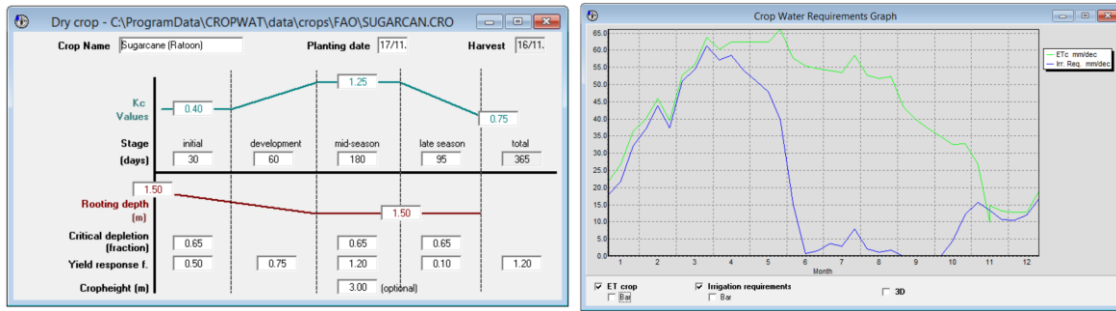


Figura 13 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de caña de azúcar

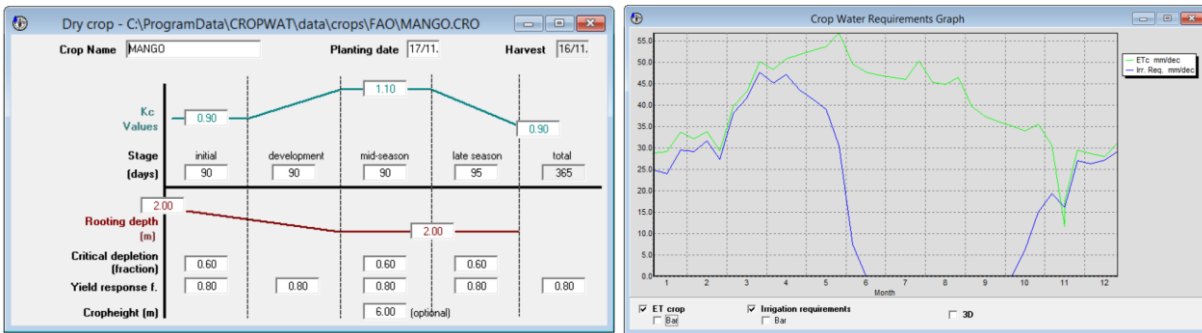


Figura 14 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de mango

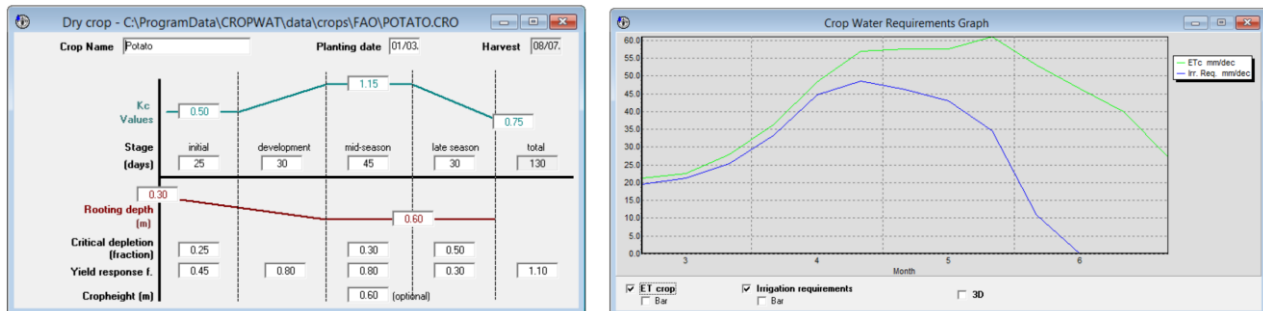


Figura 15 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de otras hortalizas

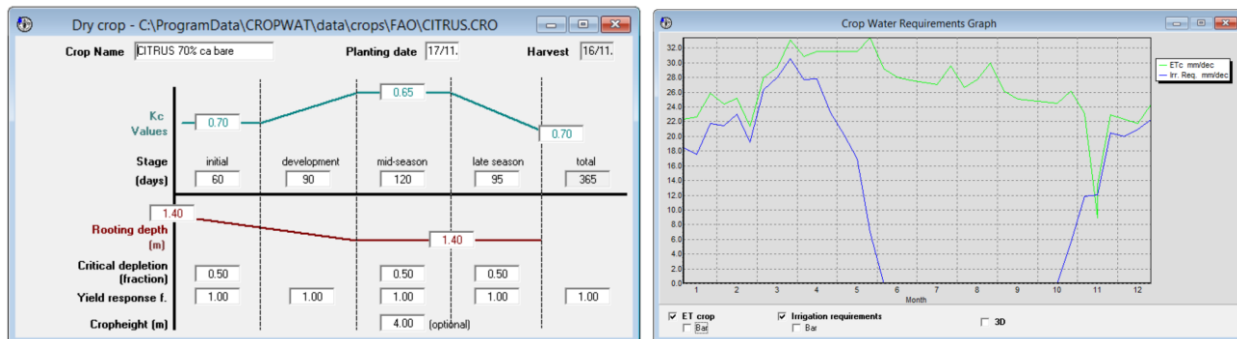


Figura 16 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de limón

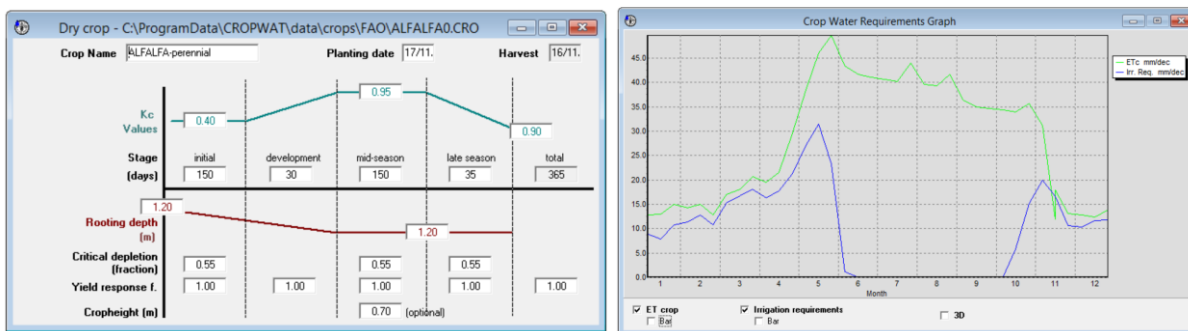


Figura 17 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de alfalfa

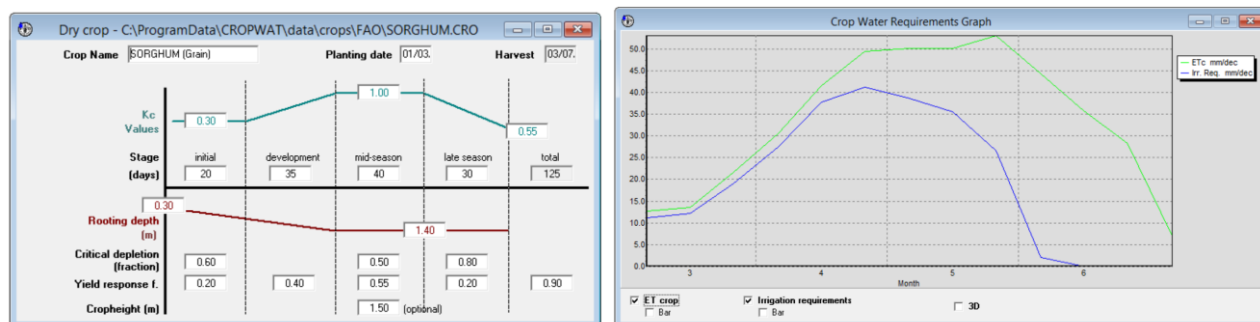


Figura 18 Cálculo de requerimiento de riego para cultivo de sorgo

Una vez teniendo el requerimiento de riego máximo para los 10 cultivos se calcula una media ponderada.

Tabla 10 Medida ponderada de cultivos

Cultivo	Superficie (ha)	RR <sub>max</sub> (mm/día)
1. Maíz Grano	718	4.25
2. Frijol	388	3.90
3. Cebolla	307	5.00
4. Jitomate	31	4.85
5. Caña de azúcar	13502	6.15
6. Mango	120	4.75
7. Otras hortalizas	187	6.10
8. Limón	130	3.05
9. Alfalfa	57	3.15
10. Rosal	45	5.50

$$RR_{max} = \frac{4.25 * 718 + 3.90 * 388 + 4.85 * 31 + 6.15 * 13502 + 4.75 * 120 + 3.05 * 130 + 3.15 * 57}{15485}$$

$$RR_{max} = 5.93 \text{ mm/día}$$

### 1.1.1.1.3 Lamina de Riego

$$Lm = \frac{(CC - PMP)}{100} (1 - PC) DaZ \left( \frac{P}{100} \right)$$

Donde:

$Lm$  = Lamina media aplicada por riego, en mm.

$CC$  = Capacidad de campo, en %.

$PMP$  = Punto de marchitamiento permanente, en %.

$PC$  = Punto crítico al cual se pretende dar los riegos. Es el valor de humedad aprovechable a la cual se establece dar el riego, expresado en decimal.

$Da$  = Densidad aparente relativa, adimensional.

$Z$  = Profundidad del suelo que se desea mojar, en mm.

$P$  = Porcentaje de área humedecida.

$$Lm = \frac{28 - 14}{100} (1 - 0.8)(1.2)(400) \left( \frac{60}{100} \right) = 8.01 \text{ mm}$$

### 1.1.1.1.4 Intervalo de Riego

$$I = \frac{L_{max}}{RR_{max}}$$

Donde:

$L$  = Lamina máxima aplicada, en mm.

$RR$  = Requerimiento de riego del mes de máxima demanda, en mm/día.

$$I = \frac{8.01}{5.93} = 1.35 \text{ días}$$

$$I = 1$$

### 1.1.1.1.5 Tiempo de riego

$$tr = \frac{L_r * S_g * S_L}{q}$$

Donde:

$t_r$  = En horas.

$L_r$  = En mm.

$S_g$  = Separación de aspersores, en m.

$S_L$  = Separación entre laterales, en m.

$q$  = En lph.

$$tr = \frac{5.93 * 9 * 9}{749} = 0.64 \text{ h}$$

### 1.1.1.1.6 Unidades Operacionales

$$N \leq \frac{h * I}{t_r}$$

Donde:

$N$  = Número de unidades operacionales, número entero.

$h$  = Número de horas por días que se pretende regar, en h/día.

$I$  = Intervalo de riego, en días.

$t_r$  = Tiempo de riego calculado para el mes de máxima demanda, en h.

$$N \leq \frac{6 * 1}{0.64} \leq 9.38$$

$$N = 9$$

### 1.1.1.2 DISEÑO HIDRÁULICO

Se cuenta con una superficie de aproximadamente 1,826.16 m<sup>2</sup> y un caudal disponible de 2 L/s y se pretende aplicar una lámina diaria de 5 mm.



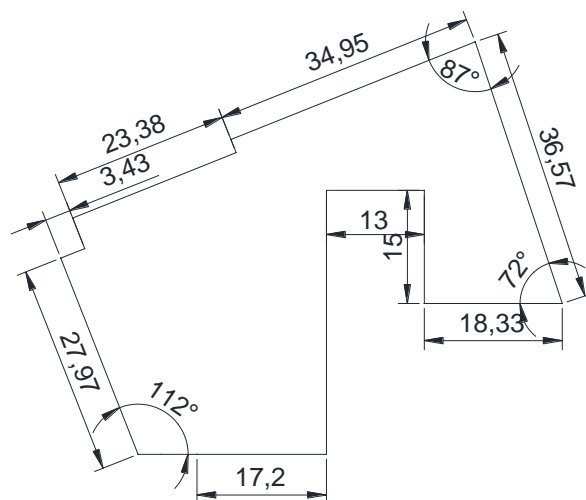



Figura 19 Esquema de la superficie a regar.

### 1.1.1.2.1 Selección de un emisor

Se propone emplear un micro aspersor Xcel-Wobbler de la marca Senninger, con boquilla #11- Amarillo (4.37 mm), por lo que se realizó un análisis de sus características, tal como se muestra en la tabla 5. Es importante mencionar que la última columna de la tabla 5 presenta el número de emisores que podrían funcionar simultáneamente con el caudal de 2 L/s.

Tabla 11 Datos de la Boquilla #11 – Amarillo (4.37 mm)

	Presión		Caudal		Diámetro		Núm. de Aspersores
	bar	M	L/hr	L/s	HA	MA	
	0.690	7.038	611	0.170	13.6	11.0	11
	1.030	10.506	749	0.208	15.4	12.7	9
	1.380	14.076	865	0.240	15.7	13.1	8
	1.720	17.544	968	0.269	16.5	13.4	7

Con la información de la tabla 1 se realizó una regresión para obtener la ecuación del emisor:

$$Q = 0.0637H^{0.5027}$$

Con  $H$  en m y  $Q$  en L/s.

De la tabla 1, se observa que, para una presión de 10 metros de columna de agua, se tiene un diámetro aproximadamente de 15 m (ángulo alto), por lo que se empleó este valor de diámetro mojado para realizar una propuesta de acomodo de los emisores.

#### 1.1.1.2.2 Arreglo de emisores

Se propone un arreglo de 9x9, así como dividir la superficie bajo riego en tres subunidades, por lo que se tiene el arreglo mostrado en la figura 3.

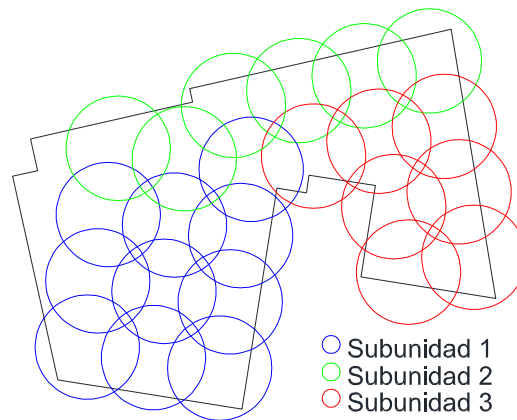


Figura 20 Arreglo de aspersores y separación de subunidades.

#### 1.1.1.2.3 Trazo

El trazo de la tubería se realizó en función del arreglo propuesto de emisores, quedando como se muestra en la figura 4.

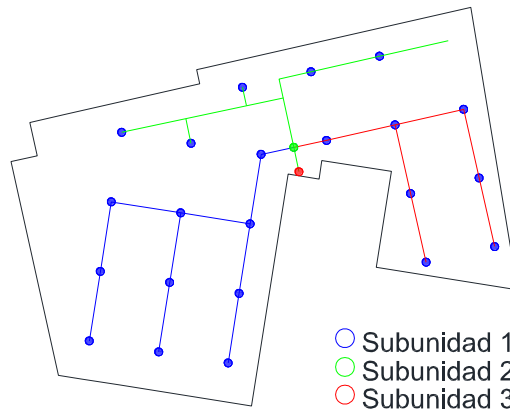


Figura 21 Líneas de distribución de cada subunidad.

#### 1.1.1.2.4 Caudal requerido

Se tiene que, de acuerdo al arreglo propuesto, cada subunidad requiere un total de 7 emisores, los cuales se proponen que trabajen en promedio con una carga de 10 m. Por lo que de la ecuación (1) se tiene:

$$Q = 0.0637(10)^{0.5027} = 0.203 \text{ L/s}$$

Para la subunidad 1 requerirá un caudal ( $Q_{su}$ ) de:

$$Q_{su} = NQ = 10(0.203) = 2.03 \text{ L/s}$$

Para la subunidad 2 requerirá un caudal ( $Q_{su}$ ) de:

$$Q_{su} = NQ = 6(0.203) = 1.22 \text{ L/s}$$

Para la subunidad 3 requerirá un caudal ( $Q_{su}$ ) de:

$$Q_{su} = NQ = 7(0.203) = 1.42 \text{ L/s}$$

Es decir, el caudal máximo del sistema será de 2.30 L/s.

### 1.1.1.2.5 Diseño de la tubería

Se propuso emplear tubería de Polietileno para las líneas de conducción, por lo que es factible proponer un solo diámetro para todas las líneas del sistema, mismo que se obtuvo empleando el método de la velocidad permisible, el cual establece que las velocidades máximas permisibles ( $V_p$ ) fluctúan entre 5 ft/s (1.52 m/s) y 10 ft/s (3.05 m/s). Para cuestiones de cálculo se utiliza el valor de 7 ft/s (2.13 m/s).

Para determinar el diámetro que cumpla con esta condición se realizó la siguiente deducción:

$$Q = A V_p = \frac{\pi D^2}{4} V_p$$

Por lo tanto:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V_p}}$$

Por lo que sustituyendo en (3), se tiene:

$$D = \sqrt{\frac{4(0.002027)}{\pi(2.3)}} = 0.033m$$

Es decir, se requiere una tubería de 33 mm de diámetro que equivale a 1.319 in aproximadamente. Por lo anterior se propone emplear manguera de 1.5 in de diámetro.

Empleando el diámetro propuesto se calculó la velocidad presente en la tubería, tanto en el caso que se conduce el caudal máximo (2.03 L/s) como en el que se conduce el mínimo (0.2027 L/s), dando como resultado:

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{4Q_{m\acute{a}x}}{\pi D^2} = \frac{4(0.002027)}{\pi (0.0381)^2} = 1.778 \text{ m/s}$$

$$V_{m\acute{i}n} = \frac{4Q_{m\acute{i}n}}{\pi D^2} = \frac{4(0.000203)}{\pi (0.0381)^2} = 0.178 \text{ m/s}$$

Se observa que la velocidad máxima está dentro del rango permitido, sin embargo, la velocidad mínima es muy bajo, por lo que se recomienda un dispositivo de filtración para evitar sedimentación dentro de la tubería.

### 1.1.1.2.6 Pérdida de carga

Por su parte, la pérdida de carga ( $h_f$ ) se estimó empleando la ecuación de Hazen-Williams.

$$h_f = 10.648 \left( \frac{Q}{C} \right)^{1.852} \frac{L}{(D)^{4.871}}$$

Donde  $C$  es el coeficiente de Hazen-Williams (150 para el PVC y PE),  $Q$  es el caudal que pasa por el conducto en  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $D$  y  $L$  son diámetro y longitud de la tubería respectivamente en m.

El punto hidráulicamente más alejado es el extremo de la subunidad 1, por lo que es para el cual se determinó la pérdida de carga por fricción.

La pérdida de carga máxima por fricción se presentó en el extremo final de la subunidad 1, con un valor de 1.893 m, sin embargo, el desnivel topográfico con respecto a la posición del cabezal de riego es tal que se ganan 0.750 m de carga, por lo que se requieren solamente 1.14 m.

### 1.1.1.2.7 Filtro

Se requiere de un filtro que tenga la capacidad de conducir un caudal de 2.027 L/s (7.297  $\text{m}^3/\text{h}$ ), por lo que se propone el empleo de un Filtro de Discos en forma "T" 1.5" de 120 mesh, cuya curva de pérdida de carga se muestra en la figura 5.

De la figura 5, se obtiene que para una caudal de 7.297  $\text{m}^3/\text{h}$ , el filtro de discos, genera una pérdida de carga de 0.275  $\text{kg}/\text{cm}^2$ , lo que equivale a 2.75 m.

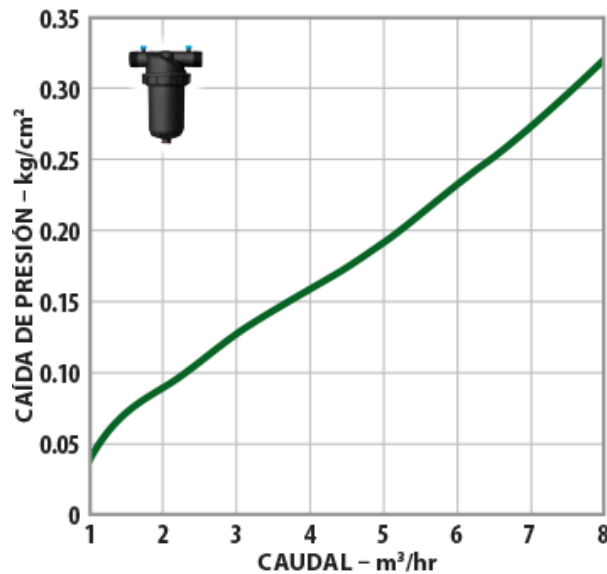


Figura 22 Curva característica del filtro.

#### 1.1.1.2.8 Carga requerida por la bomba

La carga total del sistema se estima con la expresión:

$$H_s = H_o + H_e + H_z + h_{filtro} + \sum h_f + \sum h_x$$

Donde  $H_o$  es la carga de operación del emisor que se ha propuesto de 10 m,  $H_e$  la altura del elevador (1.5 m),  $H_z$  es el desnivel topográfico (-0.750 m),  $h_{filtro}$  es la pérdida de carga por el filtro (2.750 m),  $h_f$  representa a las pérdidas de carga por fricción (1.893 m) y  $h_x$  a las pérdidas de carga localizadas que por cuestiones prácticas se propuso del 20% de las de fricción (0.379 m).

Sustituyendo queda:

$$H_s = 10.000 + 1.500 - 0.750 + 2.750 + 1.893 + 0.379 = 15.772 \text{ m}$$

#### 1.1.1.2.9 Bomba

Se pretende emplear un sistema de abastecimiento de agua a base de energía renovable, por lo que se propone la bomba SQFlex Solar modelo 16 SQF-10, cuya curva característica presentada por el fabricante se muestra en la figura 6.

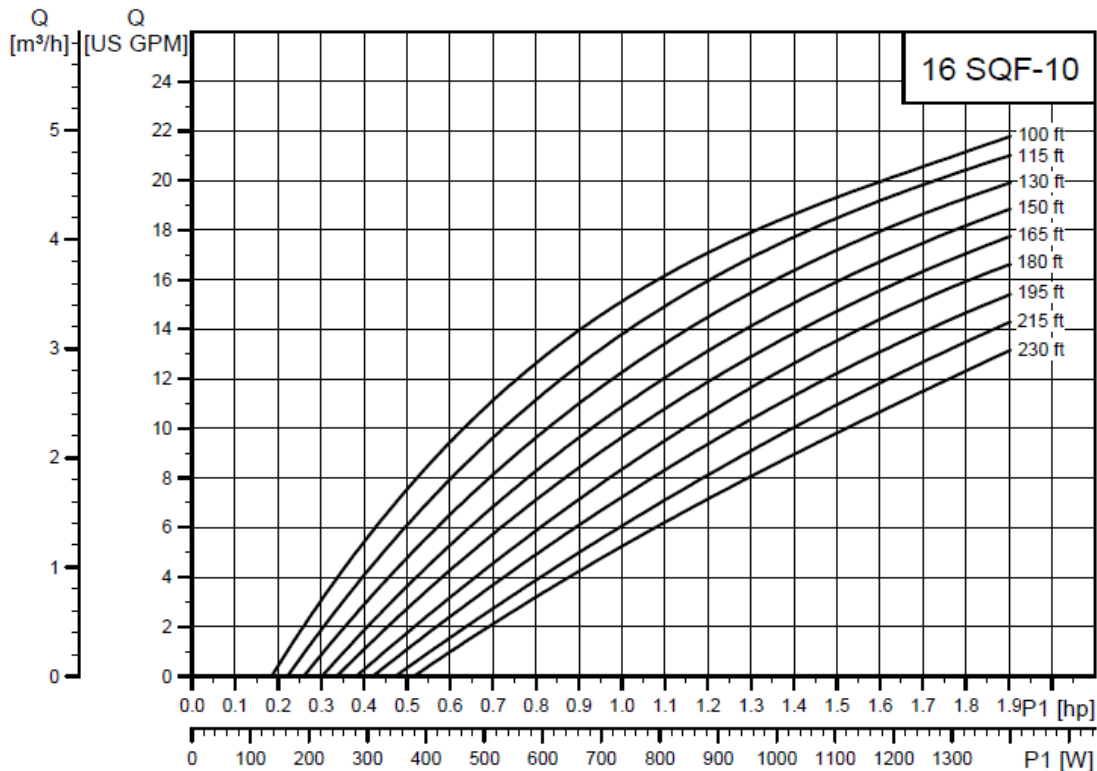


Figura 23 Curva característica de la bomba.

De la figura 6, se observa que el fabricante no presenta la curva característica para una carga de 51.74 ft (15.772 m), por lo que se recomienda realizar el aforo de la bamba a dicha carga.

### 1.1.1.3 DISEÑO ENERGÉTICO

#### 1.1.1.3.1 Principio fotoeléctrico

La base sobre la cual se fundamentan los actuales sistemas fotovoltaicos comerciales es el denominado principio fotoeléctrico, mediante el cual las radiaciones de la luz solar se transforman en energía eléctrica, este efecto se origina mediante celular fotoeléctricas o células fotovoltaicas las cuales son la unidad básica que componen los módulos solares.

Las células fotovoltaicas son producidas a partir de silicio monocristalino, este dispositivo electrónico permite transformar la energía lumínica (fotones) en energía eléctrica (flujo de electrones libres) mediante el efecto fotoeléctrico, generando energía solar fotovoltaica. Las



celdas están compuestas de silicio tipo  $N^2$  en la capa superior, en la capa inferior contienen silicio tipo  $P^3$ , estas capas presentan un efecto fotoeléctrico, es decir, absorben fotones de luz y emiten electrones. Cuando estos electrones libres son capturados, el resultado es una corriente eléctrica que puede ser utilizada como electricidad.

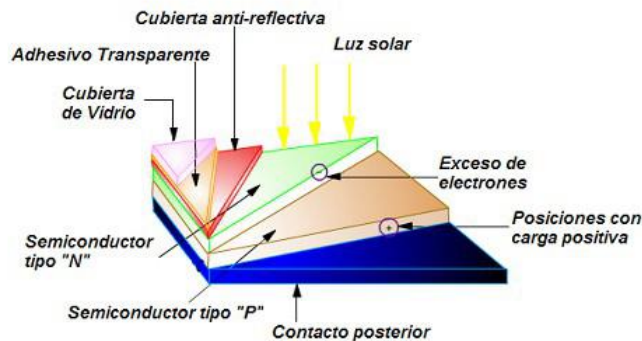


Figura 24 Creación de un campo eléctrico permanente, a través de una PN, entre dos capas dopadas respectivamente de (huecos) electrones positivos (P) y electrones con carga negativa (N) donde el material permanece eléctricamente neutro.

### 1.1.1.3.2 Selección de módulos solares

Estos dispositivos son los encargados de captar la radiación solar y transformarla en electricidad generando una corriente continua (CC), también llamada corriente directa (DC), el número de paneles solares quedara determinado por la potencia que se necesita suministrar, su disposición y conexión (en serie o en paralelo), será en función de la tención nominal de suministro y la intensidad de corriente que se desee generar.

Los módulos solares LDK-240W-20 Monocristalinos ofrecen:

- Calidad y certificaciones de seguridad bajo las normas ISO 9000 e ISO 9001.
- Durabilidad y la seguridad.
- Alta fiabilidad con garantía de 0 / +5 W de potencia pico.
- Excelente rendimiento en entornos con poca luz.

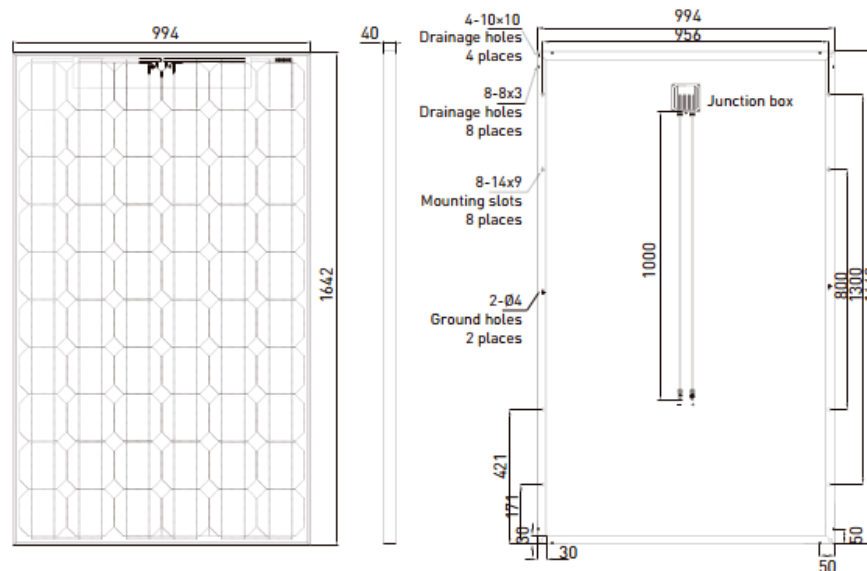


Figura 25 Dimensiones de los Módulos Solares LDK-240D-20.



Figura 26 Vista frontal y trasera de los Módulos Solares LDK-240D-20

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS (STC*)		RENDIMIENTO ELÉCTRICO A NOCT	
Tipo	240 D-20	Tipo	240 D-20
Potencia nominal (P <sub>máx</sub> ) [W]	240	Potencia nominal (P <sub>máx</sub> ) [W]	174
Potencia mínima garantizada [W]	232.8	Tensión a P <sub>máx</sub> (V <sub>mp</sub> ) [V]	27.7
Clasificación de potencia Flash Test	0/+5 W	Corriente a P <sub>máx</sub> (I <sub>mp</sub> ) [A]	6.28
Tensión a P <sub>máx</sub> (V <sub>mp</sub> ) [V]	32.2	Tensión de circuito abierto (V <sub>oc</sub> ) [V]	34.3
Corriente a P <sub>máx</sub> (I <sub>mp</sub> ) [A]	7.45	Corriente de cortocircuito (I <sub>sc</sub> ) [A]	6.79
Tensión de circuito abierto (V <sub>oc</sub> ) [V]	37.3	CARACTERÍSTICAS DE TEMPERATURA	
Corriente de cortocircuito (I <sub>sc</sub> ) [A]	8.39	Tipo	Serie LDK-D-20
Tensión máxima del sistema		NOCT**	45±2 °C
Corriente máxima de fusible serie		Coefficiente de temperatura de P <sub>máx</sub>	-0.47 % / °C
Eficiencia de célula [%]	17.25	Coefficiente de temperatura de V <sub>oc</sub>	-0.34 % / °C
Eficiencia de módulo [%]	14.70	Coefficiente de temperatura de I <sub>sc</sub>	0.06 % / °C
		Temperatura en funcionamiento	-40°C to +85°C

Figura 27 Cara Características eléctricas de los Módulos Solares LDK-240W-20, STC\*es una condición estándar de medida: Irradiación 1000 W/m<sup>2</sup>, Temperatura del módulo 25 °C, Distribución espectral AM 1.5, NOCT: irradiación 800 W/m<sup>2</sup>, Temperatura del módulo 45 +- 2°

### **1.1.2 Proyecto ejecutivo del invernadero para cultivo de fresa y arándano**

El objetivo del presente radica en el diseño para construir un invernadero de 200 m<sup>2</sup>, el cual será construido en las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua ubicado en el municipio de Jiutepec, Morelos. El trabajo está integrado por una memoria descriptiva, especificaciones del invernadero, planos, catálogo de partes, y catálogo de precios.

La diversificación productiva, tan necesaria en los tiempos actuales, nos indica la necesidad de mejorar nuestros sistemas de producción de hortalizas y flores. Un invernadero es una herramienta muy útil para producirlas fuera de temporada, conseguir mayor precocidad, aumentar los rendimientos, acortar los ciclos vegetativos de las plantas, mejorar la calidad de los cultivos mediante una atmósfera interior artificial y controlada.

#### **1.1.2.1 Descripción general del invernadero**

A partir de datos de ubicación, descripción del terreno, fotografías, plano topográfico, y mediciones de campo se realizó el diseño de un invernadero de doble función: Producción hortícola y Captación de agua de lluvia.

- El invernadero estará integrado por dos naves, cada nave tendrá 100 m<sup>2</sup>, la longitud de cada nave es de 20 m y el ancho es de 5 m, el área total es de 200 m<sup>2</sup>. Además, será desarmable ya que la estructura estará totalmente sujeta mediante tornillería de alta resistencia.
- La altura de cada columna será de 4.0 m sobre el nivel del suelo (en promedio por nivelación), y la altura de cada arco es de 1.5, lo que lleva a una altura en la parte media de cada nave de 5.5 m sobre el nivel del suelo.
- Para mejorar la captación del agua de lluvia, y además reducir los riesgos por la incidencia de bajas temperaturas, el techo de cada nave será tipo túnel.
- En el armazón de la estructura metálica será utilizado PTR galvanizado de diferentes medidas, así también como tornillería de varios calibres.

- La cimentación de la estructura metálica al suelo se realizará mediante anclas de PTR galvanizado, reforzadas con concreto.
- Como cubierta en ambas naves será colocada en el techo y en las laterales, plástico blanco lechoso y malla anti-áfidos respectivamente.
- La sujeción de las cubiertas al armazón metálico se hará por medio de perfil sujetador tipo greca y alambre galvanizado en forma de zigzag.
- En la parte frontal del invernadero será construida una caseta, la cual servirá para el ingreso y egreso al invernadero, ésta tendrá una puerta corrediza y estará cubierta con el mismo plástico utilizado para la cubierta del invernadero.
- El piso de la caseta de ingreso tendrá un desnivel en el cual se podrán desinfectar los zapatos al entrar al invernadero.
- Para mejorar la ventilación, y evitar cambios bruscos de temperatura dentro del invernadero, cada lateral tendrá cortinas enrollables mediante malacates de acero.
- Para la evacuación y conducción del agua de lluvia serán utilizadas canaletas de lámina ubicadas en la parte media y en los costados de ambas naves, además se incluirán resumideros en la parte final de cada canaleta para el desalojo del agua de lluvia.
- Será utilizado un sistema de conducción de agua para llevar el agua desde el invernadero hasta la cisterna de captación de agua de lluvia.
- Para el tutoreo de las plantas serán colocadas varias líneas de cable de acero.

## **1.1.2.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS**

### **1.1.2.2.1 Actividades en el Terreno Destinado al Invernadero**

#### **1.1.2.2.1.1 Desmante y eliminación de escombros**

Desmante:

Se entenderá por desmante a: la eliminación de especies vegetales tanto vivas como muertas (secas), incluyendo especies herbáceas, de matorral o árboles. La limpieza deberá realizarse en el área destinada para el invernadero y 10 m lineales al contorno (según sean los límites del terreno). Las tareas de limpieza pueden realizarse de forma manual (deshierbe con manos), mecánica (utilización de desbrozadora, podadora y/o motosierra) o de forma química (realizar aspersiones sobre la hierba de herbicidas).

Los restos de plantas, árboles y arbustos deberán colocarse fuera de cualquier área de trabajo.

Eliminación de escombros:

Se nombrará eliminación de escombros a: las acciones de trabajo que conlleven al retiro de restos de construcción, piedras, tierra, troncos, y cualquier otro material que obstruya la edificación del invernadero.

#### **1.1.2.2.1.2 Nivelación del terreno**

Nivelación del terreno:

Se entenderá por nivelación a la remoción de capas de terreno natural con el objetivo de alinear el terreno de manera horizontal.

Delineado del terreno:

El delineado del terreno hará referencia a limitar el área destinada para el invernadero, marcando con un hilo los límites (a lo largo y a lo ancho) de las naves, para ello se marcará un área de 20 m de largo por 10 m de ancho (200 m<sup>2</sup>).

Trazo del terreno:

Se entenderá por trazo a los trabajos a realizar para proporcionar el direccionamiento al invernadero, y ubicar el posicionamiento de cada una de las estructuras base del invernadero.

Las estructuras base del invernadero son aquellas con las que el invernadero será sujetado al suelo.

De forma longitudinal se marcarán tres líneas rectas, con una separación de 2.5 m entre líneas y una longitud de 20 m, en cada línea serán marcados 7 puntos distanciados entre sí a 2 m, en estos puntos marcados (20 puntos en total) será colocada una estructura base para el sustento del invernadero.

#### **1.1.2.2.1.3 Ahoyado y cimentación**

Ahoyado:

Entiéndase por ahoyado a la actividad de realizar huecos en el suelo de trabajo, estos huecos serán utilizados para colocar las estructuras base del invernadero. Cada hueco será excavado en los puntos marcados con anterioridad.

Los huecos en el suelo tendrán un diámetro de 30 cm por 80 cm de profundidad. Para apoyarse en esta actividad puede utilizarse un barrenador manual, zapapico, pala o barreta de metal.



#### Estructura base:

Entiéndase por estructura base del invernadero o ancla a las constituyes metálicas colocadas dentro de los hoyos y cimentadas con concreto.

Cada ancla está hecha de un tramo de un metro de longitud de PTR galvanizado de 1 ½" X 1 ½" calibre 14, en el extremo inferior de ésta va soldado en forma transversal un tramo de 20 cm de PTR galvanizado de ½" X ½" calibre 14.

Las anclas serán niveladas y alineadas de acuerdo al trazo del terreno y del invernadero, posteriormente el hueco será relleno con concreto hidráulico de una resistencia de 200 kg/cm<sup>2</sup> para cimentar las anclas.

#### Cimentación:

Se nombrará cimentación a las actividades destinadas a fijar en el suelo las estructuras base del invernadero con concreto hidráulico.

La cimentación sujetara y soportara la estructura metálica del invernadero, además de transmitir las cargas originadas del invernadero al terreno subyacente.

Se entenderá por concreto hidráulico al producto fabricado en planta o in situ resultante de la mezcla de cemento portland, agua y agregados pétreos, en proporciones adecuadas para lograr la resistencia a la compresión requerida para cada estructura, pudiendo o no tener aditivos para su mejoramiento, colocado en el sitio de la obra.

Los materiales que intervienen en la fabricación del concreto hidráulico son:

- Cemento portland tipo I.
- Arena (agregado fino).

- Grava (agregado grueso que puede variar de  $\frac{3}{4}$ " a  $1\frac{1}{2}$ ").
- Agua.

La construcción de estructuras con concreto hidráulico deberá hacerse de acuerdo con las líneas, elevaciones y dimensiones que señale el proyecto. El concreto empleado en la construcción, en general, deberá tener una resistencia a la compresión por lo menos igual al valor indicado para cada una de las estructuras de la obra, conforme a los planos estructurales y especificaciones de resistencia y acabados.

#### **1.1.2.2.1.4 Estructura Metálica del Invernadero**

Todas las piezas metálicas utilizadas para la construcción del invernadero deben ser de acero galvanizado por inmersión en baño caliente. Es decir que las partes metálicas son sumergidas en un baño de cinc derretido a 470 °C.

El baño en cinc protege a las piezas metálicas contra la corrosión producida principalmente por el medio ambiente circundante.

Las dimensiones de las estructuras estarán dadas en pulgadas (") y en metros (m). El calibre hará mención al espesor de los materiales a utilizar en la construcción del invernadero. Los calibres utilizados en el diseño están dados en números par.

#### **1.1.2.2.1.5 Columnas**

Las columnas son las estructuras metálicas encargadas de soportar el peso del invernadero, tanto de la misma estructura metálica, como de las cubiertas, el peso que se adiciona por la carga del cultivo producido (ej. Jitomate de tipo indeterminado), y además el peso proporcionado por el agua de lluvia, granizo o la presión ejercida por el viento.

Cada columna estará hecha de PTR cuadrado y galvanizado calibre 14 de 2" X 2", y tendrán una longitud de 4 m a partir del nivel del suelo, estas columnas se colocarán sobre los

extremos superiores de cada ancla, y se ensamblarán a éstas por medio de 3 tornillos galvanizados de 3/8" de diámetro por un largo de 2 1/2" con tuerca de 3/8" con inserto interior de nylon.

Longitudinalmente las columnas serán ubicados a cada 4 m a lo largo y a cada 5 m a lo ancho del invernadero. La altura de cada poste será de 4 m a partir del nivel del suelo, con un desnivel del 3% hacia la fachada frontal del invernadero.

El desnivel es la diferencia de alturas habida entre los postes colocados en la fachada frontal del invernadero y las columnas ubicadas en la fachada posterior del invernadero.

#### **1.1.2.2.1.6 Arcos**

Los arcos son los tramos metálicos en forma curvada (media luna). Estos son los encargados de dar el soporte y la forma al techo (tipo túnel, capilla, dos aguas, plano, etc.).

Los arcos serán elaborados con PTR cuadrado y galvanizado de 1 1/2" X 1 1/2" calibre 14, tendrán una longitud total de 6 m, habrá 5 m de distancia entre base y base, además habrá una altura al punto medio de 1.5 m.

Los arcos van colocados sobre las columnas, y para fijarlas será utilizada una pieza metálica nombrada Capitel.

Los capiteles son estructuras metálicas hechas a partir de lámina galvanizada calibre 14, y son utilizadas para unir diversos tipos de segmentos metálicos en los invernaderos, en este caso unir los arcos a las columnas.

Los capiteles van insertos sobre el extremo superior de cada columna, y sobre éstos van colocadas cada base de los arcos, los capiteles se sujetan por medio de tornillos de pijas hexagonales de 1/8" X 1/4".

### 1.1.2.2.1.7 Largueros

El larguero es la pieza metálica que tiene la función de dar rigidez y unir toda la estructura del invernadero en distintos puntos para que el invernáculo funcione como una sola estructura, otorgando más resistencia y flexibilidad a éste.

Para formar los largueros, se utilizará PTR cuadrado y galvanizado de 1 ¼" por 1 ¼" calibre 14, y se fijará a la estructura con abrazaderas hechas de perfil calibre 14 con diámetro interior de 1 ¼" 1 ¼".

Los largueros serán colocados por debajo del punto medio de los arcos, y alrededor del invernadero por debajo de la unión de columnas y arcos.

Por su ubicación, los largueros se clasificarán en:

- Larguero tipo a: Son los que estarán ubicados por debajo del punto medio de los arcos.
- Larguero tipo b: Estos se ubicarán a los costados, debajo de la unión de los arcos y los postes.
- Larguero tipo c: Serán colocados en las fachadas frontales y posteriores, por debajo de la unión de los postes y arcos.
- Larguero tipo d: Serán ubicados en el mismo sentido de los largueros b y c, pero a una altura de un metro sobre el nivel del suelo.

Los largueros tipo a, tendrán una longitud de 20 m, para lo cual serán unidos varios tramos de PTR, estos largueros se fijarán a los arcos utilizando abrazaderas tipo Omega con un diámetro interior de 1 ¼" X 1 ¼", éstas son sujetadas a los arcos con pijas hexagonales de 1/8" X ¼".

Los largueros tipo b, también medirán 20 m de longitud, pero serán sujetos a las columnas utilizando el mismo tipo de abrazadera.

Los largueros tipo c medirán 5 m de largo, y se sujetarán con el mismo tipo de abrazaderas y el mismo tipo de tornillos.

Se entenderá como abrazadera a las piezas metálicas en forma de omega, y cuya función es la de sujetar y fijar, en este caso se sujetarán los largueros a la estructura del invernadero. Las abrazaderas están hechas de perfil galvanizado de calibre 14, hechas con un diámetro interior de 1 ¼" X 1 ¼".

#### **1.1.2.2.1.8 Soporte tipo W**

El soporte W tiene la función de sostener el peso ejercido por el cultivo producido a través del cable de acero de donde las plantas son sujetadas para tutorarse.

Esta estructura será construida con PTR cuadrado y galvanizado de 1 ¼" X 1 ¼". Su longitud será de 5 m y su altura será de 1.5 m.

Se sujetarán a las columnas del invernadero por debajo de la unión de postes y arcos (lado interior) utilizando abrazaderas tipo U con diámetro interior de 1 ¼" X 1 ¼", y pijas hexagonales de 8" X ¼".

#### **1.1.2.2.1.9 Canaletas**

Las canaletas son las piezas metálicas encargadas de conducir y evacuar el agua recolectada por el techo del invernadero hacia un punto de almacenamiento.

Estas estructuras están hechas de lámina galvanizada calibre 18, tienen un ancho de 25 cm y la longitud de cada una es de 4 m.

Serán colocadas de forma escalonada (en dirección a la fachada frontal) a todo lo largo de las líneas de los postes sobre los capiteles, y se fijara a los arcos con pijas tipo broca de 10 X 19.

La colocación escalonada hace referencia a: la colocación de las piezas semi-sobrepuestas, iniciando por colocar las primeras piezas en la parte de la fachada frontal, sobre los últimos 15 cm de las primeras piezas van colocados los primeros 15 cm de las segundas piezas, y así sucesivamente hasta quedar cubiertos los 52 m de la línea de canaletas.

En la parte frontal del invernadero, al inicio de cada línea de canaletas, será colocado un resumidero el cual tiene una salida de agua inferior y en ella pueden unirse tubos de P.V.C., para conducir el agua del invernadero hasta la cisterna.

#### **1.1.2.2.1.10 Conducto de evacuación**

El conducto de evacuación es la vía que tiene la función de guiar el agua de lluvia recolectada por las canaletas del invernadero hacia la cisterna de captación.

Será construido a partir de tubos, codos, t's, de P.V.C., RD 26 y de 2" de diámetro interno.

#### **1.1.2.2.1.11 Cable de acero**

El cable de acero es el alambre metálico utilizado para sostener a los tutores de las plantas (línea de tutoreo) y para abrir y cerrar las cortinas. Este cable estará compuesto por alambres de acero galvanizado, con un diámetro de 1/8" y compuesto por 7 hilos (7X7). Será sujetado por nudos de 1/8" al soporte W.

Nombraremos línea de tutoreo a: las líneas horizontales formadas por el cable de acero colocadas sobre el soporte W para el tutoreo de plantas, entre línea y línea de tutoreo habrá

1.5 m de distancia con lo que habrá 6 líneas de tutoreo (dejando dos pasillos de 1 m de ancho a los extremos).

Nombraremos nudos a: las piezas metálicas utilizadas para sujetar el cable de acero, en este caso se utilizarán nudos de acero con ranura de 1/8”.

#### **1.1.2.2.1.12 Cubiertas del Invernadero**

Entiéndase por cubierta a aquellas membranas principalmente plásticas, utilizadas para proteger al cultivo producido dentro del invernadero de las inclemencias climáticas (lluvia, viento, calor, heladas, alta o baja luminosidad, humedad), y también de plagas y enfermedades.

Las cubiertas son colocadas primordialmente sobre la estructura metálica del invernadero, los plásticos cubren la parte superior del invernadero (arcos) y las mallas cubren los laterales del invernadero.

#### **1.1.2.2.1.13 Plástico**

Es la cubierta plástica elástica y permeable utilizada para proteger al cultivo contra las condiciones climáticas. Esta membrana contiene aditivos especiales para una mejor dispersión de la luz, para absorber los rayos UV, y para su durabilidad a la exposición al sol.

Está cubierta será un polietileno flexible color blanco lechoso, de alta duración, con un calibre igual a 720 galgas, y un 30 % de sombreado.

Esta película será colocada como techumbre, sobre los arcos, y como laterales en el perímetro del invernadero hasta una altura de 1 m sobre el nivel del suelo.



#### **1.1.2.2.1.14 Malla antiáfidos**

Otra cubierta a utilizar en el diseño del invernadero es la malla antiáfidos. Está cubierta tiene la principal función de ayudar a ventilar el interior del invernadero sin permitir la entrada a vectores fito-patógenos como la mosquita blanca, pulgón trips, o palomillas ya que estos son agentes perjudiciales tanto directamente como indirectamente.

Esta malla está hecha con monofilamentos de polietileno, y debe de tener un calibre de 40 X 26, es decir que en una pulgada cuadrada hay una cuadrícula formada por 40 hilos de forma horizontal por 26 hilos de forma vertical, el color de la malla a utilizar es el color natural o cristalino.

La malla antiáfidos será colocada en los perímetros del invernadero a partir del metro de altura sobre el nivel suelo hasta llegar a los 4 m sobre el nivel del suelo.

#### **1.1.2.2.1.15 Sujeción de cubiertas**

Se entenderá como sujeción de cubiertas a la contención de las membranas plásticas en la estructura metálica del invernadero.

La sujeción de las cubiertas estará provista por dos componentes principales: el perfil sujetador y el alambra zigzag.

Nombraremos perfil sujetador al perfil cortinero galvanizado tipo greca de calibre 22, con una longitud de 6 m.

Llamaremos Alambre tipo zigzag al: filamento acerado tipo resorte de calibre 13.5.

El perfil tipo greca se colocará en:

- Sobre los dos arcos frontales y los dos arcos posteriores.
- Encima de las caras laterales y exteriores de los largueros b, c, y d.

Será fijado con pijas galvanizadas tipo broca autotaladrante de  $\frac{1}{4}$ " X  $\frac{8}{4}$ ".

#### **1.1.2.2.1.16 Cortinas enrollables**

Las cortinas enrollables sirven para proteger al cultivo durante la presencia de temperaturas bajas, o para incrementar el área de ventilación del propio invernadero.

Para las cortinas será utilizado tubo redondo galvanizado de  $\frac{1}{2}$ " X  $\frac{1}{2}$ " calibre 18, película plástica de polietileno color blanco lechoso, hilo de acero de  $\frac{3}{8}$ " y 7 hilos, las cortinas serán accionadas manualmente por medio de malacates de 1,200 libras de resistencia.

#### **1.1.2.2.1.17 Caseta de ingreso**

Entenderemos como caseta de ingreso a la estructura del invernadero destinado al ingreso y egreso controlado del invernáculo.

La caseta de ingreso estará localizada en el extremo derecho, de la parte frontal del invernadero. Esta tendrá una altura de 3.0 m en la parte trasera y de 2.0 m en la parte frontal, será construida con 2.0 m de ancho y 3.0 m de largo, para tener un espacio interior de 15 m<sup>3</sup>.

Para la estructura metálica se utilizará PTR Galvanizado de 1  $\frac{1}{2}$ " X 1  $\frac{1}{2}$ " Cal. 14. El perímetro, techo y puertas de esta caseta estarán totalmente cubiertos con el mismo plástico utilizado para la cubierta en el invernadero.

La caseta contará con dos puertas, una al exterior y otra al interior del invernadero, promoviendo la disminución de la entrada de insectos, que son vectores de enfermedades.

Cada puerta medirá 1.0 m de ancho por 1.9 m de alto, y serán de apertura corrediza, la apertura de la puerta interior será hacia la derecha, y la apertura de la puerta exterior será hacia el lado izquierdo.

El piso del interior de la caseta de ingreso estará cubierto con concreto hidráulico de fc 200, esta cobertura medirá 1.9 m de ancho por 2.9 m de largo, y tendrá un espesor de 15 cm. La cubierta presentará un desnivel de un espesor de 5 cm, y medirá 0.3 m de ancho por 1.0 m de largo, este desnivel se ubicará inmediatamente después de la puerta exterior. El desnivel servirá para colocar una solución útil para desinfectar zapatos al entrar al invernadero.

#### **1.1.2.2.1.18 Calefacción del Invernadero**

Entiéndase como calefacción del invernadero al sistema utilizado para incrementar la temperatura interior del invernadero cuando la temperatura exterior disminuye por debajo del mínimo permitido para los cultivos en producción (helada).

Para realizar la calefacción, en la parte media en el interior del invernadero será instalado un Calefactor de aire, de una capacidad de 250,000 Btu's, de una capacidad de 354 watts de potencia, y un consumo de gas Lp, de 9.7 L<sup>-1</sup>/hora, con termostato mecánico incluido para el encendido automático.

Este calentador será colocado en la parte media del invernadero, sobre el soporte W con una dirección hacia el oeste.

#### **1.1.2.3 Diseño de estructura del invernadero**

Ubicación de áreas y límites.

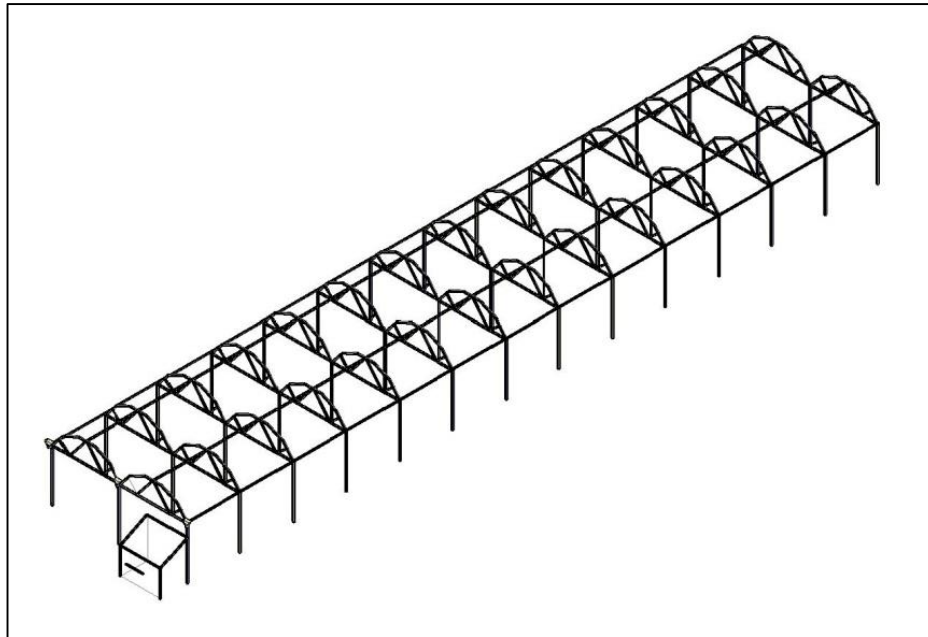


Figura 28 Perspectiva "A" del invernadero.

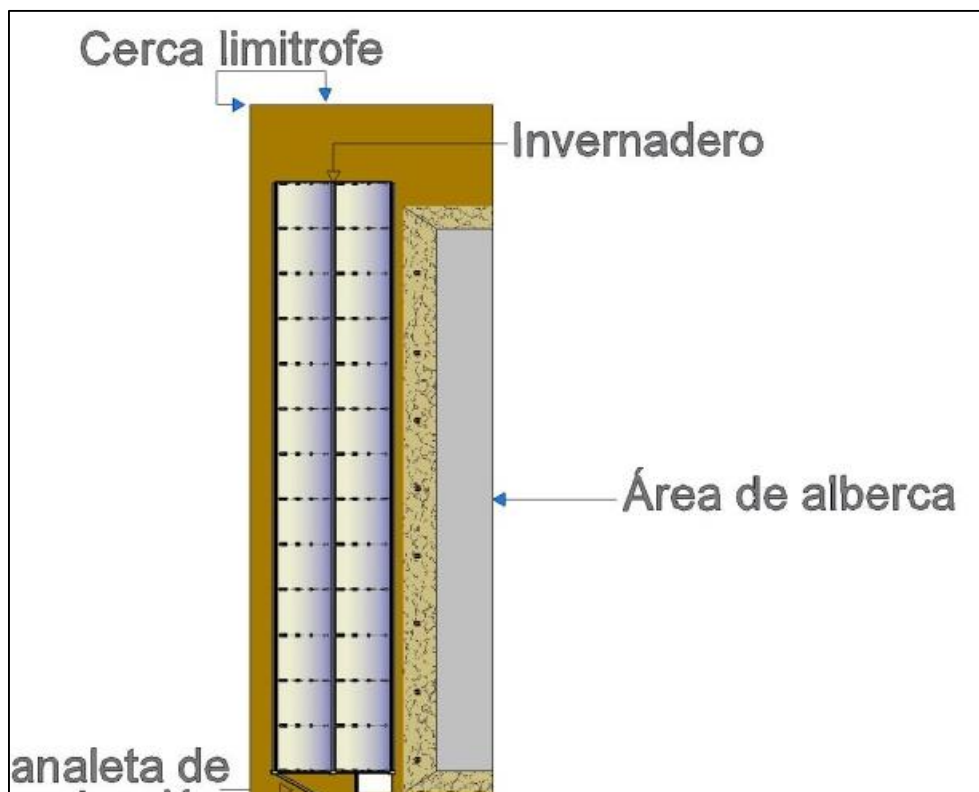


Figura 29 Perspectiva "B" del Invernadero diseñado.

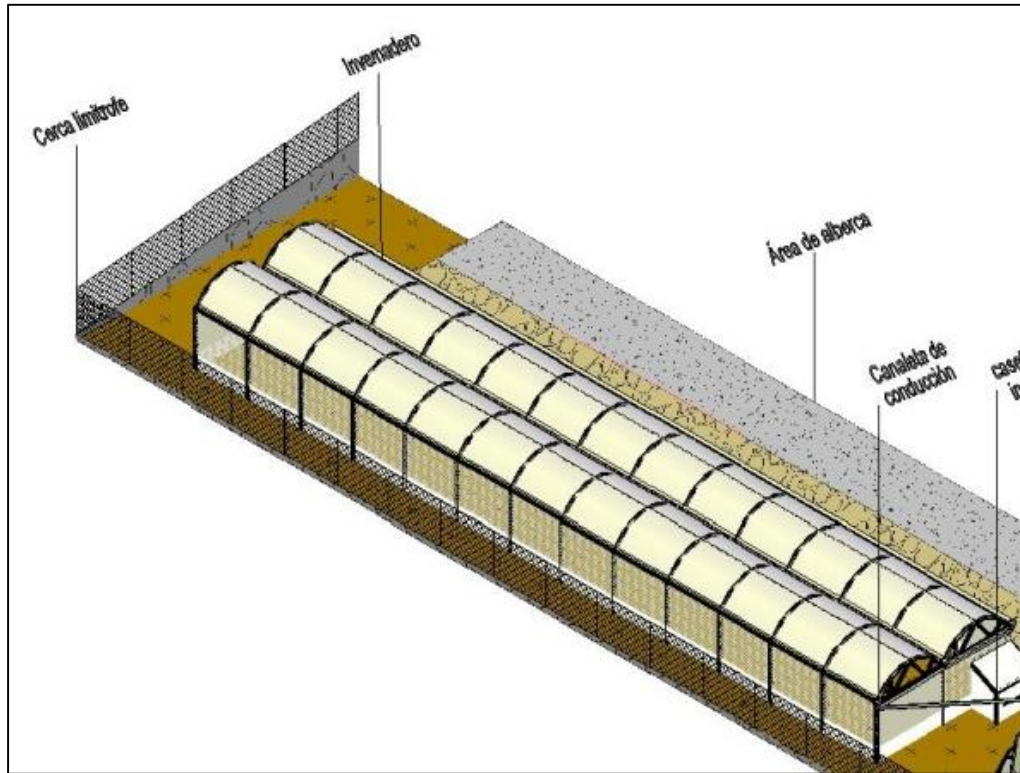


Figura 30 Perspectiva "C" del invernadero diseñado.

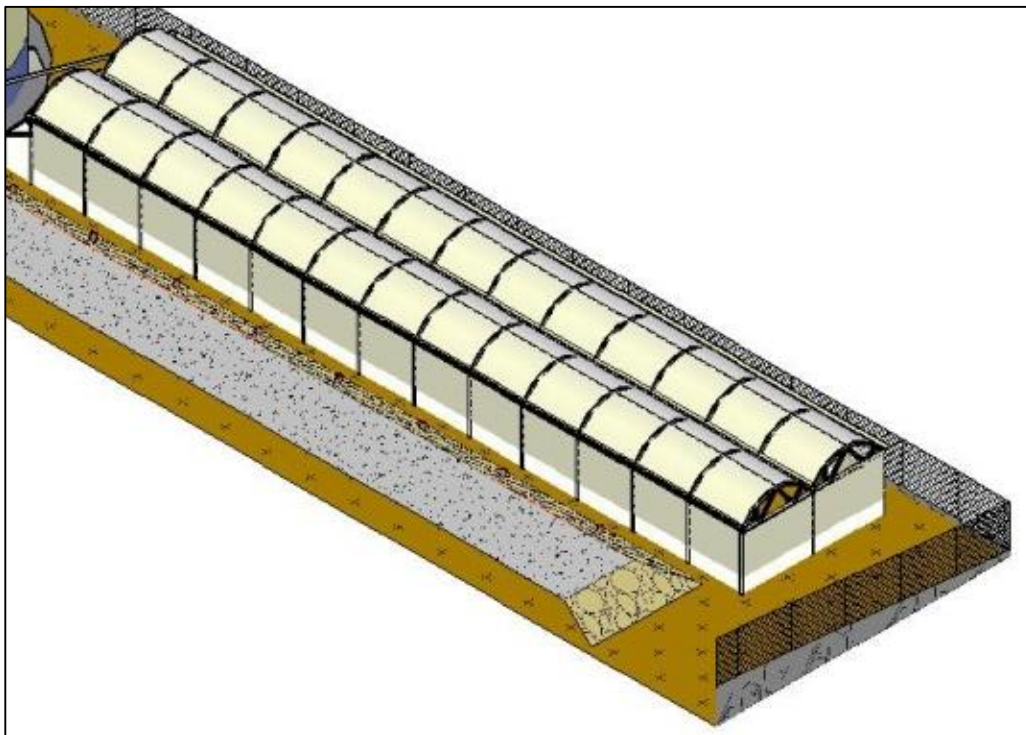


Figura 31 Perspectiva "D" del invernadero diseñado.

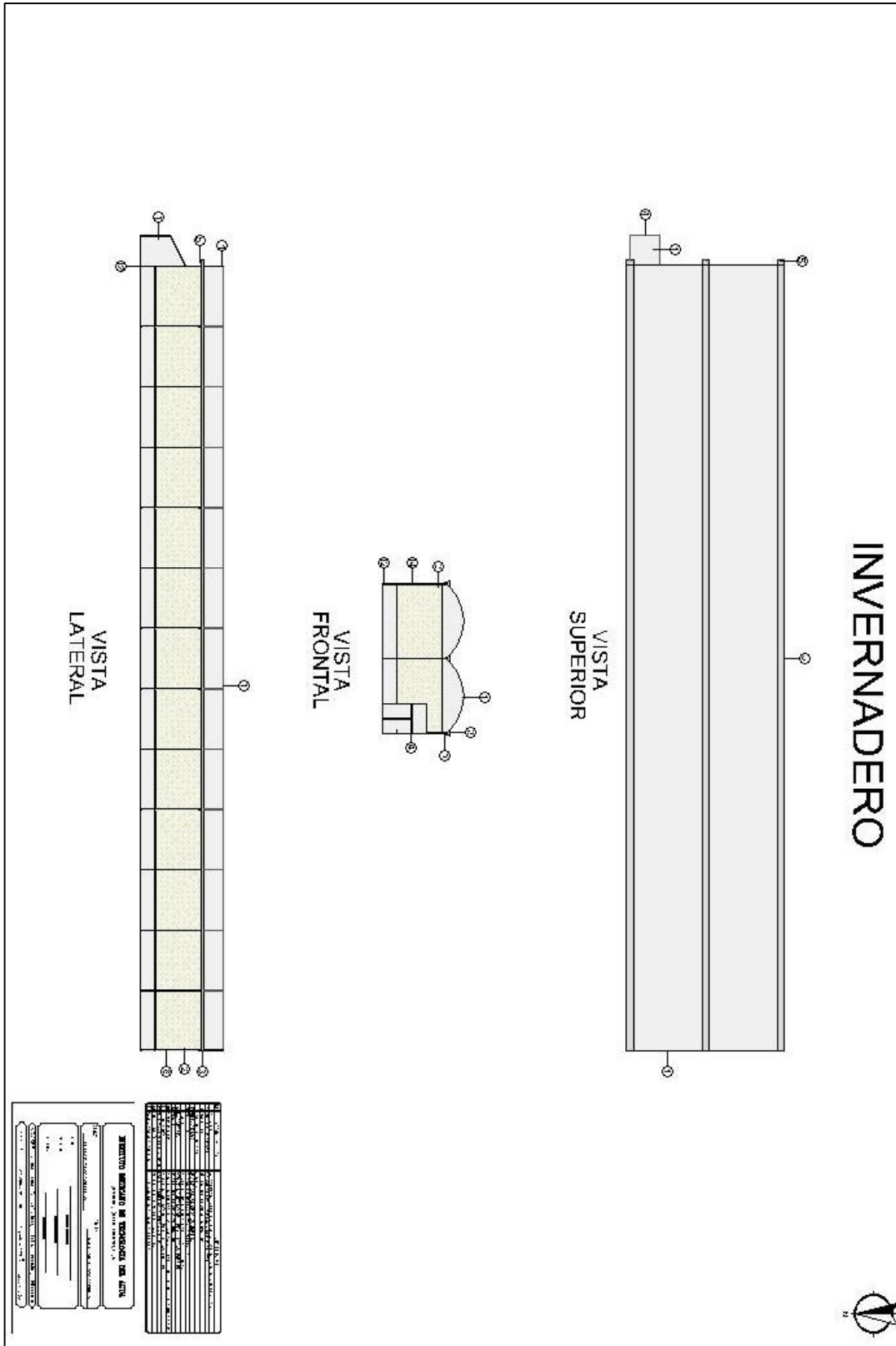


Figura 32 Plano invernadero







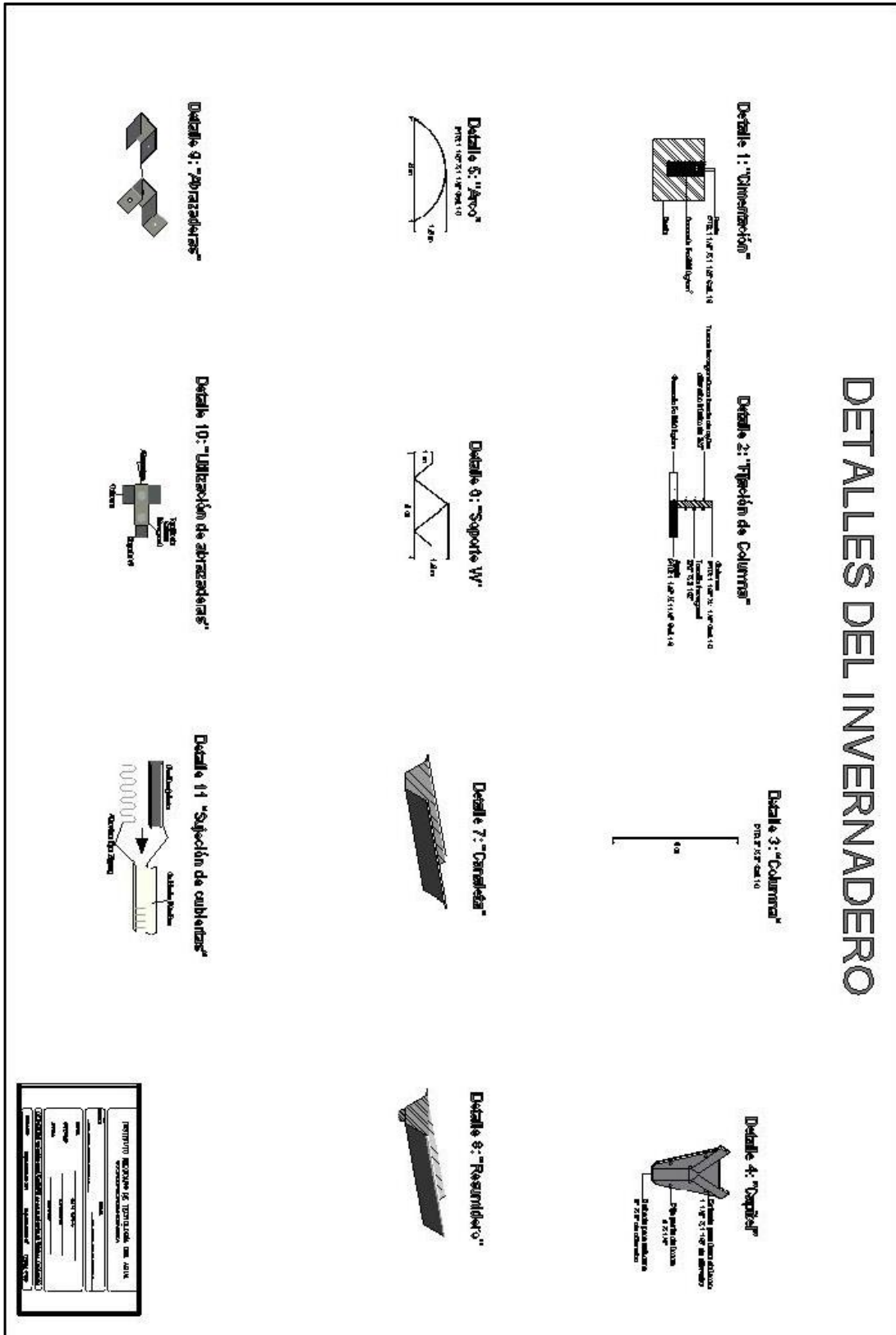


Figura 34 Detalles del invernadero

## 1.1.2.4 CATÁLOGO DE PARTES

Tabla 12 Catálogo de partes

Área	Material	Concepto	Presentación del material	Material necesario	Unidad
<b>Cimentación</b>	Concreto hidráulico	Cemento Portlan tipo I	Bultos 50 kg	22	Bultos
		Grava	m <sup>3</sup>	1.5	m <sup>3</sup>
		Arena	m <sup>3</sup>	1.0	m <sup>3</sup>
		Agua	L <sup>-1</sup>	216	L <sup>-1</sup>
<b>Estructura metálica del invernadero</b>	PTR 2" X 2" Cal. 14	Columnas	6 m	28	Pza.
	PTR 1 1/2" X 1 1/2" Cal. 14	Anclas	6 m	35	Pza.
	Arcos				
	PTR 1 1/4" X 1 1/4" Cal. 14	Largueros	6 m	110	Pza.
	Soporte tipo W				
	PTR 1/2" X 1/2"	Segmento de ancla	6 m	1.5	Pza.
	Abrazadera	Abrazaderas tipo Omega			Pza.
	Lámina galvanizada Cal. 18	Canaletas	4 m	42	Pza.
	Resumideros				
	Capitel Galvanizado de 2" X 1 1/2" Cal. 12	Sujeción de arcos y columnas		Pza.	42
Cable de acero de 7 X 7	Líneas de tutoreo	152 m	3	Rollos	
Nudos de acero de 3/8"	Sujeción de cable de acero	Bolsa con 100 Pza.	1	Bolsa	
Tornillos hexagonal galvanizado 3/8" X 2 1/2"	Sujeción de columnas	Pza.	140	Pza.	
Tuerca hexagonal con inserto de nylon, con diámetro interior de 3/8"	Sujeción de columnas	Pza.	140	Pza.	

Área	Material	Concepto	Presentación del material	Material necesario	Unidad
<b>Cubiertas del invernadero</b>	Cubiertas	Plástico	8.4 m X 100 m	2	Rollo
		Malla Antiáfidos	3.6 m X 100 m	1	Rollo
	Perfil Cortinero Cal. 22	Perfil sujetador	6 m	55	Pza.
	Alambre galvanizado Cal. 13.5	Alambre tipo zigzag	10 kg	2	Rollo
	Pija hexagonal 8" X 1/4"	Pijas punta broca	10,000 piezas	1	Caja
	Cortinas enrollables	Tubo galvanizado para cortina Cal. 18 de 33 mm	6 m	21	Pza.
		Carrete para cortina	Pza.	4	Pza.
	Malacate de 1200 lbs.	Pza.	4	Pza.	
<b>Sistema de Calefacción</b>		Calentador de aire con 250,000 Btu's de capacidad	Pza.	1	Pza.

### 1.1.2.5 CATÁLOGOS DE PRECIOS

*Tabla 13 Catálogo de precios*

Área	Material	Unidad	Cantidad	Costo unitario (\$)	Costo Total (\$)
<b>Cimentación</b>	Cemento Portland tipo I	Bultos	22	110.00	2,420.00
	Grava	m <sup>3</sup>	1.5	150.00	225.00
	Arena	m <sup>3</sup>	1	350.00	350.00
<b>Estructura metálica del invernadero</b>	PTR Galvanizado 2" X 2" Cal. 14	Pza.	28	387.00	10,836.00
	PTR Galvanizado 1 1/2" X 1 1/2" Cal. 14	Pza.	35	290.25	10,158.75
	PTR Galvanizado 1 1/4" X 1 1/4" Cal. 14	Pza.	110	247.25	27,197.50
	PTR Galvanizado 1/2" X 1/2" Cal. 14	Pza.	1.5	193.50	290.25

Área	Material	Unidad	Cantidad	Costo unitario (\$)	Costo Total (\$)
	Abrazadera	Pza.	100	8.50	850.00
	Canaletas	Pza.	42	115.00	4,830.00
	Resumideros	Pza.	3	214.00	642.00
	Capitel Galvanizado de 2" X 1 1/2" Cal. 12	Pza.	42	80.00	3,360.00
	Cable de acero 7 X 7	Rollo	3	480.00	1,440.00
	Carrete para cortina	Pza.	4	50.00	200.00
	Nudos	Bolsa	1	200.00	200.00
	Tornillo hexagonal galvanizado 3/8" X 2 1/2"	Pza.	140	3.50	490.00
	Tuerca hexagonal con inserto de nylon, con diámetro interior de 3/8"	Pza.	140	1.20	168.00
<b>Cubierta del invernadero</b>	Plástico blanco lechoso	Rollo	2	8600.00	17,200.00
	Malla Antiáfidos	Rollo	1	4300.00	4300.00
	Perfil cortinero Galvanizado Cal. 22	Pza.	55	56.00	3080.00
	Alambre tipo zigzag Cal. 13.5	Rollo	3	330.00	990.00
	Pija punta de broca 8" X 1/4"	Caja.	1	1275.00	1,275.00
	Tubo para cortina	Pza.	21	165.00	3,465.00
<b>Sistema de calefacción</b>	Calentador de aire con 250,000 Btu's de capacidad	Pza.	1	7,100.00	7,100.00
	<b>Total</b>				<b>101,067.50</b>

## **1.2 IMPLEMENTACIÓN DE ÁREA DEMOSTRATIVA PARA CULTIVO DE AGUACATE**

### **1.2.1 Generalidades del cultivo de aguacate**

El aguacate es un árbol originario de Mesoamérica, su origen tuvo lugar en la parte centro de México y en algunas partes altas de Guatemala, donde ya se cultivaba con anterioridad a la llegada de los españoles. El nombre del aguacate proviene del náhuatl (Ahuacatl), palabra que significa “testículos del árbol”. Su nombre científico es *Persea Americana* y proviene de la familia laurácea.

Regularmente, el árbol de aguacate puede alcanzar una altura de hasta 20 metros, sin embargo, cuando se cultiva no se deja crecer más de 5 metros, para facilitar las prácticas de control fitosanitario, cosecha, poda y fertilización foliar. Es de tronco grueso y con hojas alargadas que terminan en punta en la parte alta del tronco. Tiene varias ramificaciones, que generan un follaje denso. El aguacate es considerado un cultivo perenne debido a que se cultiva durante todo el año.

El fruto es una drupa, en forma de pera, de color verde claro a verde oscuro y de violeta a negro, cáscara rugosa con una pulpa verde amarillenta y un hueso central muy grande. Existen aproximadamente unas 400 variedades, por lo que podemos encontrar frutos de formas y pesos diferentes, que pueden llegar a pesar de 150 a 350gr.

La distancia de entre las plantas está determinada en función de factores como: variedad de aguacate, tipo de suelo, topografía y condiciones meteorológicas. En general, los árboles son plantados con una distancia entre ellos que va desde los 4 metros hasta los 12 metros de distancia entre sí. De esta manera se obtiene en una hectárea destinada a la plantación del aguacate, de 115 a 180 árboles.

### 1.2.1.1 Requerimientos climáticos y edáficos

Fotoperiodo:

Se comporta como planta de día corto (FAO, 1994).

Altitud:

Raza antillana: 0-500 m, raza guatemalteca: 500-1000 m, raza mexicana: 1000-1900 m (Ibar, 1983).

Raza antillana: 0-500 m, raza guatemalteca: 500-1000 m, raza mexicana: 1000-2500 m (Benacchio, 1982).

Precipitación (Agua):

Raza antillana: 1800-2000 mm anuales; raza guatemalteca: 1000-1500 mm anuales; raza mexicana: 800-1000 mm anuales. El aguacate prefiere una distribución más o menos uniforme de la precipitación a través del año; en los regímenes de lluvias de verano, por lo menos se debería cuidar que la humedad atmosférica no fuera baja en los meses secos (Ibar, 1983). 800 a 1000 mm anuales para la raza mexicana; 1000 a 1500 mm para la raza antillana (Benacchio, 1982). El aguacate aguante periodos cortos de sequía (Benacchio, 1982), por lo que al cultivarse fuera de las zonas tropicales húmedas deberá suministrarse riego. El exceso de agua le es perjudicial.

Humedad ambiental:

Requiere de una humedad ambiental relativamente alta, aún durante la época de secas (Ibar, 1983). La humedad ambiental debe ser baja para evitar enfermedades fungosas (Benacchio, 1982).

## Temperatura:

Rango 10 a 35°C, con un óptimo para fotosíntesis de 25 a 30°C. Sin embargo, las exigencias de temperatura varían dependiendo de la raza, para la raza mexicana la media óptima es de 20°C con una mínima invernal no inferior a -4°C, para la raza guatemalteca la media óptima está entre 22 y 25°C, con una mínima invernal no inferior a 0°C (Benacchio, 1982; Ibar, 1983). Las temperaturas mínimas no deberían llegar a -5°C (Aragón, 1995). La viabilidad de la semilla se afecta a temperaturas sostenidas inferiores a 15°C (Juscafresa, 1983). La variedad Hass es sensible a las heladas y puede presentar daños visibles cuando se expone a -2.2°C por cuatro o más horas. La presencia de temperaturas por debajo de 10°C es plena floración puede afectar gran parte de las flores polinizadas en las últimas horas al interferir con la fertilización (INIFAP, 1996). La mínima letal para las razas mexicana, guatemalteca y antillana son: -9°, -6° y -4°C, respectivamente (Morin, 1967). El límite inferior de temperatura para el crecimiento y desarrollo se encuentra a los 10°C (Whiley y Winston, 1987; Zamet 1990), mientras que el límite superior se ubica en 33°C (Sedgley, 1977; Agraman, 1983). Temperaturas superiores a 33-35°C, tiene un efecto detrimental sobre la polinización al causar esterilización del polen (Jasso, 1989). Temperaturas mayores que 42°C son consideradas como eventos catastróficos para el cultivo (Gafni, 1984). Para la sucesión de las etapas de floración y fructificación se requieren temperaturas de 12 a 13°C (Oppenheimer, 1978). Las temperaturas extremas para el amarre de frutos son 12-17°C y 28-30°C (Whiley y Winston, 1987). La variedad Hass puede soportar temperaturas de hasta -1.1°C por periodos cortos de tiempo (Guardiazabal, 1990).

## Luz:

El aguacate requiere de mucha insolación (Benacchio, 1982).

## Viento:

Los vientos fuertes provocan caída de flores y pueden llegar a afectar mucho la producción, por lo que se recomienda la instalación de cortinas rompe-vientos (Benacchio, 1982).

Textura de suelo:

Prefiere suelo franco a franco-arcillo-limosos. Se puede cultivar bajo riego en suelos relativamente pesados, en zonas con baja precipitación, asegurando un buen drenaje (Benacchio, 1982). Se adapta a diversos tipos de suelo, desde los arenosos y sueltos hasta los limosos y compactos, pero las condiciones óptimas serían un suelo franco de consistencia media, húmica y rica en materia orgánica (Ibar, 1983).

Profundidad del suelo:

Requiere suelos moderadamente profundos, ya que puede cultivarse en terrenos accidentados u ondulados (Ibar, 1983). Prefiere suelos profundos (FAO, 1994).

Salinidad:

La salinidad del suelo no debe pasar del 0.5 por mil, El aguacate es muy susceptible al exceso de sodio y le son suficientes concentraciones de 40% de caliza, por lo que no debe cultivarse en terrenos calizos (Ibar, 1983). El Aguacate no tolera salinidad (Benacchio, 1982). Los portainjertos de la raza antillana son los más tolerantes a la salinidad, mientras que los portainjertos de la raza mexicana son los más susceptibles (INIFAP, 1996). pH: La raza mexicana desarrolla un pH de 6 a 7.5, mientras que la antillana y la guatemalteca lo hacen en un pH de 6 a 7. Crece en un rango de pH de 4.8 a 7.5, siendo el óptimo para la raza mexicana 7 a 7.5 y para las razas guatemalteca y antillana 6 a 7 (Benacchio, 1982). El aguacate se desarrolla en un rango de pH de 4.3 a 8.3, siendo el óptimo alrededor de 5.6 (FAO, 1994).



Pendiente:

Es preferible realizar las plantaciones en terrenos ligeramente accidentados u ondulados, que permitan una buena ventilación, pero que no representen riesgo por heladas en regiones poco cálidas (Ibar, 1983). 78 Drenaje: Requiere condiciones de buen drenaje (Benacchio, 1982; Ibar, 1983; FAO, 1994).

El aguacate Hass es el más popular en el mercado internacional, cuando está maduro, su cascara adquiere un tono oscuro, casi negro. Su piel pasa de verde oscuro a verde purpurino. Tiene un gran sabor a nuez y avellana, con textura suave-cremosa y una semilla de pequeña a mediana. Disponible durante todo el año. El aguacate Hass proviene de injerto, mezcla de diferentes variedades de aguacate, desarrollado por Rudolph Hass.

### 1.2.2 Suministro y plantación de cultivo de aguacate

Se suministraron cerca de 80 plantas de aguacate como hass en sus variedades normal, Jiménez y Méndez.



*Ilustración 1 Suministro de planta de aguacate*

Para la Plantación de Aguacate en las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua”, se realizaron las siguientes actividades:

**a) Poda y deshierbe de la Zona de Plantación de Aguacate:**

Cerca del área de plantación de aguacate, se encuentran árboles de Ficus los cuales proporcionan sombra en el lugar de estacionamiento de vehículos. Cabe mencionar que se tuvo que recurrir a la poda de estos árboles ya que presentaban plaga y la mayoría de sus ramas se encontraban totalmente secas debido al barrenador presente en sus tallos.

El ataque de este insecto en un fruto joven, ocasiona la caída del mismo. Si el ataque se lleva a cabo en un fruto maduro, éste no caerá, pero se pudre debido a que es susceptible de infecciones secundarias causadas por bacterias y hongos (Comité Estatal de Sanidad Vegetal del Estado de México, 2010).

La mejor estrategia de control para el barrenador de ramas es a través de la poda sanitaria. Las ramas podadas deben ser incineradas para eliminar huevos, larvas y pupas. La interacción con ramas dañadas se convierte en focos de infestación para los huertos aledaños (Equihua et al., 2007; SENASICA s/f).



*Ilustración 2 Limpieza de área para plantación de aguacate*





*Ilustración 3 Excavación de Pozos para plantación de Aguacate*



*Ilustración 4 Mezcla y acarreo de Materia Orgánica*



*Ilustración 5 Plantación de aguacate*





*Ilustración 6 Relleno de pozos*



*Ilustración 7 Formación de cajetes en cada planta*



*Ilustración 8 Conclusión de plantación de aguacate*

### **1.2.3 Instalación del sistema de riego**

#### **1.2.3.1 El riego en el aguacate**

Los sistemas de riego presurizados tienen como objetivo satisfacer las necesidades hídricas del cultivo, en el momento adecuado y en la cantidad necesaria, aplicando el agua de manera eficiente y uniforme, para que la mayor parte de esta quede disponible en la zona radicular del cultivo.

La disponibilidad de agua es factor determinante que influencia el crecimiento del árbol, producción y calidad del fruto. La época comprendida entre el cuajado del fruto y su madurez fisiológica, es el periodo más crítico, en el que el cultivo debe disponer de agua suficiente, más no encharcamiento, pues se genera el ambiente propicio para el establecimiento y desarrollo de hongos patógenos. Así mismo, durante el establecimiento del cultivo se recomienda establecer los requerimientos por árbol.

La aplicación de sistemas de riego nuevos y mejorados han permitido a nivel mundial ahorrar agua, disminuir costos y aumentar la producción de cultivos. El propósito del riego es el de suministrar agua en el momento que la planta lo necesite.

"El requisito de agua para un cultivo es directamente relacionados con el agua perdida por evapotranspiración (ET). Evapotranspiración de un cultivo depende de la radiación solar, la humedad, la temperatura, el viento y la etapa de crecimiento "(Burt, 2013). Conocer la ET y las tasas de infiltración del suelo pueden ayudar a la uniformidad y eficiencia del sistema. La evapotranspiración se refiere a la cantidad de agua utilizada por el cultivo más la cantidad de agua evaporada de la superficie del suelo.

#### **1.2.3.2 Suministro de material**

Para la implementación del sistema de riego se suministró el siguiente material:



Cantidad	Clave	Descripción
168.0000	526150C	TUBERIA HIDRAULICA RD-26 150C 1 1/2"
6.0000	526125C	TUBERIA HIDRAULICA RD-26 125C 1 1/4"
14.0000	406-015	CODO 90 C40 CEM X CEM 015 DE 1 1/2"
18.0000	401-015	TEE C40 CEM X CEM X CEM 015 DE 1 1/2"
65.0000	219864012	MICRO 2005 R RAPIDA 2E35 L/H +TB60CM+4/7
65.0000	897947	ESTACA ROJA MODELO 37
10.0000	QVC1015SSEW	VALVULA DE BOLA CEMENTAR 015 DE 1 1/2"
6.0000	QVC1010SSEW	VALVULA DE BOLA CEMENTAR 010 DE 1"
1.0000	420-015	CRUZ C40 CEM X CEM 015 DE 1 1/2"
1.0000	800-112-02-11	MINI FILTRO DE DISCOS 1 1/2"
7.0000	435-015	ADAPTADOR HEMBRA C40 CEMXRH 015 1 1/2"
3.0000	436-015	ADAPTADOR MACHO C40 CEMXRM 015 1 1/2"
1.0000	436-012	ADAPTADOR MACHO C40 CEMXRM 012 1 1/4"
1.0000	435-012	ADAPTADOR HEMBRA C40 CEMXRH 012 1 1/4"
1.0000	429-015	COPLER C40 CEM 013 DE 1 1/2"
1.0000	437-212	REDUCCION BUSHING C40 212 1 1/2 X 1 1/4"
1.0000	457-012	TUERCA UNION C40 CEM X CEM 12 1 1/4"
1.0000	457-015	TUERCA UNION C40 CEM X CEM 15 1 1/2"
7.0000	447-015	TAPA C40 CEM 015 DE 1 1/2"
4.0000	INVENT1078	INYECTOR VENTURI MAZZEI 010 DE 1"
8.0000	406-010	CODO 90 C40 CEM X CEM 010 DE 1"
8.0000	437-211	REDUCCION BUSHING C40 211 1 1/2 X 1"
2.0000	EHD1645-100	MANGUERA LISA RDA 16 MM CAL 45 ML-305 M
130.0000	3091	GOTERO AJUSTABLE ARDAS 0-70 LPH ROJO
2.0000	900-30-01-002	PERFORADORA 3MM GOTERO
1.0000	70001L	CEMENTO WELD-ON 70001L PVC 700 DE 1 L
50.0000	MV0016B	MINIVALVULA INICIAL X MANGUERA 16 MM
50.0000	15006	ABRAZADERA SINFIN 050 DE 1/2"
8.0000	12090023	VALVULA DE AIRE SIMPLE EFECTO DE 1"
8.0000	435-010	ADAPTADOR HEMBRA C40 CEMXRH 010 1"
25.0000	B1616L	CODO MANGUERA X MANGUERA DE 16 MM
25.0000	B1616T	TEE MANGUERA X MANGUERA X MANGUERA
25.0000	B16161	CONECTOR MANGUERA X MANGUERA 16 MM
4.0000	PGV-151	ELECTROVALVULA HUNTER 150 PGV DE 1 1/2"
65.0000	200-16-01-001	CONECTOR INICIAL X MANGUERA 16MM
65.0000	450-16-20-002	GOMA 16MM TAC
1.0000	950-16-01-002	BROCA PARA PERFORAR 16 MM
1.0000	EA5060867	CINTA AQUA TRAXX TORO 5/8" 6 MIL@ 20 CM

*Ilustración 9 Parte de material suministrado para instalación de sistema de riego*

### 1.2.3.3 Instalación de micro-Aspersores

Se utilizaron aproximadamente 60 microaspersores de la marca Naandan modelo Aquasmart 2002, con las siguientes características:

## ESTRUCTURA Y CARACTERÍSTICAS

- Flujo constante entre presión de 1.5 a 4 bar
- Riego y fertigación uniformes bajo todas las condiciones topográficas del terreno
- Amplia gama de caudales y patrones de distribución
- Cabezal “pop-up” (emergente) a prueba de insectos
- Estructura sólida y resistente
- De fácil armado y desarmado
- Estaca de diseño innovador
- Estaca nueva con grapa de sujeción y accesorio para corte del agua
- Rotor especial (color verde) para funcionamiento invertido
- Control de diámetro de cobertura de dos etapas
- Resistente al taponamiento, aún en mínimos caudales.



## CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

- Presión operativa: 1.5 a 4.0 atm.
- Caudales: 20 a 95 l/h
- Diámetros de cobertura: 3.0 a 7.5 m

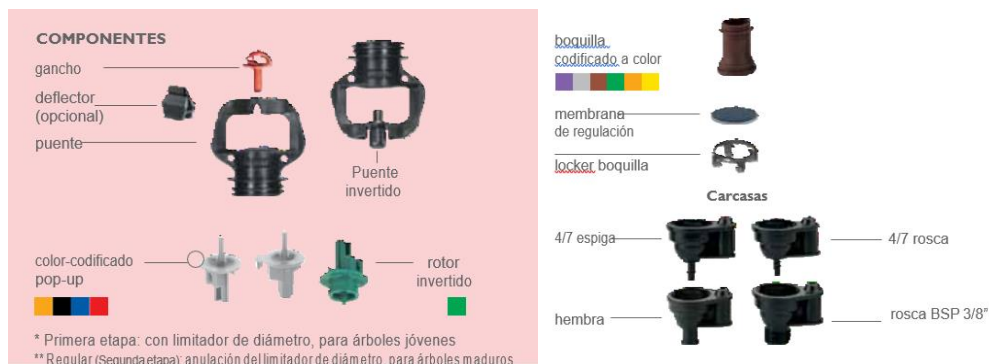
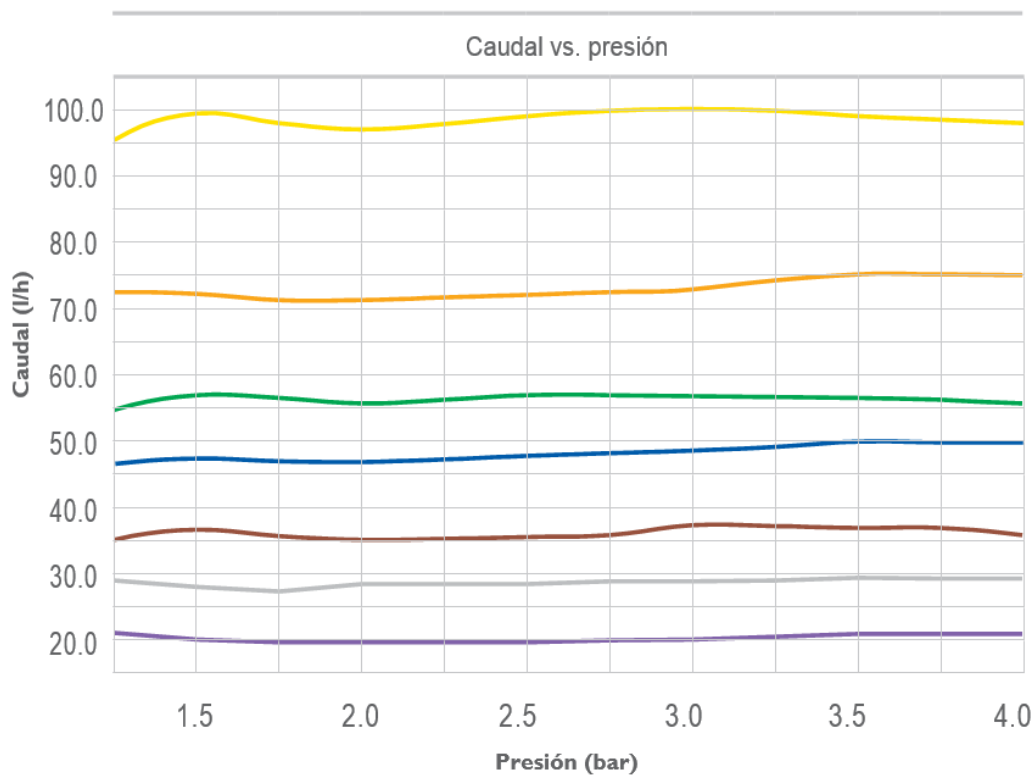


Figura 35 Componentes del microaspersor

**Tabla 14 Diámetros de riego (m)**

Color de boquilla	Caudal (l/h)	Boquilla (mm)	Naranja* (orto alcance)	Negro (mediano alcance)		Azul (largo alcance)		Verde (invertido)**
				primera etapa	Regular (segunda etapa)	primera etapa	Regular (segunda etapa)	
Violeta	20	0.84	3.0	1.5	3.5			
Gris	28	1.00	3.0	2.0	4.0	1.5	4.5	5.0
Marrón	35	1.10	3.5	2.5	4.0	2.0	5.0	5.0
Azul	47	1.25	3.5	2.5	4.5	2.0	5.5	5.0
Verde	55	1.33	3.5	2.5	4.5	2.0	6.0	5.0
Naranja	70	1.48		2.5	5.0	2.5	7.0	5.0
Amarillo	95	1.75		3.0	5.5	3.0	7.5	5.0



**Figura 36 Caudal vs presión de microaspersores.**





*Ilustración 10 Aspersor instalado en cultivo de aguacate.*

#### **1.2.3.4 Instalación de líneas de distribución**

Para la distribución del agua para riego se suministró tubería hidráulica de 1 ½" con el objetivo de cubrir aproximadamente 170 metros lineales de riego por mico aspersion.



*Ilustración 11 Tubería PVC suministrada*



*Ilustración 12 Tendido y colocación de tubería*



*Ilustración 13 Unión de tuberías*

### 1.2.3.5 Sistema de fertirriego

Para la inyección del fertilizante se aprovecha la bomba de energía alterna y directa, en este caso con paneles solares, usando para regar e inyectar el fertilizante sin tener un tanque elevado de almacenamiento.

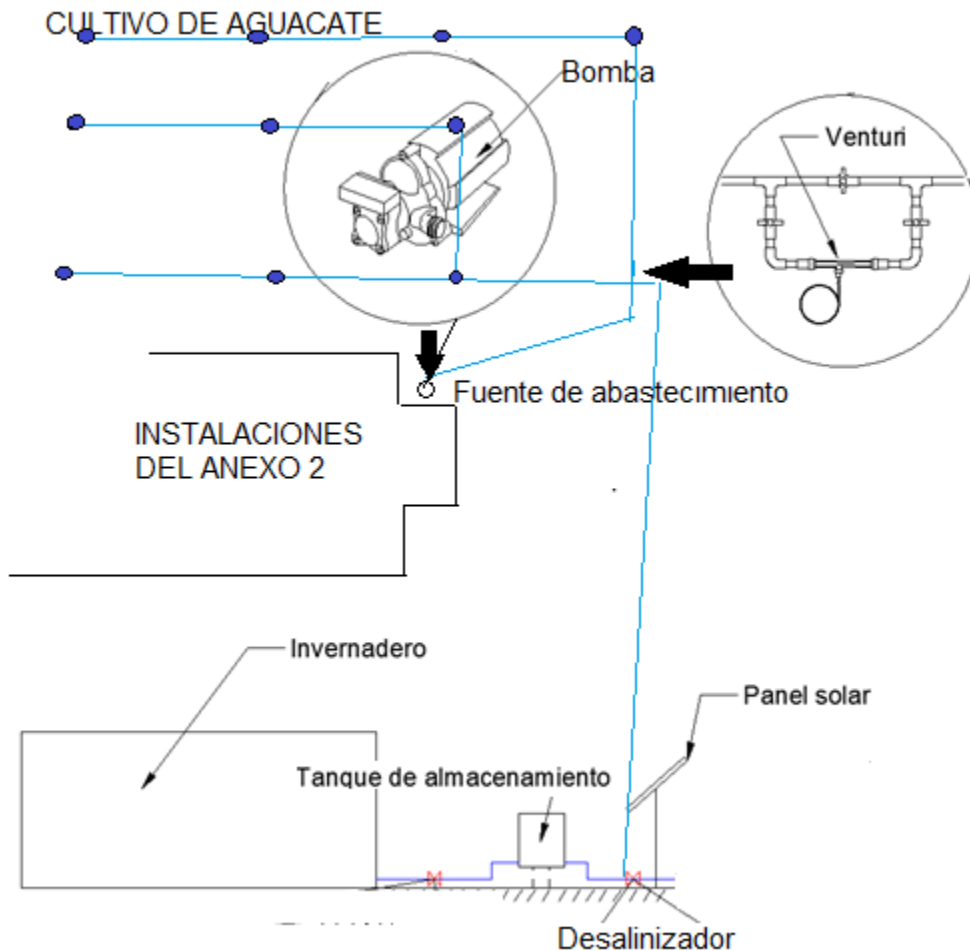


Figura 37. Esquema de fertirrigación

La desventaja sería que cuando no se cuente con energía solar y energía eléctrica no se podrá regar y que solo se podrá regar de día.

Se llevó a cabo la instalación de Venturi y accesorios para sistema de fertirrigación.





*Ilustración 14 Armado de sistema de riego con fertirriego*



*Ilustración 15 Explicación del funcionamiento para puesta en marcha*



*Ilustración 16 Venturi instalado*

## 1.3 IMPLEMENTACIÓN DE ÁREA DEMOSTRATIVA PARA CULTIVO DE ARÁNDANO Y FRESA

Solamente el suficiente conocimiento e información sobre el estado de los recursos naturales, sobre las causas que afectan su protección, conservación, restauración y sostenibilidad, así como los factores que los deterioran, proporcionarán instrumentos estratégicos para la toma de decisiones, formulación de políticas, elaboración de normas, apoyo al desarrollo sostenible y fijación de estándares. El conocimiento del estado de los recursos permite utilizar herramientas para la planificación y ordenamiento ambiental, evaluación de impactos ambientales, identificación de

### 1.3.1 Levantamiento de zona inundable

Se llevó a cabo el trazo y excavación de zanjas para poder llevar a cabo la construcción de mampostería que permita realizar el relleno para el levantamiento de piso.



*Ilustración 17 Trazo y excavación de zanjas*





*Ilustración 18 Construcción de mampostería*



*Ilustración 19 Relleno y nivelación de piso*

### 1.3.2 Instalación de estructura PTR en 200 m<sup>2</sup> para protección de cultivos

Se llevó a cabo la instalación de estructura PTR en 200 m<sup>2</sup> se proporcionaron servicios de mano de obra para realizar las siguientes actividades:

### 1.3.2.1 Distribución y ubicación de material para armado de estructura

El solicitante del servicio proporciono diverso material (tubería PTR), accesorios y plástico para invernadero, el cual tuvo que ser trasladado al lugar de instalación.



*Ilustración 20 Suministro de tubería PTR y Zintro para armado de arco techo.*



*Ilustración 21 Suministro de plástico blanco para arco-techo.*





*Ilustración 22. Trazo y Excavación de pozos para instalación de tubos para arco techo.*



*Ilustración 23 Colocación de tubería PTR fijada con cemento.*





*Ilustración 24 Colocación de tubería arco-zintro*



*Ilustración 25 Fijación de tuberías para arco-techo*





*Ilustración 26 Extensión de plástico para invernadero*



*Ilustración 27 Colocación de plástico.*





*Ilustración 28 Colocación de plástico en arco-techo.*



*Ilustración 29 Colocación de alambre Zig Zag para fijación de plástico.*



*Ilustración 30 Vista final de la instalación de arco-techo*

#### **1.4 SISTEMA DE DESALINIZACIÓN IMPLEMENTADO EN PROYECTOS PRODUCTIVOS**

En general, como parte de los proyectos productivos agrícolas y frutícolas con aprovechamiento de agua y energía renovable, se realizan estudios de las características físicas de la zona de estudio que incluye reconocer la tecnificación actual del manejo y uso del uso del suelo y del agua y reconocer la potencialidad sustentable la agricultura de temporal y de riego.

La identificación del uso sustentable de los recursos naturales permite fomentar la utilización de energías renovables que contribuyan a elevar los rendimientos agrícolas, pecuarios y forestales, así como el mitigar el impacto al medio ambiente, promover la sustentabilidad e incrementar la rentabilidad productiva y de producción del agua y el suelo.

En este contexto, en la República Mexicana se tiene un gran potencial de recursos energéticos renovables cuyo desarrollo permite una mayor diversificación de fuentes de energía, ampliar la base industrial en un área que puede tener valor estratégico en el futuro,

y atenuar los impactos ambientales ocasionados por la producción, distribución y uso final de las formas de energía convencionales (Semarnat, 2013).

Con base en lo mencionado, se ha desarrollado un programa especial de aprovechamiento de energías renovables teniendo como marco para su definición los programas sectoriales, que especifican los objetivos, prioridades y políticas que rigen el desempeño de las actividades del sector administrativo de que se trate y a su vez, los programas especiales contruidos con base en el Plan Nacional de Desarrollo y los Programas Sectoriales, referidos en las prioridades del desarrollo integral del país y actividades relacionadas con dos o más dependencias coordinadoras de sector (DOF, 2014).

En este aspecto, entre los Estados de la República Mexicana que han considerado proyectos productivos agrícolas y frutícolas con aprovechamiento de agua y energía renovable, se encuentra el Estado de Guanajuato, que en sus sistemas de planeación municipal de desarrollo y Plan de Gobierno consideran instrumentos técnicos que fortalecen la capacidad de gestión de la administración local, de aquí la necesidad de establecer las bases para de su elaboración y aplicación.

A partir de estas premisas ha surgido la necesidad, por parte del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), de crear en sus instalaciones áreas experimentales para dar inicio a la implementación del sistema desalinizador en proyectos productivos, en las cuales se analizaran y evaluaran el desarrollo de los cultivos con el fin de mejorar la tecnología en desarrollo y a partir de ello proponer proyectos productivos agrícolas y frutícolas que considere, por ejemplo, la desalinización para su aprovechamiento en la producción de cultivos en invernaderos, la aplicación del riego con energía solar, así como, tecnificar los sistemas de riego para eficientar el uso del agua, además de impulsar los huertos frutícolas con especies rentables como aguacate, nogal, manzana, durazno, etc., con riego tecnificado, entre otros.



En el presente trabajo se reporta la construcción de un área experimental para la producción de fresa, arándano y aguacate regados con agua proveniente de un sistema de desalinización alimentado con energía solar.

#### 1.4.1 Tolerancia de los cultivos a la Salinidad

Se define la tolerancia a la salinidad como la capacidad que tiene el cultivo para soportar la salinidad del suelo sin experimentar efectos perjudiciales en su desarrollo y/o producción. Las plantas desarrollan diversas estrategias para ser más tolerantes a la salinidad. Por ejemplo, restringiendo la extracción de sales y ajustando la presión osmótica a través de la síntesis de sales compatibles como la prolina, la glicina-betaína, y otros azúcares (Greenway y Munns 1980). Otra estrategia seguida por las plantas es la acumulación de la sales en las vacuolas celulares, controlando de esta forma la concentración de sales en el citosol y manteniendo en las células una relación  $K^+/Na^+$  alta (Glenn 1999).

En general la tolerancia de los cultivos a la salinidad se puede evaluar siguiendo tres criterios:

- La capacidad del cultivo para sobrevivir en suelo salino.
- La producción del cultivo en suelo salino.
- El rendimiento relativo del cultivo en suelo salino en comparación con la producción, bajo las mismas condiciones de manejo, pero en condiciones de no salinidad.

Aunque el criterio más agronómico es el segundo, por razones de sencillez de aplicación se utiliza el tercero. Por lo tanto, la tolerancia se evalúa calculando el rendimiento relativo. Este rendimiento se estima como la producción del cultivo obtenida en condiciones de salinidad dividida por la producción obtenida en ausencia salinidad. En la práctica se constata que el rendimiento relativo de los cultivos se mantiene aproximadamente constante a medida que aumenta la salinidad del suelo hasta llegar a una determinada salinidad, a partir de la cual el rendimiento relativo desciende de modo aproximadamente lineal con la salinidad según se observa en el siguiente gráfico. Existe una clasificación de la tolerancia de los cultivos en función del valor umbral de CEes (Conductividad Eléctrica

medida en el extracto de saturación) a partir del cual comienza a reducirse la producción significativamente y también del grado de reducción de la producción en función del aumento de la salinidad en el suelo. Con la idea de cuantificar, este rendimiento relativo se puede expresar como una función de la conductividad eléctrica en el extracto de saturación CE<sub>es</sub> mediante la siguiente ecuación matemática:

$$\text{Producc. relativa (\%)} = 100 - b (\text{CEes} - a)$$

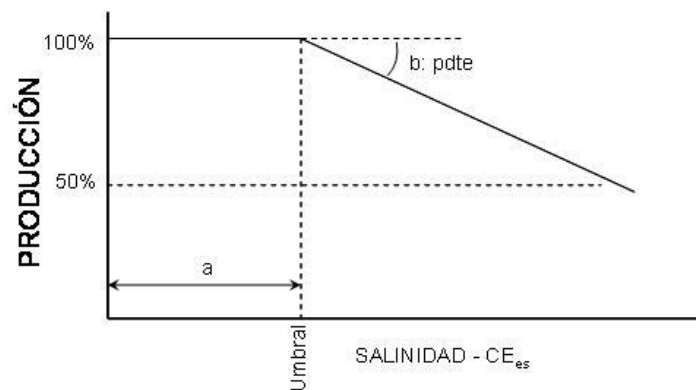


Figura 38 Tolerancia de los cultivos a la salinidad

Donde:

**a:** es la conductividad eléctrica del suelo (CE<sub>es</sub>) límite (o umbral) a partir de la cual el cultivo comienza a perder producción por salinidad.

**b:** es la pendiente de la recta, que indica el porcentaje de pérdida de producción del cultivo en función del aumento de la salinidad del suelo.

De forma general, la mayoría de los cultivos herbáceos y leñosos tienen tabulado estos parámetros con los que se evalúa su tolerancia a la salinidad. En la siguiente tabla se muestran dichos valores y la clasificación del tipo de tolerancia para varios cultivos hortícolas y leñosos (Maas y Hoffman 1977). Estos parámetros se deben tomar como una guía a la hora de evaluar las pérdidas de producción debidas a la salinidad. Para realizar una evaluación más precisa se deberían realizar ensayos con variedades locales de cultivos

y en condiciones de clima, suelo y manejos representativos de la zona. Debido a que estos estudios son complejos generalmente se acaba utilizando los valores tabulados.

Tabla 15. Cultivos leñosos

Cultivo	CE límite (a) (dS/m)	b (pdte,%)	Tipo tolerancia
Aguacate	1.60	24.0	Sensible
Albaricoquero	1.60	24.0	Sensible
Almendro	1.50	19.0	Sensible
Cerezo	1.50	22.0	Sensible
Ciruelo	1.50	18.0	Sensible
Caqui	1.70	21.0	Sensible
Mandarino	1.70	16.0	Sensible
Manzano	1.50	19.0	Sensible
Limonero x Naranja amargo	1.50	9.7	Sensible
Limonero x Citrus Macrophylla	1.21	15.5	Sensible
Melocotonero	1.70	21.0	Sensible
Naranja	1.70	15.5	Sensible
Níspero	1.60	24.0	Sensible
Peral	1.50	19.0	Sensible
Pomelo	1.70	16.0	Sensible
Limonero x Mandar. Cleopatra	1.92	13.1	Moderadamente sensible
Limonero	1.50	19.0	Moderadamente sensible
Viña	1.50	19.0	Moderadamente sensible
Granado	5.00	14.0	Moderadamente sensible
Higuera	4.20	9.6	Moderadamente sensible
Olivo	5.00	14.0	Moderadamente sensible
Palmera	4.00	3.6	Tolerante

La tolerancia de los cultivos leñosos a la salinidad (frutales y viñedo) depende, en gran medida al portainjertos sobre el cual se injerta la variedad. Esta tolerancia está íntimamente ligada a la propia capacidad del portainjertos para regular la absorción del sodio y del cloruro (Maas y Hoffman 1977). Por ello, una forma efectiva de reducir el efecto de la salinidad en los cultivos leñosos es utilizar patrones tolerantes que reduzcan el efecto de la salinidad en la variedad injertada.



## 1.4.2 Instalación de sistema desalinizador

### 1.4.2.1 Construcción de plancha de concreto



*Ilustración 31 Trazo para excavación de zanjas*



*Ilustración 32 Excavación de zanjas para mampostería*



*Ilustración 33 Relleno y nivelación de área para plancha de concreto*



*Ilustración 34 Construcción de mampostería*



*Ilustración 35 Construcción de plancha de concreto para colocación de sistema desalinizador*



### **1.4.2.2 Construcción e instalación de estructura y paneles solares.**

El diseño de la estructura metálica soporta un arreglo de cuando menos 6 paneles fotovoltaicos. Fue diseñada en una configuración desmontable que consta de una estructura principal y elementos secundarios que están sujetos mediante tornillos pasados de ½ pulgada. La estructura fue reforzada por lo que se garantiza que puede soportar vientos máximos de 32 km/h.

#### **1.4.2.2.1 Diseño de estructura**

El diseño está compuesto por una columna principal de 4 x 2 pulgadas de tubular estructural de calibre 14 con una altura media de 3.5 m, con al menos dos brazos laterales de soporte. En la Figura 1 se presenta una imagen del plano del poste principal. Además del poste principal, el diseño incluye soportes laterales. Cada soporte está sujeto a cada estructura principal con “pestañas salientes” de 3 mm espesor y con tornillos de ½ pulgada. La estructura se ancla al piso mediante tornillos de sujeción de ½ pulgada, en la Figura 3 se presentan los detalles del diseño.

La estructura se fabricó por duplicado como lo requiere el solicitante para formar diseño final. Las estructuras independientes están unidas mediante un travesaño estabilizar de cargas y movimientos transversales.

La estructura cuenta con una aplicación de anticorrosivo primario gris en toda la superficie seguido de esta se aplicó la pintura color azul holandés para su acabado final.

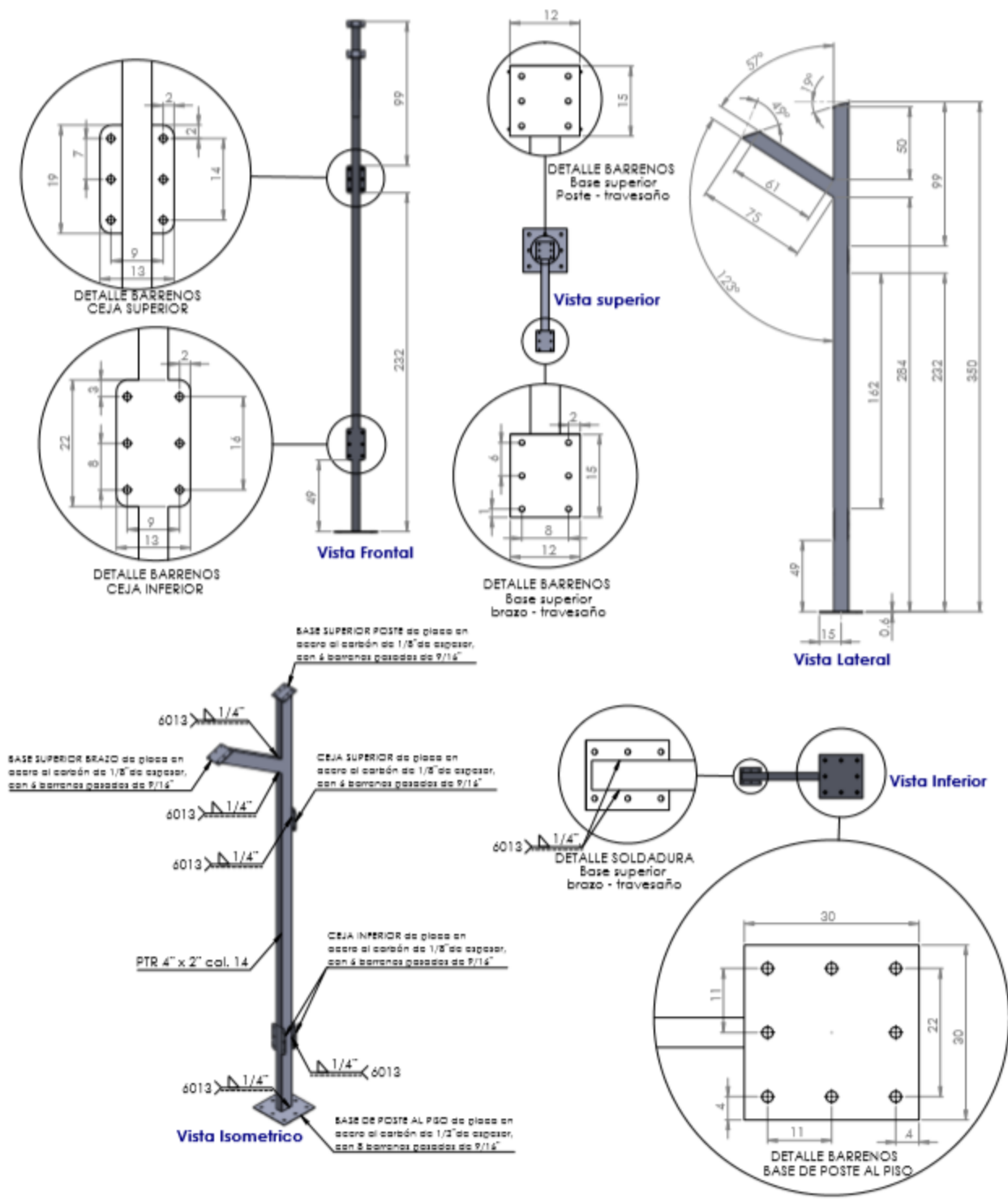


Figura 39 Poste estructural







### 1.4.2.2 Proceso de fabricación.



*Ilustración 36 Perforación de las placas de sujeción y anclaje.*

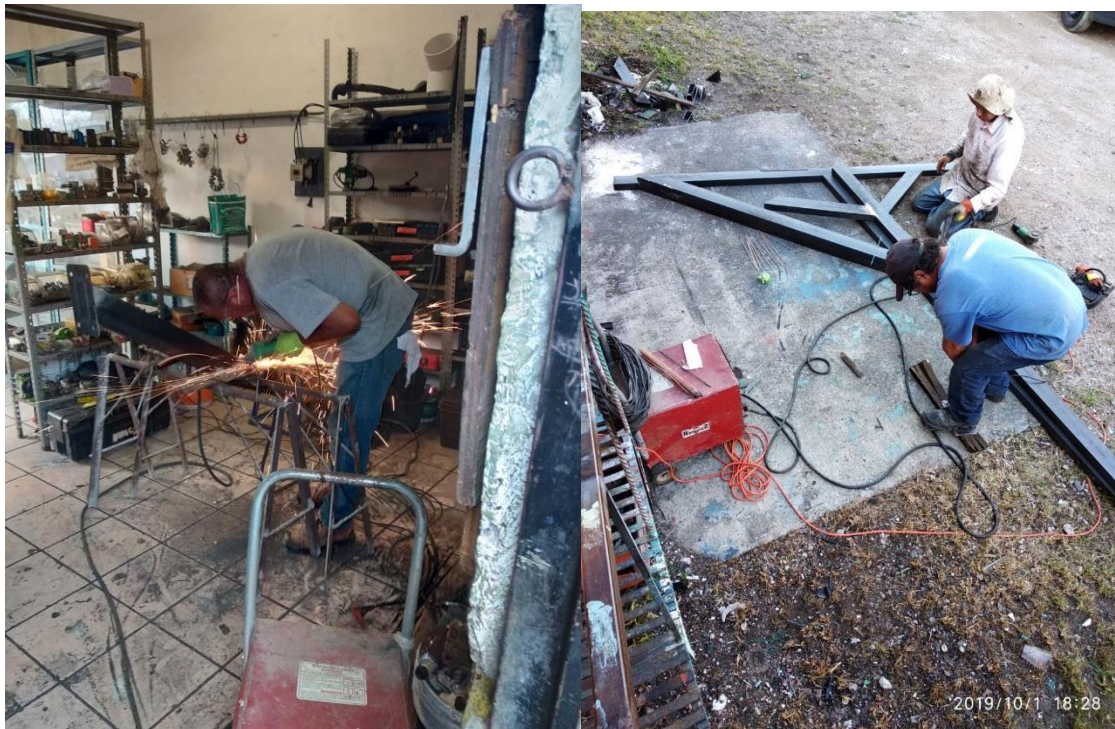


*Ilustración 37 Presentación de piezas antes de soldar.*





*Ilustración 38 Proceso de soldadura.*



*Ilustración 39 Proceso de soldadura de elementos secundarios*





*Ilustración 40 Pre ensamblado de la estructura para paneles fotovoltaicos con primer.*



*Ilustración 41 Pintura final de la estructura.*

#### 1.4.2.2.3 Proceso de instalación.

Para la instalación se realizó el pre armado de los componentes en el sitio que indicó el solicitante del servicio. En la siguiente ilustración, se muestra el proceso de pre armado.



*Ilustración 42 Pre armado de la estructura.*

Una vez realizado dicho trabajo se ubicó la estructura en la dirección N-S geográfico con ayuda del personal IMTA.



*Ilustración 43 Orientación de la estructura.*

Una vez realizada la orientación se fijó la estructura a la base de concreto mediante taquetes metálicos de  $\frac{1}{2}$  pulgada lo que garantiza ráfagas de vientos de más 32 Km Hr. Posteriormente se procede a instalar los perfiles de aluminio de carga. Así mismo se instalaron los panes fotovoltaicos (Ver Ilustración 45).





*Ilustración 44 Armado de la estructura.*



*Ilustración 45 Instalación de paneles fotovoltaicos.*

Finalmente, la estructura instalada quedó como se muestra en las Ilustraciones 46 y 47. Con lo cual el servicio solicitado fue concluido.



*Ilustración 46 vista lateral de la estructura*



*Ilustración 47 Vista frontal*

### 1.4.3 Sistema desalinizador en cultivos.

#### 1.4.3.1 Estudio paramétrico

En el presente trabajo se reporta la construcción de una pequeña unidad área experimental para la producción de aguacate, fresa y arándano basados en agua proveniente de un sistema de desalinización alimentado con energía solar.

#### 1.4.3.2 El agua de riego

La conductividad eléctrica (CE) y el  $\text{Na}^+$  son dos parámetros fundamentales que definen la calidad del agua para riego. El alto contenido de sales en el agua de irrigación genera un aumento de la presión osmótica en la solución del suelo, disminuyendo la adsorción de agua por parte de las plantas. Las sales, además de afectar directamente el crecimiento de las plantas, afecta la estructura del suelo, su permeabilidad y estructura, afectando indirectamente el crecimiento de la planta (Douchafour, 1984). Por lo tanto, existen diversas formas de clasificar el agua para riego agrícola con base a estos dos parámetros. Sin embargo, la más utilizada en diversos países es la propuesta por Richards en 1954 para el Laboratorio de Salinidad de los Estado Unidos (Riverside, California). La clasificación del agua para riego de Richards (1954), se basa en criterios establecidos para zonas áridas y semiáridas de Estado Unidos y considera la peligrosidad sódica y salina a partir del índice de la RAS y el valor de la CE. En las Tablas 1 y 2 se muestra la clasificación de las aguas de riego con base al valor de CE (salinidad) y su índice de RAS (sodicidad) propuesta por Richards (1954); mientras que en la Figura 1 se muestra un diagrama conceptual de clasificación del agua de riego propuesto por el mismo autor.

*Tabla 16 Clasificaciones del agua de riego por su valor de CE (salinidad) utilizado por el Laboratorio de Salinidad de Riverside (Richards, 1954)*

Grupo	CE		Clasificación
	dS/m <sup>(a)</sup>	µS/cm <sup>(b)</sup>	
C1	0.10-0.25	100-250	Agua de baja salinidad, apta para el riego en todos los casos. Pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad.

Grupo	CE		Clasificación
	dS/m <sup>(a)</sup>	µS/cm <sup>(b)</sup>	
C2	0.25-0.75	250-750	Agua de salinidad media, apta para el riego. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad.
C3	0.75-2.25	750-2 250	Agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C4	2.25-4.0	2 250-4 000	Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego. Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C5	4.00-6.0	4 000-6 000	Agua de salinidad excesiva, que sólo debe emplearse en casos muy contados, extremando todas las precauciones apuntadas anteriormente.
C6	6.00-10.0	6 000- 10 000	Agua de salinidad excesiva, no aconsejable para riego.

(a), (b) Anteriormente denominadas mmho/m y µmho/cm, respectivamente.

Tabla 17 Clasificaciones del agua de riego por el índice de RAS (sodicidad) utilizado por el Laboratorio de Salinidad de Riverside (Richards, 1954)

Grupo	RAS	Clasificación
S1	0-10	Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
S2	11-18	Agua con contenido medio en sodio, y por lo tanto, con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad. Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante del suelo, corrigiendo en caso necesario.
S3	19-26	Agua con alto contenido en sodio y gran peligro de acumulación de sodio en el suelo. Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo. También se requiere un buen drenaje y el empleo de volúmenes copiosos de riego.
S4	>26	Agua con contenido muy alto de sodio. No es aconsejable para el riego en general, excepto en caso de baja salinidad y tomando todas las precauciones apuntadas.



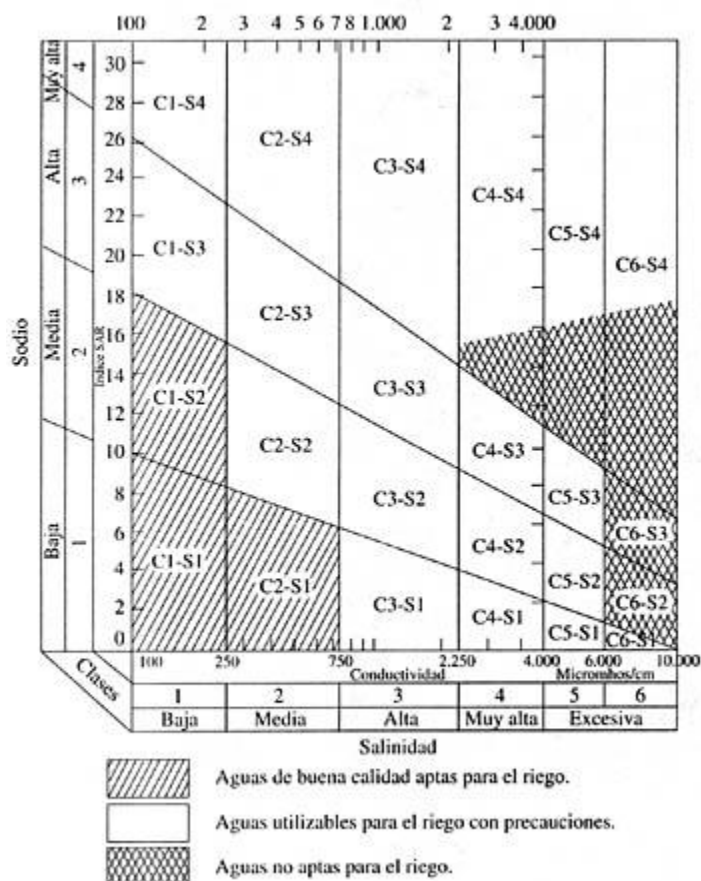


Figura 42 Diagrama conceptual para evaluar la calidad del agua de riego con base en el valor de la CE y el índice de RAS propuesta por Richards (1954) y utilizado por el Laboratorio de Salinidad de Riverside (U.S. Salinity Laboratory).

Además de la clasificación de **Richards (1954)**, existe otro método desarrollado por Ayers y Westcot (1985) para la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). Este método también se basa en los valores del índice de RAS y el valor de la CE, aunque con intervalos y categorías de clasificación diferentes, permitiendo valores de RAS superiores en relación a la clasificación de **Richards (1954)**. Asimismo, contempla los elementos tóxicos esenciales como lo es el sodio, el cloro y el boro, así como los elementos traza como nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y bicarbonatos. Por último, propone un rango de pH en unidades logarítmicas de 6.5 a 8.4. En la Tabla 3 se muestra la clasificación del agua de riego con base en el valor de la CE y el índice de RAS propuesta por Ayers y Westcot (1985).



Tabla 18 Clasificación del agua de riego con base en el valor de la CE y el índice de RAS propuesta por Ayers y Westcot (1985), siendo utilizado por la FAO a partir de 1987.

Problema potencial	Unidades	Grado de restricción de uso		
		Ninguno	Ligero o moderado	Severo
<b>Salinidad</b>				
CE	dS/m <sup>(c)</sup>	< 0.7	0.7-3.0	< 3.0
SDT	mg/L	< 450	450-2000	> 2000
<b>Infiltración</b>				
RAS entre 0 y 3 y CE=		> 0.7	0.7-0.2	< 0.2
RAS entre 3 y 6 y CE=		> 1.2	1.2-0.3	< 0.3
RAS entre 6 y 12 y CE=		> 1.9	1.9-0.5	< 0.5
RAS entre 12 y 20 y CE=		> 2.9	2.9-1.3	< 1.3
RAS entre 20 y 20 y CE=		> 5.0	5.0-2.9	< 2.9
<b>Toxicidad de iones específicos</b>				
Sodio (Na <sup>+</sup> )	meq/L <sup>(d)</sup>	< 3	3-9	> 9
Cloro (Cl <sup>-</sup> )	meq/L <sup>(e)</sup>	< 4	4-10	> 10
Boro (B)	mg/L	< 0.7	0.7-3.0	> 3
<b>Elementos traza</b>				
Nitratos (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	< 5	5.0-3.0	> 30
Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	< 1.5	1.5-8.5	> 8.5
<b>Ph</b>	Unidades logarítmicas		Rango normal 6.5-8.4	

<sup>(c)</sup> Para cambiar de dS/m a  $\mu\text{S}/\text{cm}$  solo multiplicar por 1000

<sup>(d)</sup> Para cambiar de meq/L de Na<sup>+</sup> a mg/L o ppm solo multiplicar por 23

<sup>(e)</sup> Para cambiar de meq/L de Cl<sup>-</sup> a mg/L o ppm solo multiplicar por 35.5

El riego con agua salobre de acuíferos de calidad marginal es una práctica común en países del Oriente Medio, India y en algunas regiones del norte de México (Shaffer et al.; Zarzo et al.). Sin embargo, el potencial de la técnica está limitado por una variedad de

inconvenientes. Estas limitaciones van desde la elección de cultivos de acuerdo con la tolerancia específica a la salinidad, los impactos negativos en la superficie del suelo por la deposición de sal y el alto volumen de agua requerido para lixiviar el exceso de sales. Tales requerimientos pueden hacer que el riego con agua salobre no sea sostenible.

La desalinización es una alternativa que se ha utilizado para aumentar la disponibilidad de agua dulce y brindar oportunidades para el manejo de cultivos de alto valor.

### 1.4.3.3 CULTIVO DE AGUACATE

El aguacate (*Persea americana* Mill.) se encuentra entre los 20 frutales de mayor importancia comercial a nivel mundial, pero su cultivo se encuentra limitado para algunas variedades que son muy sensibles a la salinidad. Debido al aumento de esta limitante en el agua de riego en varias zonas de cultivo, la presente investigación tuvo por objetivo evaluar el efecto del riego con agua salina tratada con sustena desalinizador en plantas de la variedad Hass, a través de indicadores de crecimiento vegetativo aéreo y de raíces. Plantas de un año de edad se trasplantaron y fueron sometidas a riego durante un periodo aproximado de 2 meses. Los portainjertos presentaron aumento de retoño en sus tallos, además de que no se presentó daño en el área foliar por falta de absorción de nutrientes en condiciones de alta salinidad en el agua de riego, lo que es una excelente respuesta al agua obtenida a través de desalinizador.

El aguacate es también uno de los cultivos de mayor expansión en superficie, y se estima que anualmente se producen alrededor de 2.6 millones de toneladas (Rubí et al., 2013). Lo anterior obedece en parte a la excelente calidad organoléptica y nutricional de su fruto, considerado como uno de los más completos en este aspecto por la diversidad de vitaminas y minerales que lo componen (Maldonado-Torres et al., 2007). También obedece a la preferencia de los consumidores, al crecimiento de los mercados locales y la aparición de nuevos países exportadores (Macías, 2011).

El aguacate se ha identificado como uno de los frutales más sensible a las sales (Bernstein et al., 2004; Mickelbart et al., 2007), ya que los árboles de esta especie regados con agua

cuyo contenido de cloruro y sodio se encuentra en niveles tolerables por la mayoría de los cultivos evidencian daño severo en las hojas, restricción del crecimiento vegetativo y disminución del volumen productivo (Bernstein et al., 2001). Esta situación se produce a nivel mundial en aquellas zonas con clima árido y semiárido en que se cultivan aguacates (Schaffer et al., 2013), lo que ha llevado a buscar distintas medidas para enfrentar el problema de salinidad, dentro de las cuales la selección de portainjertos con tolerancia a sales representa una alternativa factible (Crowley et al., 2003).

Las estrategias que desarrollan las plantas para tolerar condiciones de salinidad pueden ser clasificadas en tres grupos: (1) Físicas, que involucran la exclusión o inclusión de sales, seguidas del transporte y compartimentalización de éstas; (2) Morfológicas, relacionadas con la distribución de biomasa en brotes y raíces, además del cierre estomático; y (3) Fisiológicas y metabólicas, que contrarrestan la presencia de sales a nivel celular (Kozlowski, 1997). La tolerancia del aguacate a la salinidad, definida como la habilidad para mantener el crecimiento en ambientes salinos, es mayor en portainjertos de raza Antillana, intermedia en los de raza Guatemalteca y menor en los de raza Mexicana (Ben-Ya'acov y Michelson, 1995).

Además, el nivel de tolerancia al estrés salino varía entre portainjertos pertenecientes a una misma raza, lo que tendría relación con la estrategia mediante la cual enfrentan este tipo de estrés; en los portainjertos de aguacate con tolerancia relativa a la salinidad, se ha demostrado que ésta se relaciona principalmente con su habilidad para evitar la acumulación de sodio y cloro en la variedad injertada y en la capacidad de mantener la relación K/Na en las hojas más viejas (Mickelbart y Arpaia, 2002; Mickelbart et al., 2007).



*Ilustración 48 Planta de aguacate transplantada.*



*Ilustración 49 Cultivo de aguacate tratada con agua salobre*

#### **1.4.4 Unidad experimental con riego hidropónico para cultivo de fresa y arándano**

En el presente trabajo se reporta la construcción de una pequeña área tipo invernadero de fresa y arándano usando riego de agua proveniente de un sistema de desalinización por



nanofiltración alimentado con energía fotovoltaica (NF-PV). Se empleó un sistema de riego por goteo.

#### **1.4.4.1 Características de los cultivos**

La fresa y el arándano son cultivos de gran valor agregado, ya que se pueden transformar en diferentes productos finales como jugos, como fruta seca, té y como ingrediente de otros productos, por ejemplo, yogurt. Este tipo de cultivos se pueden aplicar en zonas templadas y altitudes medias, como es el caso de muchas zonas como la meseta central. Este tipo de cultivos pueden llegar a ser muy rentables a través de la tecnificación; como es el riego por microaspersión y el uso de invernaderos y/o malla-sombra. De acuerdo a lo anterior se identifica un gran potencial para la producción de este tipo de cultivos.

En esta sección se describen las características de los cultivos de la fresa y el arándano.

##### **1.4.4.1.1 Fresa**

Se trata de una planta herbácea, perenne y de porte rastrero. Presentan un sistema radicular fasciculado, compuesto por raíces y raicillas. Las primeras presentan un cambium vascular y suberoso, mientras que las segundas carecen de éste, son de color más claro y tienen un periodo de vida corto (de algunos días o semanas). Estas raicillas sufren un proceso de renovación fisiológico, aunque influenciado por factores ambientales, patógenos de suelo, etc. La profundidad del sistema radicular es variable, dependiendo entre otros factores, del tipo de suelo y la presencia de patógenos en el mismo. En condiciones óptimas pueden alcanzar los 2-3 m, aunque lo normal es que no sobrepasen los 40 cm, encontrándose la mayor parte (90%) en los primeros 25 cm. Los frutos son pequeños achenios de color oscuro dispuestos sobre el engrosamiento del receptáculo.



*Ilustración 50 Planta de fresa.*

## CARACTERISTICAS DESCRIPTIVAS

Familia: Rosaceae

Nombres Comunes: Fresa, frutilla

Origen: Europa (Benacchio, 1982)

Distribución: 70° LN a 55° LS (Benacchio, 1982)

Adaptación: Regiones templadas y subtropicales con invierno definido

Ciclo vegetativo: Triannual

Tipo Fotosintético: C3.

## REQUERIMIENTOS CLIMATICOS Y EDAFICOS

Fotoperiodo: El fotoperiodo y la temperatura controlan significativamente el crecimiento vegetativo y la floración (Santibáñez, 1994). Días largos y cálidos favorecen el crecimiento de la hoja y la formación de la guía (Heide, 1977). Días cortos, despejados y fríos favorecen la floración (Sudzuki, 1988) Altitud: 800 a 2500 m (Benacchio, 1982).

Precipitación (Agua): Se cultiva bajo condiciones de riego. Si se cultiva bajo condiciones de temporal, se debe contar con una precipitación anual entre 900 y 1500 mm, procurando que la planta cuente con suficiente humedad durante los periodos de crecimiento y desarrollo del cultivo, pero con una atmósfera relativamente cálida y seca durante la maduración del

Fruto. Un tiempo lluvioso, nublado y frío en esa época afecta mucho tanto los rendimientos como la calidad de la fresa. Este cultivo no tolera sequía (Benacchio, 1982).

Humedad ambiental: Prefiere condiciones medias de humedad (Yuste, 1997a). Puede prosperar en regiones con bastante humedad atmosférica, sin embargo, al acercarse la maduración es preferible una atmósfera relativamente seca (Benacchio, 1982).

Temperatura: El punto de congelación se encuentra entre  $-3$  y  $-5^{\circ}\text{C}$ , mientras que el punto de crecimiento cero se ubica en  $2-5^{\circ}\text{C}$ ; la temperatura diurna óptima es de  $15-18^{\circ}\text{C}$  y la temperatura nocturna óptima es de  $8-10^{\circ}\text{C}$ . Para el arraigo las temperaturas mínima, óptima y máxima son de  $10$ ,  $18$  y  $35^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, mientras que para la maduración la óptima diurna y la óptima nocturna son de  $18-25^{\circ}\text{C}$  y  $10-13^{\circ}\text{C}$ , respectivamente (Yuste, 1997a). La dormancia en esta especie se puede romper con temperaturas continuas desde  $10^{\circ}\text{C}$ , no así con temperatura de  $14^{\circ}\text{C}$  (Kronenberg et al., 1976). Cerca del límite superior del rango térmico ( $18-25^{\circ}\text{C}$ ) se requieren días cortos para inducir la floración y a  $30^{\circ}\text{C}$  no existe inducción floral (Santibáñez, 1994). La inducción floral se favorece a temperaturas entre  $10$  y  $25^{\circ}\text{C}$ , especialmente a  $14^{\circ}\text{C}$ , en un fotoperiodo de 12 horas (Sudzuki, 1988). La disminución de temperatura y la presencia de días cortos inducen el establecimiento del periodo de dormancia (Shoemaker, 1978). Si durante la dormancia ocurren temperaturas por debajo del punto de congelación, se produce oxidación de la corona, lo cual provoca una reducción en el vigor de la planta y en el llenado del fruto (Santibáñez, 1994). Durante la dormancia, el LT10 (temperatura que destruye el 10% de las estructuras vivas) es de  $-3.8^{\circ}\text{C}$ , mientras que el LT50 y el LT90 son de  $12.5^{\circ}\text{C}$  y  $-21^{\circ}\text{C}$ , respectivamente (Marini y Boyce, 1979). En primavera, después de la dormancia, el LT50 para los botones florales es de  $-5.4^{\circ}\text{C}$  y para frutos inmaduros es de  $-1.6^{\circ}\text{C}$  (Boyce y Stroter, 1984). Los requerimientos de frío para romper el descanso van de 350 a 450 horas (Sudzuki, 1988).

Luz: Prefiere una condición media de iluminación (Yuste, 1997a). Prefiere áreas un poco sombreadas, pero para lograr frutos de calidad, la época de cosecha debería contar con bastante insolación (Benacchio, 1982).

Textura de suelo: Prefiere suelos de textura franco-arenosa (Benacchio, 1982). Profundidad del suelo: Requiere suelos profundos (Benacchio, 1982)

Salinidad: No tolera salinidad y no crece bien en suelos calcareos (Benacchio, 1982). pH: El pH óptimo oscila entre 5.5 y 6.5 (Yuste, 1997a). Desarrolla un rango de 4.5 a 7.0, con un óptimo de 5.7 a 5.8 (Benacchio, 1982).

Drenaje: Requiere suelos con buen drenaje (Yuste, 1997a).

Riego: En el cultivo de fresa se fertirriego. La frecuencia y duración del riego depende de las condiciones climáticas, textura del suelo y necesidades de la planta.

Durante el periodo estival, la frecuencia de riego debe ser mayor, realizando 2-3 riegos por semana. Sin embargo, en invierno es conveniente reducir dicha frecuencia.

#### **1.4.4.1.2 Arándano**

El arándano es un arbusto caduco, que puede ser de porte erecto o rastrero y de altura variable según la especie que se trate. La raíz presenta un sistema radicular compuesto por numerosas raíces, en su mayoría superficiales. Dichas raíces son, generalmente fibrosas, finas y carentes de pelos absorbentes. En condiciones naturales, las raíces están asociadas con micorrizas formando simbiosis. El tallo presenta un pequeño tallo subterráneo (corona), recto, cuadrangular y muy ramificado. Generalmente son de color marrón-anaranjado, según la especie. Cuenta con hojas simples, alternas, con forma elíptico-lanceoladas, márgenes dentados y peciolo corto. Son de color verde cuya intensidad varía dependiendo de la especie. En otoño, adquieren un tono rojizo típico en la especie. Presentan inflorescencias en racimos de 6-10 flores por yema. Las flores individuales son pequeñas, axilares, con el cáliz compuesto de 4-5 sépalos obtusos y la corola blanca formada por 4-5 pétalos fusionados dando lugar a una forma acampanada. El pistilo es simple, de ovario ínfero y estambres en grupos de 8-10. El fruto se trata de una falsa baya de forma esférica,



color azul, rojo o negro en su madurez según la especie. La epidermis del fruto está cubierta de secreciones cerosas. El tamaño de éste está relacionado con el grosor de la rama y la posición en la misma, siendo de menor diámetro aquellos que se encuentran más distales de ésta. En la figura 2 se puede ver una planta de arándano rojo.



*Ilustración 51 Planta de arándano.*

El arándano tiene los siguientes Requerimientos edafoclimáticos:

- Temperatura: El arándano es un cultivo que requiere un determinado número de horas-frío (temperatura inferior a 7°C) para salir de la latencia, que depende de la especie.

Para el desarrollo del cultivo del arándano, el rango óptimo de temperatura oscila entre 16-25°C. No obstante, puede llegar a tolerar temperaturas de hasta -30°C, aunque temperaturas de 28-30°C acompañadas de vientos secos, pueden provocar daños en el fruto como arrugamientos y quemaduras.

Durante la floración, temperaturas inferiores a -5°C pueden provocar daños en los frutos. Por esta razón, la ocurrencia de heladas durante la floración resulta muy perjudicial.

- Humedad: El cultivo del arándano requiere de humedad relativa alta.

- Suelo: Requiere de suelos ligeros, con buena capacidad de drenaje y alto contenido en materia orgánica. Además, se debe mantener la humedad alta, pero sin llegar al encharcamiento, ya que es sensible tanto a asfixia radicular como a sequía.

En cuanto al pH, éste debe ser ácido, siendo el rango óptimo el comprendido entre 4,3-4,8. Un pH superior a 5 puede provocar un desarrollo deficiente en plantaciones jóvenes junto con una brotación clorótica. Sin embargo, un pH bajo ( $\text{pH} < 4$ ) puede dar lugar a toxicidades por manganeso. El pH se debe mantener acidificando el agua de riego. Los suelos calizos no son aconsejables para este cultivo.

- Riego: Se emplea un sistema de riego localizado. Es importante mantener el terreno húmedo, evitando en todo momento el encharcamiento. El agua de riego debe ser de buena calidad sin presentar salinidad ni exceso de calcio, boro o cloro.

Por lo general, se recomienda regar aumentando la frecuencia de riego y disminuyendo la dotación. La demanda de agua es mayor en los meses de primavera, que se corresponden con el engrosamiento y maduración del fruto y en la época de mayor evapotranspiración (meses de verano). Además, durante esta época tiene lugar la iniciación floral, por lo que un déficit de agua durante la formación de las yemas florales resultaría muy perjudicial.

#### **1.4.4.2 Sistema NF-PV de cuatro membranas**

El sistema NF-PV está compuesto por un filtro, módulos de nanofiltración (NF) y sistema de bombeo fotovoltaico (PV-B). La unidad NF está compuesta por cuatro membranas de poliamida NF con una superficie total equivalente de  $30.6\text{m}^2$ . Cuenta con una capacidad nominal de permeado 12 L/ min con una alimentación de 60 L/min, manteniendo una relación 1:5 de permeado respecto a la alimentación. El sistema de bombeo consiste en una planta fotovoltaica con una potencia nominal de 1.92 kW compuesta por ocho módulos de silicio policristalino con una potencia nominal de 240 W cada módulo, que suministra energía a una bomba centrífuga sumergible de corriente directa.

De acuerdo a la ficha técnica, la bomba puede operar de manera continua en un intervalo de 30 a 300 V-DC con una potencia entre 0.40 a 1.42 kW. Sin embargo, por encima de 100 V-DC se pueden obtener rendimientos mayores siendo óptima cuando se acerca 300 V-DC. El acoplamiento de los paneles fotovoltaicos se realiza en una configuración en serie

de modo que es posible obtener un voltaje nominal a la salida de 240 V-DC. El sistema de bombeo fotovoltaico no cuenta con un respaldo de baterías con el fin de reducir los costos de inversión. El sistema NF\_PV se controla mediante un interruptor de encendido y apagado simple. La Figura 3 muestra un diagrama conceptual de un sistema de desalinización de agua salobre NF-PV.

Con respecto a la hidráulica, se mantiene un suministro continuo mediante la recirculación del rechazo, permeado y el depósito que contiene el influente, esto permitió que el cambio en el contenido de sólidos disueltos en el agua de alimentación fuera la mínima, garantizando a lo largo del experimento condiciones casi estables.

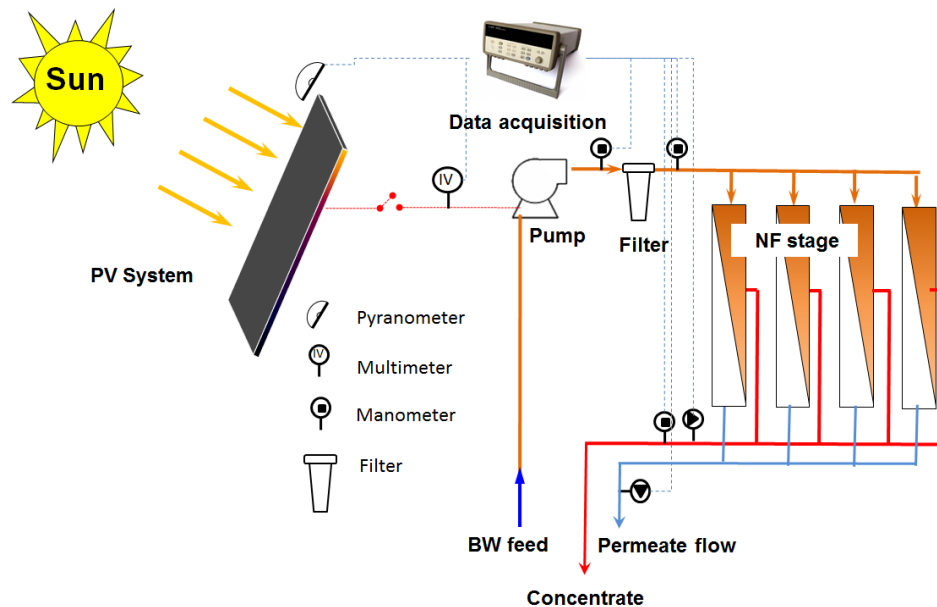


Figura 43 Diagrama conceptual del sistema NF-PV.

En la Figura 4 se muestra el sistema NF-FV construido para regar con agua dulce los huertos de fresas y arándanos.



Ilustración 52 Unidad de Nanofiltración.

#### 1.4.4.2.1 Sistema Hidropónico

El sistema hidropónico para cultivo de fresa está compuesto de la siguiente manera

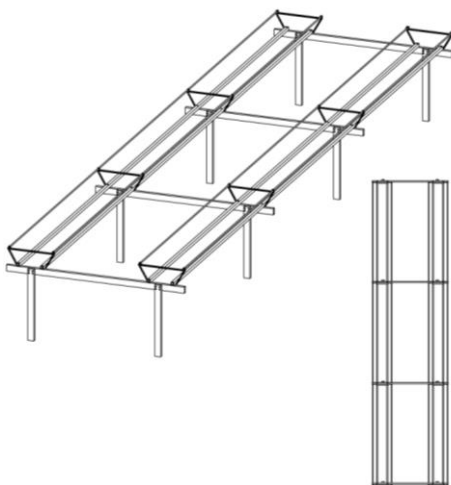


Figura 44 Diseño estructura para soporte de cultivo de fresa



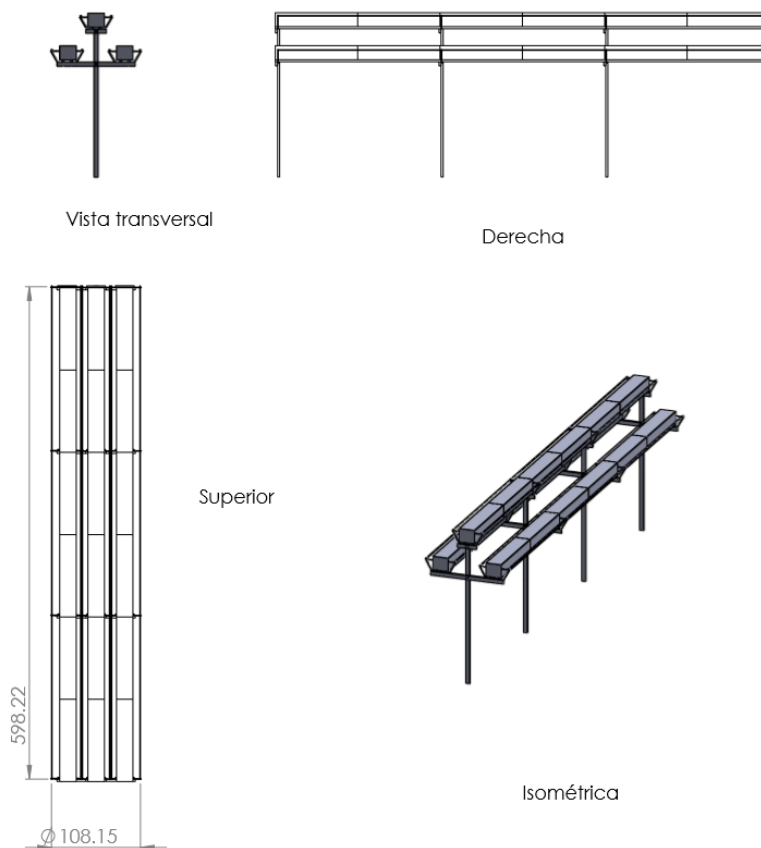


Figura 45 Estructura para cultivo

**Sistema de riego hidropónico.** Sistema de regadío por el cual las raíces de los cultivos reciben una solución nutritiva equilibrada disuelta en agua con todos los elementos químicos necesarios para el desarrollo de las plantas, las cuales pueden crecer directamente sobre la solución mineral, o bien en un sustrato o medio inerte.

Existen diferentes tipos de sistemas hidropónicos clasificados de la siguiente manera:

**Sistemas hidropónicos en medio líquido.**

Estos sistemas no poseen sustratos para el desarrollo de los cultivos, por lo que se produce directamente sobre el agua mediante distintos sistemas que portan las plantas como:

Hidroponía de flujo profundo: **NGS**.

**Sistemas flotantes:** Bandejas Flotantes.

**Sistemas por lámina de agua:** **NFT**.

## **Sistemas hidropónicos en sustrato**

En estos sistemas se cultiva utilizando sustratos inertes irrigados mediante sistemas de riego por goteo, subirrigación, o exudación. Los sustratos más comunes son la perlita, la lana de roca, la fibra de coco y la turba.

### **Cultivos en bancadas o surcos.**

Cultivo en **saco**.

Cultivo en **contenedores individuales o canales**.

Cultivo en **superficie** (enarenados).

## **Sistemas aeropónicos**

Consiste en el cultivo mediante sistemas donde la raíz permanece al aire libre, en un contenedor que la mantiene en la oscuridad, donde se aplica la solución nutritiva en forma de aerosol en forma de niebla. El uso de sistemas hidropónicos se justifica en cultivos de alta rentabilidad que exigen un elevado control del proceso productivo, como son los cultivos en invernadero de cucurbitáceas, tomate, pimiento y fresa.

## **Drenajes en Hidroponía**

Los sistemas hidropónicos necesitan que se establezca un porcentaje de drenaje, sobre todo en sistemas hidropónicos en sustrato, con el objeto de no salinizar el ambiente radicular sobre todo cuando se utilizan en hidroponía aguas salinas.

## **Sistemas a solución perdida**

El agua de drenaje en estos sistemas no se reutiliza en la producción bajo cultivo hidropónico. Normalmente suele utilizarse en el riego de otras parcelas bajos sistemas tradicionales de riego, ya que poseen nutrientes no utilizados por el cultivo hidropónico.

El área que cubre cada micro aspersor a las charolas es reducida pero uniforme, esto es parte del sistema de riego por micro aspersión. Este sistema de riego es ideal para: Forraje Verde Hidropónico, Riego en invernaderos, Riego en viveros, Riego en cultivos hortícolas y riego en jardinería. Están diseñados para brindar una amplia gama de caudales y

diámetros de mojados, brindando un riego eficiente en todas las fases de crecimiento de las plantas y para ahorrar agua y fertilizantes.

El **suministro de agua** es conformado por una bomba sumergible, dispositivo el cual se sitúa al interior de un contenedor de agua. Recurso hídrico que se obtiene de aguas salobres tratada en un sistema de desalinización por osmosis inversa a baja presión (NF).



*Figura 46 Suministro de agua para cultivo hidropónico.*

#### 1.4.4.2.2 Sistema NF-PV de cuatro membranas

El sistema NF-PV está compuesto por un filtro, módulos de nanofiltración (NF) y sistema de bombeo fotovoltaico (PV-B). La unidad NF está compuesta por cuatro membranas de poliamida NF con una superficie total equivalente de  $30.6\text{m}^2$ . Cuenta con una capacidad nominal de permeado 12 L/ min con una alimentación de 60 L/min, manteniendo una relación 1:5 de permeado respecto a la alimentación. El sistema de bombeo consiste en una planta fotovoltaica con una potencia nominal de 1.92 kW compuesta por ocho módulos de silicio policristalino con una potencia nominal de 240 W cada módulo, que suministra energía a una bomba centrífuga sumergible de corriente directa.

De acuerdo a la ficha técnica, la bomba puede operar de manera continua en un intervalo de 30 a 300 V-DC con una potencia entre 0.40 a 1.42 kW. Sin embargo, por encima de 100

V-DC se pueden obtener rendimientos mayores siendo óptima cuando se acerca 300 V-DC. El acoplamiento de los paneles fotovoltaicos se realiza en una configuración en serie de modo que es posible obtener un voltaje nominal a la salida de 240 V-DC. El sistema de bombeo fotovoltaico no cuenta con un respaldo de baterías con el fin de reducir los costos de inversión. El sistema NF\_PV se controla mediante un interruptor de encendido y apagado simple. La Figura 3 muestra un diagrama conceptual de un sistema de desalinización de agua salobre NF-PV.

Con respecto a la hidráulica, se mantiene un suministro continuo mediante la recirculación del rechazo, permeado y el depósito que contiene el influente, esto permitió que el cambio en el contenido de sólidos disueltos en el agua de alimentación fuera la mínima, garantizando a lo largo del experimento condiciones cuasi estables.

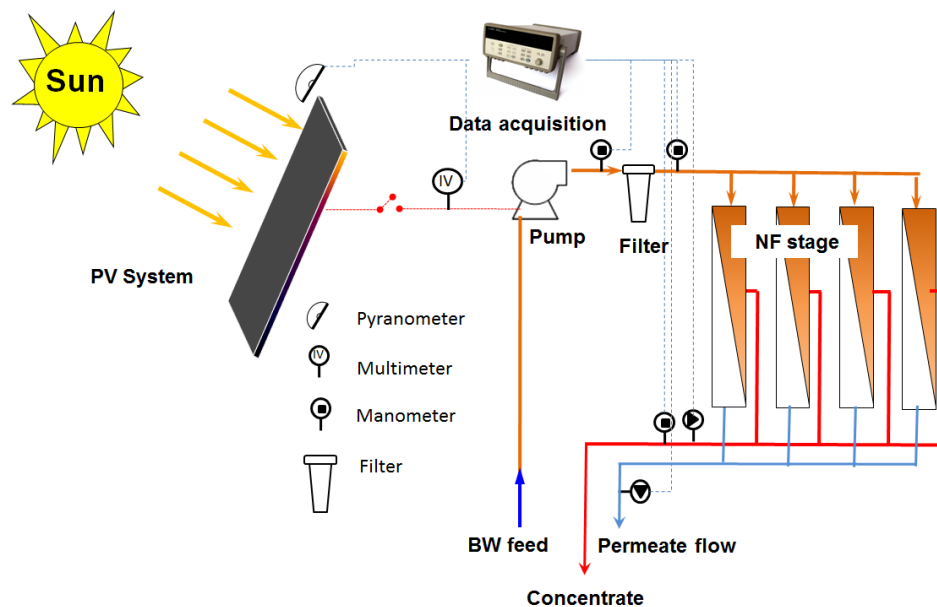


Figura 47 Diagrama conceptual del sistema NF-PV.

En la Figura 9 se muestra el sistema NF-FV construido para regar con agua dulce los huertos de fresas y arándanos.





*Ilustración 53 Unidad de Nanofiltración.*

#### **1.4.4.3 Resultados de la evaluación del sistema de desalinización**

En la evaluación del desempeño de un sistema de desalinización de nanofiltración fotovoltaica se toma en cuenta la producción de permeado en función de la potencia generada por el sistema fotovoltaico, la cual depende de la irradiancia solar. En la figura 10 se puede observar el comportamiento de la irradiancia solar durante el tiempo que duró la prueba. Adicionalmente se midió el flujo del rechazo, el cual puede verse también en la figura 5.1.

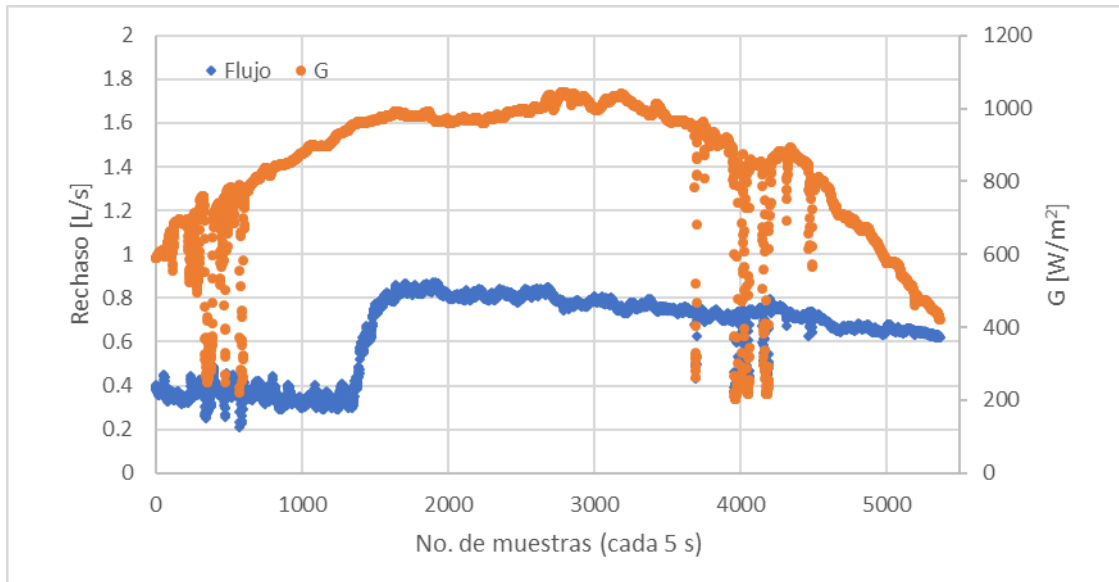


Figura 48 Irradiancia solar y flujo del rechazo durante el experimento.

En la figura 5.2 se puede ver el comportamiento del voltaje y la corriente entregados a la bomba por el sistema fotovoltaico, las variaciones abruptas se deben al paso de nubes como se puede corroborar en la figura 11.

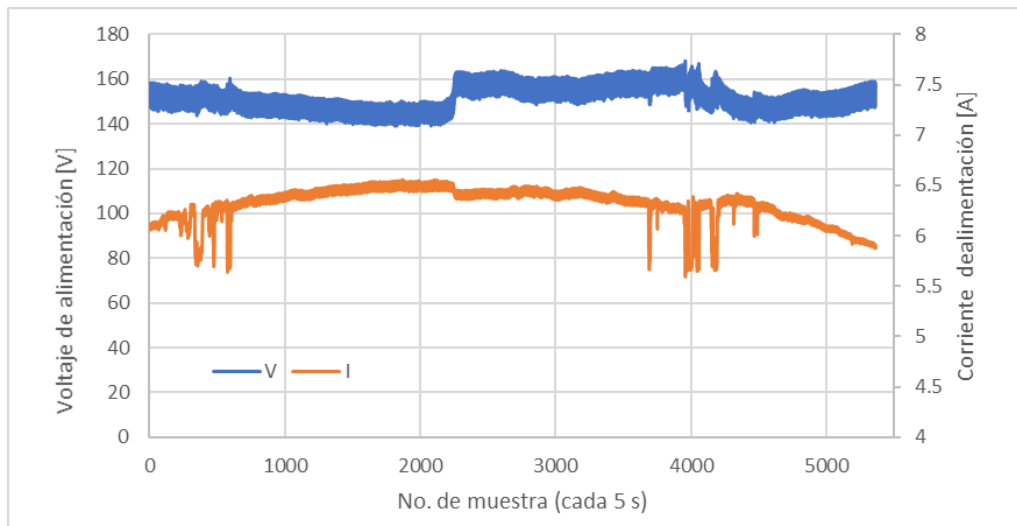


Figura 49 Voltaje y corriente suministrados a la bomba por el sistema fotovoltaico.

En la figura 12 se puede ver la potencia entregada a la bomba por el sistema fotovoltaico en función de la irradiancia solar, donde se puede observar un comportamiento cuasi lineal.

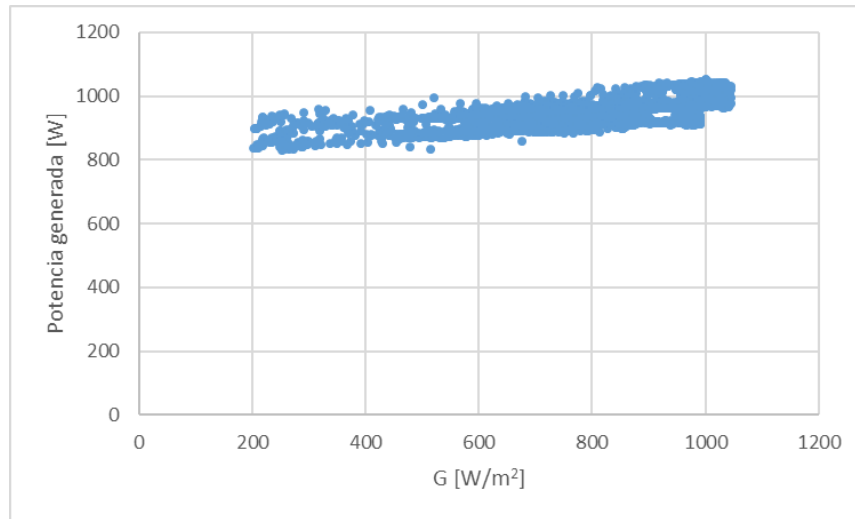


Figura 50 Potencia suministrada a la bomba en función de la irradiancia solar.

En la figura 12 se pueden ver las presiones del sistema en función de irradiancia solar; P1 corresponde a la presión suministrada por la bomba o de entrada del sistema, P2 corresponde a la presión después del filtro de pretratamiento o a la entrada del sistema de NF y P3 es la presión en el rechazo de agua. Se observó que las diferentes presiones se fueron incrementando conforme aumento la irradiancia solar. Se observó una caída de presión importante después del filtro de pretratamiento, que fue desde 10 a 20 psig que puede deberse al ensuciamiento del filtro. Así también se identificó una caída de presión importante en el flujo de rechazo.

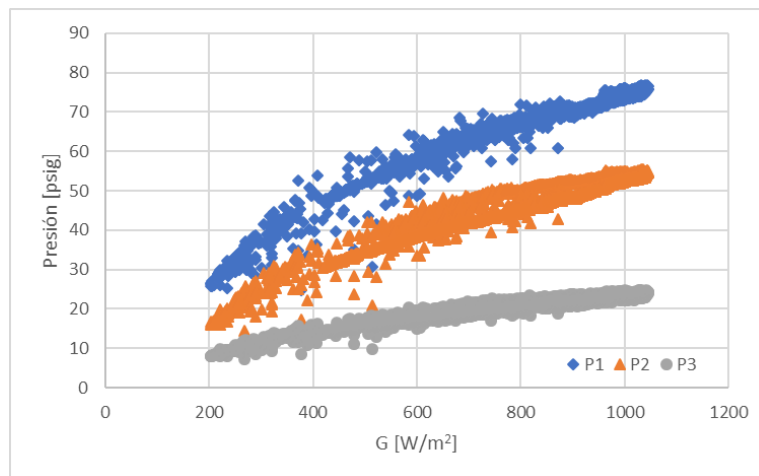


Figura 51 Presiones del sistema en función de la irradiancia solar.

En la figura 5.5 se puede ver la producción de permeado en función de la irradiancia solar, donde se puede observar un comportamiento casi lineal con un coeficiente de correlación  $R^2 = 0.8773$ . La producción de permeado va desde 2 hasta 6 L/min cuando la radiación va de 400 a 1,050  $W/m^2$ .

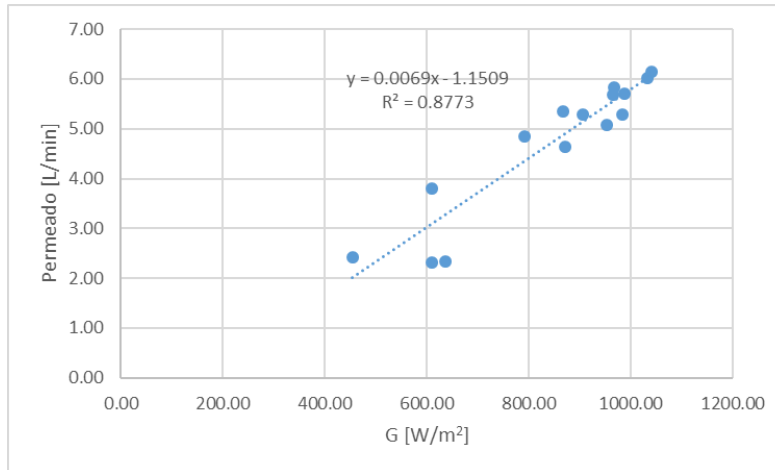


Figura 52 Producción de permeado en función de la irradiancia solar.

En la figura 15 se puede ver la producción de permeado en función de la presión de entrada del sistema P1, la cual a su vez está en función de la irradiancia solar, por lo que también se puede observar un comportamiento casi lineal, con un coeficiente de correlación  $R^2 = 0.8652$ .

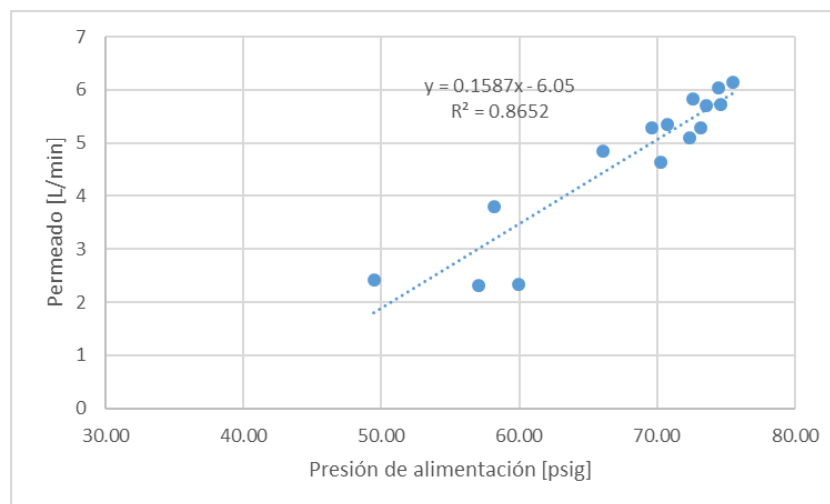


Figura 53 Producción de permeado en función de la irradiancia solar.

En la figura 5.7 se puede ver el comportamiento de la conductividad eléctrica CE y los sólidos disueltos totales SDT en función de la presión de entrada del sistema, donde se puede observar un decremento de dichas variables conforme se incrementa la presión de entrada. El valor máximo de CE estuvo levemente por encima de 180  $\mu\text{S}$ , el cual se encuentra por debajo del límite permisible de 2000 de acuerdo a la NOM 127. El comportamiento de los SDT fue similar, el valor máximo estuvo por debajo de 100 mg/L por debajo del límite máximo de 1000 mg/L.

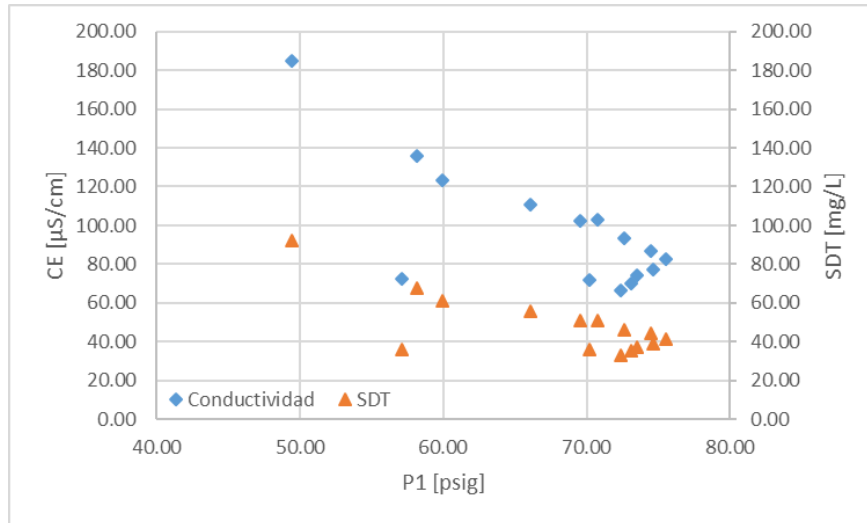


Figura 54 CE y SDT en el permeado en función de la presión de entrada P1.

Durante el tiempo que duró la prueba se produjeron 2,122.76 L de permeado con un consumo de energía de 7.174 kWh, por lo que se obtuvo una razón de consumo energético de 3.38 kWh/m<sup>3</sup>.



Ilustración 54 Cultivo de fresa





*Ilustración 55 Cultivo de fresa regada con agua salobre tratada*

Se llevó a cabo el diseño, construcción y evaluación experimental de un sistema de desalinización por nanofiltración alimentado con energía fotovoltaica. Se utilizó el programa CSMPRO para la selección de las membranas para un sistema de dos membranas y dos contenedores cilíndricos en la producción de  $0.37 \text{ m}^3/\text{h}$  de permeado, lo que representa una producción aproximada de  $2.0 \text{ m}^3/\text{día}$  de agua dulce. Las membranas seleccionadas fueron RE4040-BLN, con un 15% de eficiencia de conversión.

Una vez construido el sistema con las membranas especificadas, se llevó a cabo la construcción del sistema experimental y se llevó a cabo la evaluación del sistema NF-FV. La evaluación experimental se realizó para una CE de  $4000 \mu\text{S}/\text{cm}$  y para SDT de  $2,000 \text{ mg}/\text{L}$ .

En los resultados se pudo observar una relación casi lineal entre la producción de permeado y la intensidad de la irradiación solar, lo cual también se refleja de esta manera para la producción de permeado y la presión de entrada del sistema. Se pudo observar que la CE y los SDT disminuyeron conforme se incrementó la presión de entrada del sistema.

Se pudo observar que la cantidad y calidad del permeado varió conforme cambió la presión de entrada, la cual a su vez depende de la irradiancia solar, por lo que se puede concluir que los sistemas NF-FV no producen agua con parámetros de calidad fijos, sin embargo, si pueden producir agua en un rango que queda por debajo de 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que lo coloca en la clasificación C1 de agua de baja salinidad.

Finalmente se pudo verificar que el cultivo de fresa y arándano crecieron de manera normal con el agua desalinizada proveniente del sistema NF-FV.



*Ilustración 56 Producción de fresa y arándano*

#### 1.4.4.4 Metodología

Se adquirieron aproximadamente 450 plántulas de fresa y 60 plantas de arándano, una vez que llegaron al sitio se procedió a desempacarlas.





*Ilustración 57 Plántulas de fresa.*

Por otro lado, los arándanos se encontraban en mejores condiciones, ya que venían en una caja de cartón y en un sustrato contenido por bolsas. En la figura 6 se puede ver la maniobra de riego de las plantas que llegaron.



*Ilustración 58 Acondicionamiento de las plántulas de fresa y arándano.*

Se armaron tres estructuras para los cultivos, a las cuales se le colocó soporte con cubierta plástica. Se ordenaron en fila las fresas y se implementó el sistema de riego por goteo e hidropónico.



*Ilustración 59 Estructura para riego hidropónico*

En la Ilustración 60 se puede ver el sistema de riego implementado por goteo en las plantas de arándano.



*Ilustración 60 Estructura 1 para riego por goteo*



*Ilustración 61 Estructura con cultivos*



#### 1.4.4.5 Resultados

Las plántulas de fresa al igual que las plantas de arándano sobrevivieron tras el uso continuo de agua obtenida a través del desalinizador, mientras que las plantas de aguacate presentaron crecimiento en sus tallos y frutos. Se construyó el sistema de desalinización por nanofiltración alimentado por energía fotovoltaica y se logró implementar al sistema de riego por micro-aspersión para el cultivo aguacate, así como al sistema por goteo e hidropónico de los cultivos de arándano y fresa.



*Ilustración 62 Cultivos en crecimiento*

#### 1.4.4.6 Artículo

Se apoyó con la adquisición de sales.

**Desalinización por destilación por membrana con espacio de aire: Estudio experimental y evaluación de la calidad del agua**

**R.S. Villalobos-Hernández<sup>1</sup>, J. Ibarra-Bahena<sup>2</sup>, S.E. Garrido-Hoyos<sup>1</sup>, U. Dehesa-Carrasco<sup>3\*</sup>**

<sup>1</sup> Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos, México.

<sup>2</sup> Instituto de Energías Renovables, Universidad Autónoma de México, Privada Xochicalco S/N, Col. Centro, C.P. 62588, Temixco, Morelos, México.



<sup>3</sup> CONACYT Research Fellow, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos, México. \*Autor de correspondencia: [udehesaca@conacyt.mx](mailto:udehesaca@conacyt.mx)

**Palabras clave:** desalinización, salinidad, calidad del agua, unidad AGMD, membranas PTFE y PVDF.

## Resumen

En este trabajo se presenta un estudio experimental de una unidad AGMD destinada para la desalinización. Para este estudio, se realizaron pruebas experimentales específicas a fin de evaluar los parámetros térmicos y determinar la producción de permeado como función de la temperatura de alimentación, así como la evaluación de la calidad del agua de alimentación, rechazo y permeado. Para estas pruebas se emplearon dos tipos de membranas hidrófobas de politetrafluoruro de etileno (PTFE) y fluoruro de polivinileno (PVDF) con un tamaño de poro de 0.45  $\mu\text{m}$ . Se mantuvo constante el flujo de alimentación y enfriamiento en un valor nominal de 0.4 L/min. Las temperaturas de alimentación evaluadas fueron 50, 60, 70 y 80 °C. Como agua de alimentación se emplearon soluciones salinas sintéticas de NaCl y CaSO<sub>4</sub> con una concentración de 5 g/L y 2 g/L respectivamente, así como una mezcla de ambas sales con una concentración de 2 g/L de NaCl + 1 g/L de CaSO<sub>4</sub> y agua desionizada como blanco. Los resultados muestran que la producción de permeado presenta una tendencia de tipo exponencial como función de la diferencia de temperatura promedio entre el canal de alimentación y enfriamiento en ambas membranas. Se observó una producción máxima de permeado de 9.23 L/m<sup>2</sup>h a 80°C con las membranas de PTFE. El calor transferido como calor latente de vaporización en la unidad, utilizando membranas de PTFE, osciló en un intervalo de 77.39% como máximo a un valor mínimo de 49.35% dependiendo de las condiciones de operación. Las contribuciones, por calor sensible a través de la unidad osciló en un intervalo de entre el 35.8% y el 7.4%, mientras que las pérdidas globales hacia el medio ambiente fueron evaluadas en un promedio de 21.8%. En el caso de las membranas de PVDF, se observó un comportamiento muy similar a las membranas de PTFE, por lo que no fue posible establecer una diferencia significativa en el consumo energético entre ambas membranas. Las membranas de PTFE y PVDF de 0.45  $\mu\text{m}$  demostraron ser útiles para el proceso de separación AGMD. En ambos casos, la calidad del agua de permeado se mantuvo por debajo de los límites máximos permisibles (LMP) de calidad de agua para uso y consumo humano establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 (modificada en el 2000), principalmente para los iones mayoritarios de sodio (Na<sup>+</sup>), calcio (Ca<sup>+2</sup>), cloruros (Cl<sup>-</sup>) y sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>).

## 1. Introducción

El incremento acelerado de la tasa de crecimiento de la población mundial da lugar a una alta demanda de agua potable que se prevé que sea de 6 900 millones de m<sup>3</sup> para el 2030. El suministro actual de agua dulce es 4 200 millones de m<sup>3</sup> que está muy por debajo de la proyección de la demanda de agua potable [1]. El problema es más grave en los países en desarrollo, como es el caso de México, donde la proyección del crecimiento de la población es mucho mayor en comparación con los países desarrollados [2]. El reto en los próximos años, consiste en proporcionar una solución sustentable para equilibrar los requerimientos de agua potable. Bajo este contexto, se están buscando fuentes alternativas para solucionar el problema de déficit de este recurso hídrico a partir de la desalinización [3].

La desalinización es un proceso de separación que permite obtener agua de buena calidad a partir de aguas con alto contenido de sales. Este proceso de separación se lleva cabo principalmente por tecnologías térmicas y/o de membranas [4]. Dentro de las tecnologías térmicas se encuentra la destilación por membrana (MD). La MD es una tecnología de separación derivada de la combinación de un proceso térmico de baja entalpia y un proceso de membrana, la cual, a su vez, puede ser asistida con energía solar térmica y/o eléctrica [5,6]. La MD se basa en el principio de la evaporación y condensación del vapor de agua (equilibrio líquido-vapor) [7,8], siendo la presión parcial de vapor de agua que se genera por un gradiente térmico ( $\Delta T$ ) entre la zona de calentamiento y enfriamiento la fuerza impulsora para llevar a cabo este proceso de separación. El vapor

de agua generado, se transporta por difusión a través de una membrana hidrófoba y porosa. El producto generado de este proceso combinado es agua destilada [9,10].

La MD presenta ciertas ventajas competitivas respecto a las tecnologías de desalinización convencionales. Al ser una tecnología térmica de baja entalpía, el consumo energético es bajo comparado con la destilación rápida multietapa (MSF) y la destilación múltiples efectos (MED) [11-13]. Puede acoplarse con energías renovables como la geotérmica [14] o la solar térmica [15,16]. Su configuración permite construir sistemas más compactos e instalarlos en zonas remotas donde el suministro de energía y de agua potable es escaso o nulo [17,18]. Puede operar a presiones bajas (1 bar), soportar concentraciones altas de salinidad (200 000 ppm) y tratar aguas de rechazo (salmueras) de los sistemas de osmosis inversa (RO) sin afectar el flujo de vapor de agua. La calidad de agua producto es mejor (<10 ppm) que en los sistemas RO, reportándose tasas de rechazo de salinidad entre el 96% y 100% [19-23]. Las membranas empleadas en este proceso son estrictamente hidrófobas y porosas por lo que resultan ser más resistentes al ensuciamiento e incrustaciones por sales [24-27].

La destilación por membrana con espacio de aire (AGMD) es una configuración deriva de la MD. En esta configuración, el vapor de agua permea a través de una membrana hidrófoba y porosa, difundándose a través de un espacio de aire. La transferencia del vapor de agua se lleva a cabo por difusión térmica y ordinaria, mientras que la transferencia de calor se da por calor latente y sensible [28]. Diversos estudios teóricos y experimentales han demostrado el potencial y la viabilidad de la AGMD para llevar a cabo la desalinización. Por ejemplo, Alkhubiri y Hilal (2016) realizaron un estudio experimental para investigar la influencia del tamaño de poro de la membrana y el efecto que causa el incremento de la salinidad sobre el flujo de permeado, el consumo de energía y el factor de rechazo de sal. Para este estudio utilizaron una configuración AGMD y cuatro soluciones salinas sintéticas altamente concentradas de NaCl, MgCl<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

El área efectiva de la membrana como el espesor de aire no es mencionado por los autores. Se realizó un estudio comparativo con membranas comerciales de PTFE con diferentes tamaños de poro (0.2, 0.45 y 1.0 µm). Todos los experimentos se llevaron a cabo con un flujo y una temperatura constante de 1.5 L/min y 50°C para la alimentación y 8.5 L/min y 10 °C para el enfriamiento, respectivamente. Los resultados muestran una disminución del flujo de permeado y un aumento del consumo de energía conforme incrementa la concentración de sal en todos los casos. Esto debido al aumento del punto de ebullición de la solución salina y al fenómeno de ensuciamiento de las membranas (incrustaciones), lo cual genera una caída en la presión de vapor y un aumento de la temperatura de polarización [29]. En el caso particular de las soluciones salinas de NaCl empleando membranas de PTFE de 0.45 µm, el flujo de permeado disminuyó de 3.5 a 1.8 g/m<sup>2</sup>s y el consumo de energía aumentó de 0.013 a 0.035 kWh/g conforme aumentó la concentración de sal de 5 844 a 180 000 ppm.

Por otra parte, se observó un incremento del flujo de permeado y una ligera disminución del consumo de energía con el aumento del tamaño de poro de la membrana. Estos autores utilizaron soluciones salinas de NaCl a una concentración máxima de 180 000 ppm, reportando un aumento porcentual del flujo de permeado del 39.6% y del 56.9% para membranas de PTFE con un tamaño de poro de 0.2 µm a 0.45 µm y de 0.2 µm a 1.0 µm, respectivamente. Por último, los autores observaron que el factor de rechazo de sal disminuye con el incremento de la concentración salina y con el aumento del tamaño de poro de la membrana. Se reporta un porcentaje de disminución mayor para las membranas PTFE 1.0 µm (<99.6%). Sin embargo, aumenta levemente para PTFE 0.45 µm (>99.6%) y permanece constante para PTFE 0.2 µm (100%). Resultados similares también han sido reportados por Drioli *et al.* [7], He *et al.* [32] y Calabro *et al.* [33], confirmando que la disminución en el factor de rechazo de sal se debe a la disminución de la presión de entrada de líquido (LEP), esto se debe a que el LEP disminuye cuando el tamaño de poro aumenta bajo una concentración más alta [].

Sanmartino *et al.* (2016) realizaron un estudio experimental para estudiar y conocer el desempeño inicial del proceso AGMD, basándose en el rendimiento del flujo de permeado y el estudio del ensuciamiento de la membrana. Estos autores realizaron nueve experimentos utilizando membranas de PTFE con un tamaño de poro de 0.2 y 0.45  $\mu\text{m}$ . De los nueve experimentos, cuatro estuvieron enfocados en la caracterización del sistema AGMD. En estos primeros cuatro experimentos se mantuvo constante la temperatura de alimentación a 65 °C, con un tiempo de duración de 2 horas y utilizando como agua de alimentación 30 g/L de NaCl y agua destilada como testigo. Los cuatro experimentos siguientes estuvieron enfocados en conocer el desempeño del proceso AGMD, manteniendo las mismas condiciones previas, pero variando la temperatura de alimentación de 45 a 82 °C. Por último, el experimento restante se enfocó en estudiar la sobresaturación de la solución salina sintética del NaCl (65 g/L) y el ensuciamiento por incrustaciones y cristalización de la sal. En este experimento, el tiempo de prueba estuvo en función de la concentración de saturación del NaCl y de la temperatura de alimentación (45 a 82 °C), las cuales disminuyeron conforme aumentaba la temperatura de alimentación. En todos los experimentos el flujo de alimentación y la temperatura de enfriamiento se mantuvieron constantes a 100 L/min y 25 °C, respectivamente.

Después de cada experimento, se hizo circular agua destilada a través del sistema AGMD durante al menos 1 h para eliminar los residuos de sal restantes en el módulo de membrana hasta igualar la conductividad eléctrica del agua destilada. Los resultados más relevantes muestran un mayor flujo de permeado de  $23.84 \pm 0.09 \text{ kg/m}^2\text{h}$  y  $46.50 \pm 0.21 \text{ kg/m}^2\text{h}$  y una eficiencia térmica de 80.97% y 96.06% para las membranas de PTFE de 0.2 y 0.45  $\mu\text{m}$ , respectivamente, cuando se aplicó la temperatura más alta. Se consiguió un destilado de buena calidad ( $<0.5 \text{ g/L NaCl}$ ) y un elevado factor de rechazo de sal ( $>99.89$ ) en ambas membranas al tratar soluciones salinas altamente concentradas. Una vez superado el límite de saturación de NaCl, las propiedades de las membranas cambiaron (ángulo de contacto y porosidad) al presentarse incrustaciones de sal (cristalización), reduciendo con ello la hidrofobicidad de la membrana y por ende la eficiencia térmica del proceso AGMD. Esto se debe a la continua deposición y crecimiento de cristales de sal en la superficie de la membrana y dentro de los poros de la misma, ocurriendo el fenómeno de ensuciamiento y/o la humectación de los poros de la membrana, provocando con ello la reducción de la vida útil de las membranas y el aumento del flujo de permeado con una disminución de la calidad del permeado [].

Xu *et al.* (2016) realizaron un estudio comparativo de diez membranas comerciales de PP, PTFE y PVDF con diferentes tamaños de poro (0.1, 0.2, 0.45 y 1  $\mu\text{m}$ ). Estos autores estudiaron el efecto que causa un incremento de la concentración de sal, un aumento de la temperatura y la variación de la velocidad del flujo de alimentación, así como las propiedades intrínsecas de la membrana como el espesor, el tamaño de poro, la composición y el soporte de la membrana sobre el flujo de permeado. Para todas las membranas, los resultados muestran una tendencia positiva del flujo de permeado cuando el tamaño de poro de la membrana aumenta y la temperatura y el flujo de alimentación incrementan. Sin embargo, se observa lo contrario cuando la concentración salina aumenta y el tamaño del poro de la membrana se reduce. Se realizó un estudio experimental en una unidad AGMD con un área efectiva de 0.005  $\text{m}^2$  y un espacio de aire de 10 mm. Para este estudio se empleando soluciones salinas sintéticas de diversas sales (NaCl,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaHO}_3$ ,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), variando la concentración de sal de 40 a 120 g/L, el flujo de alimentación de 0.03 a 0.18 m/s y la temperatura de alimentación de 40 a 80 °C. Tanto el flujo como la temperatura de enfriamiento se mantuvieron constantes a 0.07 m/s y 20 °C, respectivamente. Se obtuvo un mejor flujo de permeado (5  $\text{kg/m}^2\text{h}$ ) y una mayor eficiencia térmica (97%), así como un mayor porcentaje de rechazo de sal (100%) con las membranas de PP comparado con las membranas de PVDF y PTFE, esto debido a su composición (hidrofobicidad) y su baja conductividad térmica, lo cual permite tener un mejor rendimiento al emplearlas en sistemas AGMD.

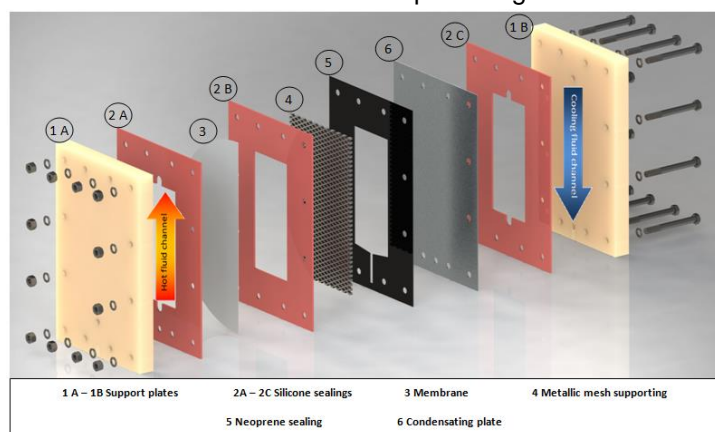
Por último, un mayor flujo de permeado se observó utilizando membranas con un tamaño de poro mayor (1  $\mu\text{m}$ ). Sin embargo, el factor de rechazo de sal disminuye conforme aumenta el tamaño de poro, mostrando un mejor porcentaje de rechazo de sal las membranas con poros menores o iguales a 0.45  $\mu\text{m}$ . Los autores concluyen que las membranas adecuadas para el proceso AGMD son aquellas que tienen un tamaño de poro entre 0.2 y 0.45  $\mu\text{m}$ , teniendo un factor de rechazo de sal  $>99.9\%$ . Sin embargo, el flujo de permeado en todas las membranas se ve afectado por un incremento en la salinidad, principalmente arriba de 80 g/L. Asimismo concluyen que el espesor, el soporte y la porosidad de las membranas no influyen significativamente en el proceso AGMD. Esto debido a que el espesor de la membrana es mucho menor que el espacio que existe entre la membrana y el espacio de aire y el soporte solo reduce el flujo de permeado en un 2.35%. Sin

embargo, la composición de la membrana si influye significativamente en el proceso AGMD, principalmente en el flujo de permeado; teniendo un mejor rendimiento las membranas de PP, seguido de las membranas de PVDF y por ultimo las membranas de PTFE.

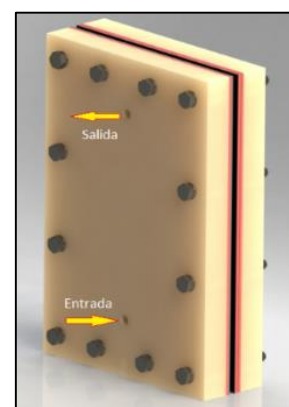
## 2. Metodología

### 2.1 Descripción de la unidad desalinizadora AGMD

En la Fig. 1 se muestra una descripción grafica de la unidad experimental AGMD, la cual consta de los siguientes elementos: dos placas laterales de Nylon con un espesor de 254 mm (1A y 1B), para reducir las pérdidas de calor al medio ambiente; varias juntas de polipropileno (2A, 2B y 2C) con un espesor de 1 mm respectivamente, esto con el fin de sellar y asegurar la separación correcta de los canales de flujo; una membrana porosa e hidrófoba de PTFE o PDVF con un tamaño de poro de  $0.45\mu\text{m}$  (3); una malla de alambre de metal revestido con un espesor de 10 mm y una geometría romboidal (4); una junta de silicona (5) con un espesor de 3 mm para mantener el espacio de aire y por último, una placa condensadora de aluminio (6) para llevar acabo la condensación del vapor de agua.



(a)



(b)

Fig. 1. Vista explosionada de la unidad AGMD (a) y unidad ensamblada (b).

### 2.2 Descripción del prototipo experimental del sistema desalinizador

El diseño experimental del sistema desalinizador está integrado por dos zonas de calentamiento (sección A y B), una unidad desalinizadora AGMD (sección C) y una zona de enfriamiento (sección D) como se muestra en la Fig. 2. La sección A, está integrada por una bomba de recirculación de flujo variable marca Aquapack modelo LOOP3V32-9/1115 y un termotanque de 20 L, el cual, contiene en su interior cuatro resistencias eléctricas marca Voltech de 750 W. El fin de esta sección, es aumentar la entalpia de la solución salina que estará contenida en el termotanque de la sección B. La sección B, está integrada por una bomba de recirculación de flujo variable marca Aquapack modelo LOOP3V32-9/1115, dos válvulas de paso marca Foset, un flujómetro de precisión marca IR-Opflow Tipo 1 y un termotanque de 30 L, el cual, a su vez, contiene un serpentín de acero inoxidable. El fin de esta sección, es suministrar solución salina caliente a la unidad AGMD. La sección C, está integrada por la unidad desalinizadora AGMD con dimensiones de 30 cm x 20 cm x 7 cm, la cual, a su vez, puede contener alguna de las dos membranas a utilizar de PTFE o PVDF de  $0.45\mu\text{m}$ , teniendo un total de  $0.0144\text{ m}^2$  como área efectiva. El objetivo de esta sección es llevar a cabo el proceso de evaporación-condensación, para lo cual, se recirculará solución salina caliente por un lado y por otro, agua a temperatura ambiente que será suministrada por la sección D. La sección D, está integrada por una bomba de recirculación de flujo variable marca Aquapack modelo LOOP3V32-9/1115, dos válvulas de paso marca Foset, un flujómetro de precisión marca IR-Opflow Tipo 2 y un tanque de almacenamiento de agua de 100 L. El objetivo de esta sección es suministrar agua a temperatura ambiente a la unidad AGMD para que se lleve a cabo el proceso de condensación. Cabe mencionar que los termotanques, así como la tubería y las bombas, están cubiertas de hule espuma de 1 cm de espesor, esto con el propósito de minimizar pérdidas de calor al ambiente.



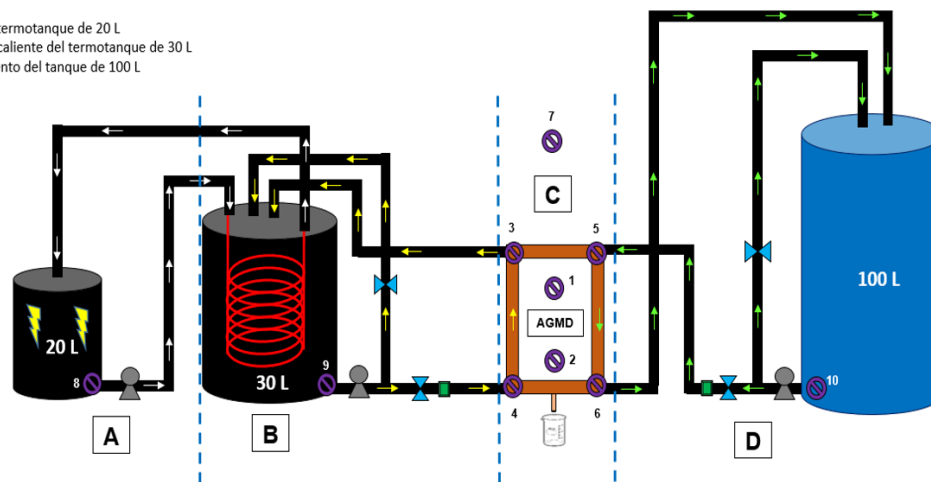
**Ubicación de Termopares:**

- 1 Interior de la unidad AGMD (anverso de la membrana)
- 2 Interior de la unidad AGMD (reverso de la membrana)
- 3 Salida de la solución salina caliente de la unidad AGMD
- 4 Entrada de la solución salina caliente a la unidad AGMD
- 5 Entrada del agua de enfriamiento a la unidad AGMD
- 6 Salida del agua de enfriamiento de la unidad AGMD
- 7 Temperatura ambiente
- 8 Salida de agua caliente del termostanque de 20 L
- 9 Salida de la solución salina caliente del termostanque de 30 L
- 10 Salida de agua de enfriamiento del tanque de 100 L

- ⇨ Flujo de agua caliente
- ⇨ Flujo de solución salina caliente
- ⇨ Flujo de agua de enfriamiento

**Simbología:**

- Bomba
- Resistencia eléctrica
- Válvula de paso
- Serpentin
- Flujómetro
- Termopar
- A** Zona de calentamiento A
- B** Zona de calentamiento B
- C** Unidad AGMD
- D** Zona de enfriamiento



**Fig. 2.** Diseño experimental del sistema desalinizador.

### 2.3 Instrumentación del prototipo experimental

Para medir la temperatura se emplearon diez termopares tipo T (cobre-constan) calibre 28 con una incertidumbre de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . La ubicación de los termopares se muestra en la Fig 2. Los flujos de alimentación tanto de la solución salina caliente (flechas amarillas) como la del agua de enfriamiento (flechas rojas) se mantuvieron a un flujo constante de 0.4 L/min. Para este fin se utilizaron dos flujómetros de precisión Tipo 1 y 2 marca IR-Opflow. Los datos de temperatura y flujo durante las pruebas, fueron monitoreados y almacenados en el sistema de adquisición de datos cada 10 segundos a partir del estado estacionario. Para este fin, se utilizó un compact Fiel Point marca KEYSIGHT modelo 34970A. Para el manejo del adquirente de datos se utilizó un programa desarrollado por Agilent Technology sobre la plataforma BenchLink Data Logger 3 Versión 4.3, el cual permite monitorear, almacenar y exporta los datos adquiridos para su procesamiento en hoja de cálculo de Excel.

### 2.4 Preparación de las soluciones salinas sintéticas

Las sales utilizadas en este trabajo fueron cloruro de sodio (NaCl) y sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) marca J. T. Baker, con una pureza del 99% y 100%, respectivamente. Estas sales se eligieron con base en la presencia y aporte de iones mayoritarios tanto monovalente como divalentes presentes en el agua marina y/o salobre. Por una parte, aportando cationes de sodio ( $\text{Na}^+$ ) y calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ); y, por otro lado, aportando aniones como cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) y sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), respectivamente. En la Tabla 1 se muestran las propiedades físicas y químicas de las sales utilizadas para este trabajo, mientras que las características fisicoquímicas de las soluciones salinas sintéticas se muestran en la sección de resultados.

**Tabla 1.** Propiedades físicas y químicas de NaCl y  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Propiedades	NaCl	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Marca	J.T. Baker	J.T. Baker
Pureza	99.9 %	98.0 – 100 %
Número de CAS	7647-14-5	10101-41-4
Apariencia	Crystal	Polvo
Color	Incoloro-Blanco	Blanco
Peso molecular	58.44 g/mol	172.17 g/mol

Densidad	2.16 g/mL	2.32 g/mL
Punto de fusión	801°C	1 450 °C
Punto de ebullición	1 465°C	-----
Solubilidad en agua	40 g /100 mL	2.35 g/L

#### 2.4.1 Solución salina con NaCl

Se obtuvo una concentración de 5 g/L de NaCl disolviendo 150 g de NaCl en 30 L de agua desionizada; simulando con ello, la presencia del catión sodio (0.217 mol/L Na<sup>+</sup>) y del anión cloruro (0.141 mol/L Cl<sup>-</sup>), presentes con mayor frecuencia en el agua marina.

#### 2.4.2 Solución salina con CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O

Se obtuvo una concentración de 2 g/L de CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O disolviendo 60 g de CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O en 30 L de agua desionizada; simulando con ello, la presencia del catión calcio (0.05 mol/L Ca<sup>2+</sup>) y del anión sulfato (0.021 mol/L SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), presentes con mayor frecuencia en el agua salobre.

#### 2.4.3 Solución salina con NaCl + CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O

Se disolvieron 60 g de NaCl y 30 g de CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O en 30 L de agua desionizada, obteniendo una concentración de 2 g/L de NaCl y 1 g/L de CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, respectivamente; simulando con ello, la presencia de iones mayores de sodio (0.087 mol/L Na<sup>+</sup>), calcio (0.025 mol/L Ca<sup>2+</sup>), cloruro (0.056 Cl<sup>-</sup>) y sulfato (0.01SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), presentes con mayor frecuencia en el agua salobre y marina.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Evaluación de la producción de permeado

En las Tablas 2 y 3 se muestran los promedios de los flujos y de las temperaturas de alimentación en ambos canales, así como su respectiva desviación estándar al emplear membranas de PTFE y PVDF. En cada una de las pruebas la temperatura de alimentación estuvo muy cerca del valor nominal y el flujo de alimentación ligeramente bajo en ambos casos.

**Tabla 2.** Promedios y desviaciones estándar empleando membranas de PTFE de 0.45 µm

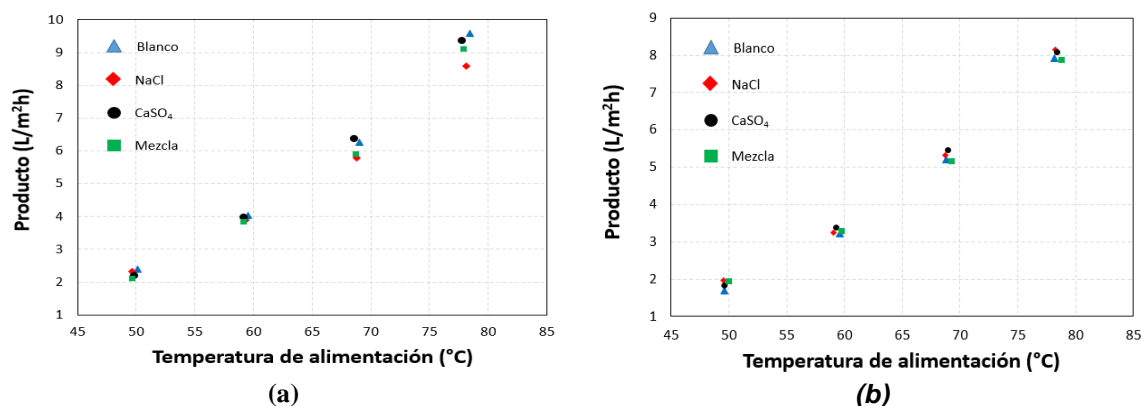
Agua de alimentación	Temperatura de alimentación (°C)				Flujo de alimentación (L/min)	
	50	60	70	80	Calentamiento	Enfriamiento
Blanco	50.2 ± 0.2	60.2 ± 0.2	70.2 ± 0.2	80.2 ± 0.2	0.42 ± 0.02	0.42 ± 0.02
NaCl	50.3 ± 0.1	60.3 ± 0.2	70.3 ± 0.2	80.2 ± 0.1	0.42 ± 0.02	0.42 ± 0.02
CaSO <sub>4</sub>	50.3 ± 0.2	60.3 ± 0.1	70.3 ± 0.2	80.2 ± 0.2	0.41 ± 0.02	0.41 ± 0.02
NaCl + CaSO <sub>4</sub>	50.3 ± 0.2	60.3 ± 0.2	70.3 ± 0.2	80.3 ± 0.2	0.43 ± 0.01	0.43 ± 0.01

**Tabla 3.** Promedios y desviaciones estándar empleando membranas de PVDF de 0.45 µm

Agua de alimentación	Temperatura de alimentación (°C)				Flujo de alimentación (L/min)	
	50	60	70	80	Calentamiento	Enfriamiento
Blanco	50.1 ± 0.1	60.1 ± 0.1	70.1 ± 0.1	80.1 ± 0.1	0.40 ± 0.01	0.42 ± 0.01

NaCl	$50.2 \pm 0.2$	$60.2 \pm 0.2$	$70.2 \pm 0.2$	$80.2 \pm 0.2$	$0.42 \pm 0.02$	$0.42 \pm 0.02$
CaSO <sub>4</sub>	$50.2 \pm 0.2$	$60.2 \pm 0.2$	$70.2 \pm 0.2$	$80.2 \pm 0.2$	$0.41 \pm 0.02$	$0.41 \pm 0.02$
NaCl + CaSO <sub>4</sub>	$50.2 \pm 0.2$	$60.2 \pm 0.2$	$70.2 \pm 0.2$	$80.2 \pm 0.2$	$0.43 \pm 0.01$	$0.43 \pm 0.01$

En las Figs. 3a y 3b se muestra la producción de permeado como función de la temperatura de alimentación para la membrana de PTFE y PVDF, respectivamente. Se observa que al aumentar la temperatura de alimentación la producción de permeado también aumenta, esto debido a que al incrementar la temperatura la energía cinética de las moléculas de vapor de agua es mayor, por lo tanto, habrá un mayor flujo de vapor y por ende se generará una mayor producción de permeado. Lo anterior concuerda con los estudios realizados por Alkudhiri []. En ambas membranas se logra ver este comportamiento. Sin embargo, a pesar de que tienen el mismo tamaño de poro, se aprecia una mayor producción de permeado con las membranas de PTFE respecto a las membranas de PVDF. Esto se le puede atribuir a los procesos de fabricación y a las propiedades intrínsecas de cada membrana como: la composición, el espesor, la porosidad, la hidrofobicidad y la tortuosidad de cada membrana.



**Fig. 3.** Producción de permeado como función de la temperatura de alimentación para una membrana de (a) PTFE y (b) PVDF.

Como se mencionó anteriormente, la diferencia de temperatura promedio entre los canales de alimentación representa la fuerza impulsora efectiva del proceso MD. Una manera de visualizar lo anterior es graficando la producción de permeado como función de esta diferencia de temperatura. La Fig. 4 muestra el comportamiento del volumen del permeado en función de la diferencia promedio de temperatura entre ambos canales de alimentación. En la figura,  $T_H$  representa la temperatura promedio de la entrada y la salida del canal de calentamiento y  $T_C$  la temperatura promedio del canal de enfriamiento. Claramente el volumen del permeado es mayor cuando la diferencia de temperatura es mayor, ya que tanto la difusión térmica como la difusión de concentración son favorecidas.

Por otro lado, la evaporación del agua en presencia de aire puede describirse utilizando la ecuación de Antoine. Esta ecuación que se deriva de la ecuación de Clausius–Clapeyron es de tipo exponencial. Una de las consideraciones en la AGMD es que la membrana no afecta el equilibrio líquido-vapor. Por lo tanto, la producción de permeado también debería presentar comportamiento de este tipo como una función de la temperatura de alimentación. En la Fig. 5 las líneas discontinuas representan un ajuste de tipo exponencial. Se observa que la producción de permeado tiene una tendencia de este tipo, alcanzando un máximo a 80°C. Este comportamiento en la producción de permeado ha sido reportado por otros autores [].

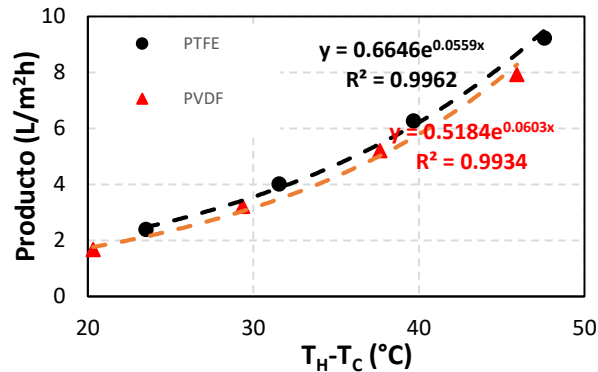


Fig. 4. Producción de permeado como función de la diferencia de temperatura de alimentación en membranas de PTFE y PVDF.

### 3.2 Temperatura de enfriamiento y efectos de la producción de permeado

Durante las pruebas realizadas la temperatura en el canal de enfriamiento fue un parámetro libre que dependía de las condiciones atmosféricas. A lo largo de las pruebas, la temperatura a la entrada del canal de enfriamiento sufrió un cambio de 26.0°C a 35.0°C. De acuerdo con Alkhdhiri [] los efectos de la temperatura, en el canal de enfriamiento, sobre la producción de permeado son pequeños. Por ejemplo, los autores reportan una disminución del 6% en la producción del permeado al pasar de 5°C a 20°C manteniendo constante la temperatura de alimentación. Las Figs. 5a y 5b muestran la producción de permeado como función de la diferencia de temperatura entre el canal de alimentación y enfriamiento para una membrana de PTFE y PVDF, respectivamente. Como se ha descrito previamente la temperatura de alimentación se mantuvo en un valor constante. Sin embargo, la temperatura de enfriamiento no, eso explica la dispersión de los datos. En la gráfica los datos están agrupados como función de la temperatura de alimentación 50, 60, 70 y 80°C de abajo hacia arriba. Se puede observar que en algunos de los casos la diferencia de temperatura, entre una prueba y otra, es muy cercana a los 9°C. Sin embargo, no se observó un incremento en la producción de permeado. Esto es muy similar a lo reportado previamente por Alkhdhiri []. Para el caso de la membrana de PVDF los resultados son similares. La dispersión de los datos es menor porque las condiciones atmosféricas fueron similares durante la realización de estas pruebas (Fig. 5b).

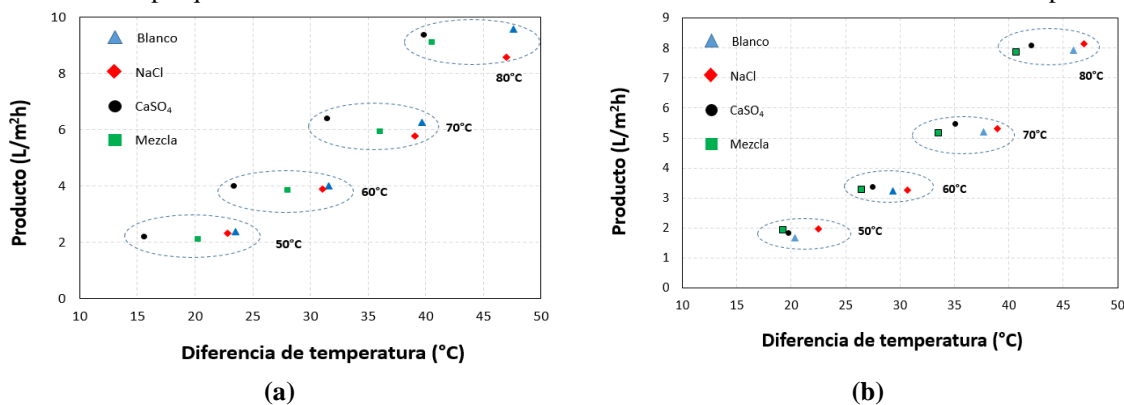


Fig. 5. Efecto de la producción de permeado como función de las diferencias de temperaturas entre ambos canales de alimentación para una membrana de PTFE.

### 3.3 Determinación del consumo energético

Se evaluaron varios flujos de calor en el sistema, tomando como base las mediciones de las temperaturas y los caudales de alimentación. En primer lugar, se determinó el consumo de energía por el proceso, basado en la disminución de la temperatura del flujo de alimentación.

$$Q_{in} = m_H cp(T_{H,in} - T_{H,out}) \quad (1)$$

Estrictamente hablando, el flujo de masa en el canal caliente ( $m_H$ ) no es una constante. Una fracción se convierte en vapor de agua que pasa a través de la membrana y que posteriormente se convierte en permeado. Sin embargo, la producción



de permeado es muy pequeña en comparación con el caudal de alimentación ( $m_{dis} \ll m_H$ ). Por lo tanto, el flujo de masa  $m_H$  en la ecuación 1 se puede considerar constante. La recuperación de calor, basada en el aumento de la temperatura en el lado de enfriamiento puede expresarse de manera similar como:

$$Q_C = m_C c_p (T_{C,in} - T_{C,out}) \quad (2)$$

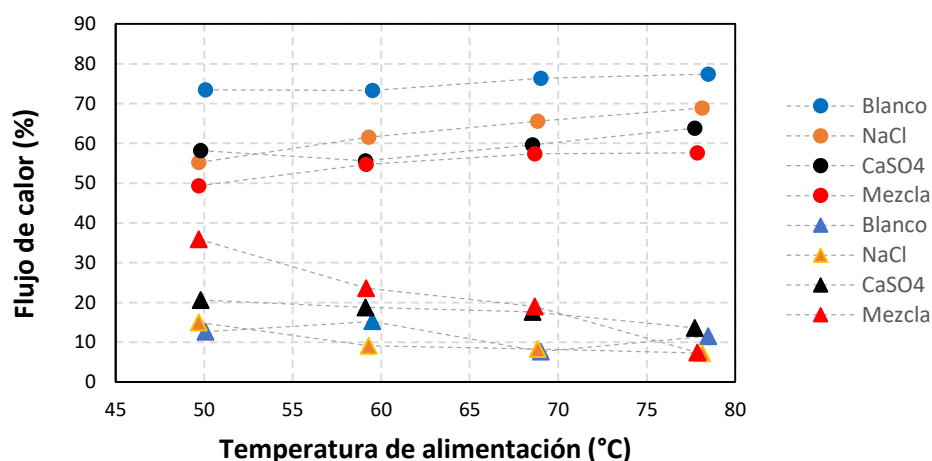
La diferencia entre  $Q_H - Q_C$  es la cantidad de calor que se pierde a través de las paredes laterales o como calor sensible. El flujo de calor neto que se transfiere del canal de alimentación al canal de enfriamiento se lleva a cabo por dos mecanismos como se ha explicado anteriormente: calor latente del vapor de condensación y calor sensible transferido por conducción a través del espacio de aire. El calor latente se evalúa con base al volumen de permeado y la temperatura a la cual ocurre el proceso, se expresa como:

$$Q_{des} = m_{des} * h_{fg}(T_H) \quad (3)$$

Donde  $h_{fg}$  es la entalpía de vaporización del agua. La transferencia de calor sensible entre el lado frío y el lado caliente, a través del espaciado de aire, se puede obtener como la diferencia entre el calor recuperado en el lado frío y el calor latente. Desde el punto de vista de nuestro proceso se trata de una transferencia calor parásito porque no contribuye en la producción de permeado.

La Fig. 6a muestra el porcentaje de contribuciones del flujo de calor asociado con la producción de permeado (calor latente) y con la transferencia de calor parásita (calor sensible), para la membrana de PTFE. En la gráfica se observa que el consumo de calor suministrado para producir permeado oscila entre el 77.39 % y el 49.35 %, mientras que en un intervalo de entre el 35.8% y el 7.4% se transfiere como calor sensible. Por otra parte, las pérdidas representan en promedio alrededor de 21.8%.

Para el caso de la membrana de PVDF representada en la Fig. 6b, se observó que la contribución del calor sensible disminuye ligeramente con la temperatura de suministro. Sin embargo, la contribución por calor latente aumenta cuando la temperatura de alimentación es mayor. Por ejemplo, cuando la temperatura de alimentación es de 50°C, en promedio el 55.15% de la energía recuperada en el lado de refrigeración se transfiere como calor latente, mientras que el calor sensible representa en promedio el 18.24 %. Sin embargo, cuando la temperatura de alimentación es de 80°C, la contribución por calor latente representa en promedio el 69.89% mientras que el calor sensible disminuye a un valor de 12.51%. Por lo tanto, el sistema no sólo produce más permeados a temperaturas más altas, sino que también disminuye la transferencia de calor parasita.



(b)

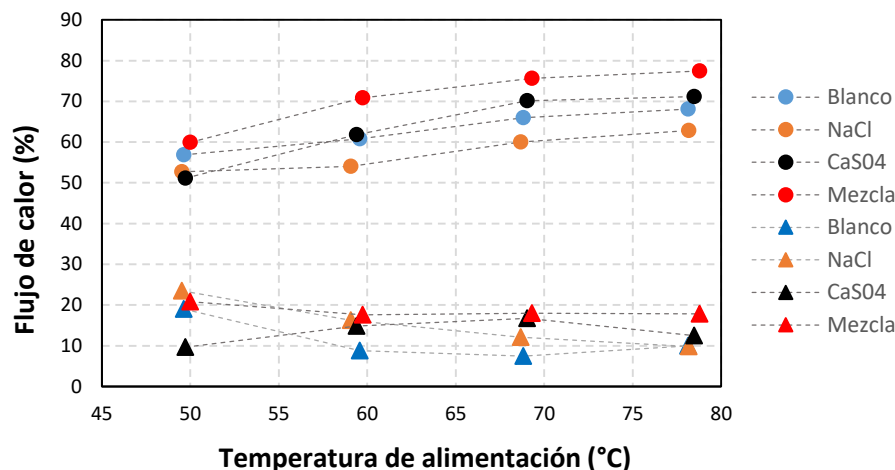


Fig. 6. Flujo de calor latente y sensible asociados con la producción de permeado para una membrana de (a) PTFE y (b) PVDF.

Por otra parte, existen cuatro indicadores que son utilizados evaluar el desempeño un sistema térmico. Estos indicadores son el GOR, EC, el PR y el RR. Los dos primeros indicadores proporcionan información sobre el rendimiento térmico del proceso. Mientras que los segundos, proporcionan información sobre la efectividad del proceso. En la gráfica de la Fig. 7 se muestran los valores del GOR para la unidad evaluada. En términos generales, el GOR nos indica que el sistema utiliza cerca del 0.7 por cada unidad de energía suministrada, las diferencias restantes representan las pérdidas e irreversibilidades del proceso. Los sistemas con recuperación de calor pueden obtener valores del GOR promedio cercanos a 6.5 [].

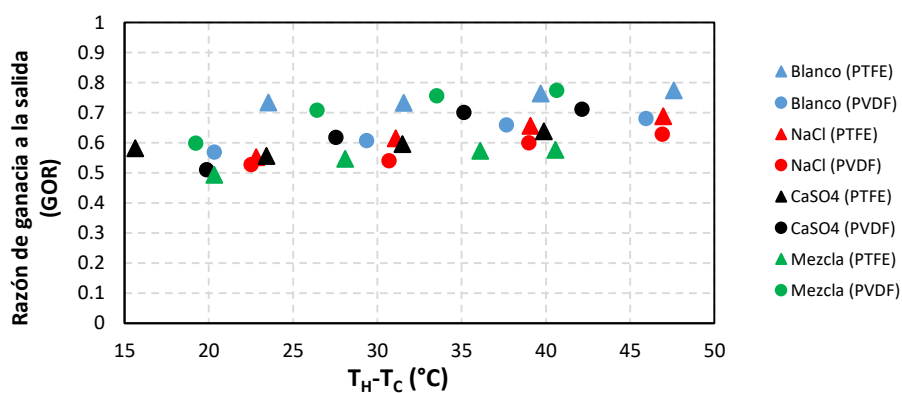
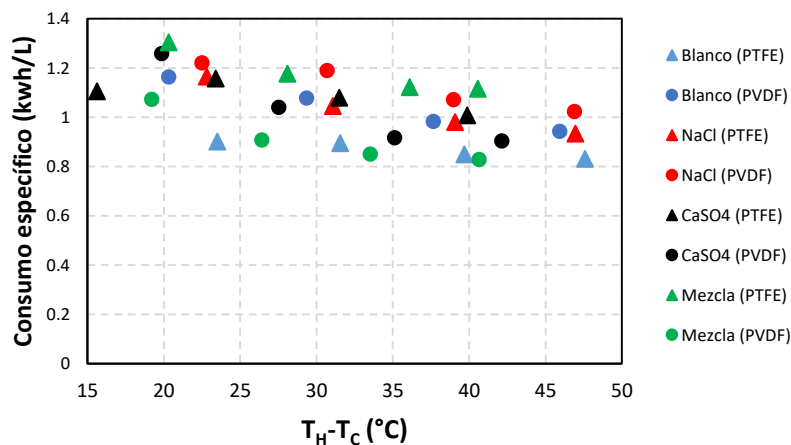


Fig. 7. Razón de ganancia a la salida (GOR) como función de las diferencias de temperaturas entre ambos canales de alimentación para ambas membranas.

Por otra parte, el EC es un indicador que a menudo es utilizado en sistemas eléctricos y nos indica la potencia necesaria para producir un volumen de producto. La gráfica de la Fig. 8 muestra el consumo energético del sistema evaluado. Hay que tener en cuenta que el consumo del sistema es térmico y no eléctrico, por esta razón no es posible realizar una comparación directa con sistemas de RO o NF. El consumo del sistema da la impresión de ser muy elevado, sin embargo, recordemos que el principio de separación de la AGMD es mediante cambio de fase. Como se muestra con el GOR, en promedio el 70% de la energía que se consume es empleada para realizar el cambio de fase. Para reducir el consumo, se

deben utilizar sistemas que operen con recuperación de calor. Es decir, que el calor de cambio de fase pueda reintroducirse al sistema y con ello aumentar el rendimiento.



**Fig. 8.** Consumo específico (EC) como función de las diferencias de temperaturas entre ambos canales de alimentación para ambas membranas.

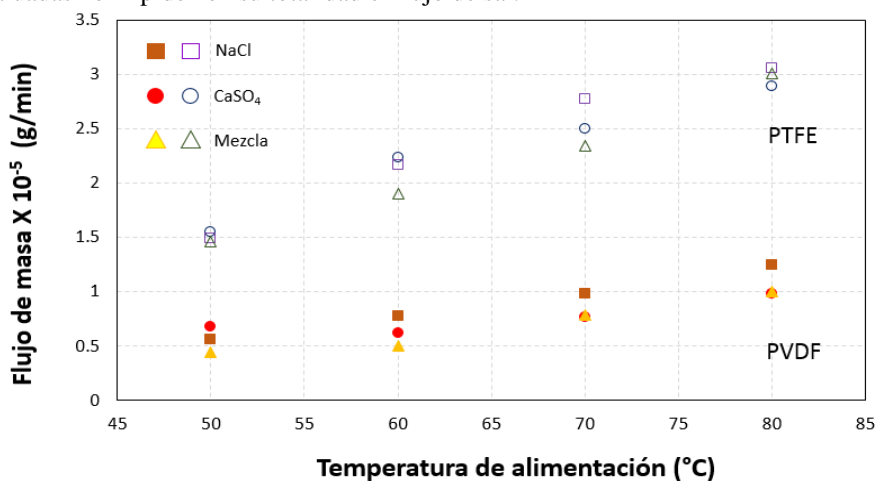
En la Tabla 4 se presentan los resultados de evaluar los indicadores RR y PR. Se observa que la tasa de recuperación de permeado es muy pequeña inferior al 1% en ambos casos. El área efectiva de la membrana es pequeña 144 cm<sup>2</sup> un área mayor implica mayor producción de permeado. En la misma tabla se observa valores de PR muy bajos, un valor de PR alto indica que se obtiene una producción mayor de permeado por unidad de energía térmica suministrada.

**Tabla 4.** Resultados de evaluar los indicadores RR y PR

	$\Delta T$ (°C)	PTFE		PVDF			
		$\Delta T$ (°C)	RR (%)	PR (L/m <sup>2</sup> h)	RR (%)	PR (L/m <sup>2</sup> h)	
<b>Blanco</b>	50	23.5	0.1	0.077	20.3	0.1	0.060
	60	31.6	0.2	0.078	29.3	0.2	0.064
	70	39.7	0.4	0.082	37.7	0.3	0.071
	80	47.6	0.5	0.084	45.9	0.5	0.074
<b>NaCl</b>	50	22.8	0.1	0.060	22.5	0.1	0.057
	60	31.1	0.2	0.066	30.7	0.2	0.058
	70	39.1	0.3	0.071	39.0	0.3	0.065
	80	47.0	0.5	0.074	46.9	0.5	0.068
<b>CaSO<sub>4</sub></b>	50	15.6	0.1	0.063	19.9	0.1	0.055
	60	23.4	0.2	0.060	27.5	0.2	0.067
	70	31.5	0.4	0.064	35.1	0.3	0.076
	80	39.9	0.6	0.069	42.1	0.5	0.077
<b>Mezcla</b>	50	20.3	0.1	0.053	19.2	0.1	0.065
	60	28.1	0.2	0.059	26.4	0.2	0.076
	70	36.1	0.3	0.062	33.5	0.3	0.082
	80	40.6	0.5	0.062	40.6	0.4	0.084

### 3.4 Evaluación de flujo de sal

Las condiciones iniciales del blanco (agua desionizada) fueron: 27°C, 0.060  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 0.030 mg/L y 6.5 unidades de pH, respectivamente. Los resultados muestran que los permeados obtenidos a 50°C y 60°C tienen una calidad de agua similar al agua desionizada utilizada como blanco. Los permeados obtenidos a 70°C y 80°C superan ligeramente la calidad del agua desionizada, la cual es utilizada en el laboratorio para lavado de material y preparación de soluciones. Es claro que las membranas evaluadas no impiden en su totalidad el flujo de sal.



**Fig. 9.** Flujo de masa de sal a través de la membrana de PTFE y PVDF.

De hecho, una fracción muy pequeña de las sales disueltas en el canal de alimentación logra atravesar la membrana y alojarse en el permeado. La disminución aparente de la salinidad al aumentar la temperatura creemos que está asociada a la relación que existe entre la transferencia de vapor y la tasa de transferencia de sal a través de la membrana. A medida que aumenta la temperatura de alimentación, la cantidad de vapor de agua es mayor comparado con la tasa de transferencia de sal, dando como resultado una salinidad más baja. Cuando se grafican los resultados de SDT en términos de la razón de masa (g/min), se observa que el flujo de sal también aumenta con la temperatura, como sucede con el flujo de permeado. Sin embargo, este incremento es menor en relación al incremento en la producción de permeado. La Fig. 9 anterior muestra el incremento del flujo de sal como función de la temperatura de alimentación.

Derivado de las observaciones en la producción de permeado y la gráfica de la Fig. 10 se puede observar las membranas de PVDF producen menor cantidad de permeado pero mayor calidad del producto respecto al producto obtenido con la membrana de PTFE. Las Tablas 5 a 7 presentan los valores de las mediciones realizadas obtenidos a diferentes temperaturas de alimentación.

**Tabla 5.** Calidad del agua de permeados obtenidos a diferentes temperaturas de alimentación, empleando como agua de alimentación 5 g/L de NaCl

Permeado	*T (°C)		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )		SDT (mg/L)		pH	
	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF
50°C	27.5	27.4	0.055	0.019	0.028	0.014	6.5	6.5
60°C	27.5	27.4	0.056	0.015	0.024	0.008	6.5	6.5
70°C	27.4	27.3	0.036	0.011	0.018	0.006	6.5	6.5
80°C	27.4	27.3	0.027	0.010	0.011	0.005	6.5	6.5

\*Temperatura interna de la muestra a la hora de la toma de lectura.

**Tabla 6.** Calidad del agua de permeados obtenidos a diferentes temperaturas de alimentación, empleando como agua de alimentación 2 g/L de CaSO<sub>4</sub>.

Permeado	*T (°C)	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	SDT (mg/L)	pH
----------	---------	--------------------------------	------------	----



	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF
50°C	27.4	27.3	0.031	0.023	0.016	0.011	6.5	6.5
60°C	27.5	27.4	0.024	0.021	0.014	0.010	6.5	6.5
70°C	27.3	27.0	0.026	0.020	0.012	0.009	6.5	6.5
80°C	27.3	27.1	0.025	0.017	0.011	0.008	6.5	6.5

\*Temperatura interna de la muestra a la hora de la toma de lectura.

**Tabla 7.** Calidad del agua de permeados obtenidos a diferentes temperaturas de alimentación empleando como agua de alimentación 2 g/L de NaCl + 1 g/L de CaSO<sub>4</sub>.

Permeado	*T (°C)		CE (µS/cm)		SDT (mg/L)		pH	
	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF
50°C	27.2	27.4	0.024	0.016	0.012	0.008	6.5	6.5
60°C	27.5	27.1	0.017	0.014	0.010	0.007	6.5	6.5
70°C	27.4	27.1	0.016	0.012	0.009	0.006	6.5	6.5
80°C	27.0	27.3	0.015	0.010	0.008	0.005	6.5	6.5

\*Temperatura interna de la muestra a la hora de la toma de lectura.

### 3.5 Evaluación de la calidad del agua

Las pruebas experimentales para la determinación de la calidad del agua fueron de 8 horas continuas a una temperatura de operación de 80°C. Esto con la finalidad de obtener aproximadamente 1000 mL de muestra de permeado en cada prueba y poder realizar los respectivos parámetros fisicoquímicos. Se tomaron muestras del influente (agua de alimentación) y del efluente (permeado). Las muestras se tomaron al inicio (0 horas), a la mitad (4 horas) y al final de la prueba (8 horas). Durante las pruebas experimentales se controló la temperatura y el flujo de alimentación de la zona de calentamiento y de enfriamiento. Los promedios de la temperatura de alimentación y de enfriamiento fueron de  $80.2 \pm 0.2^\circ\text{C}$  y  $25.5 \pm 2.0^\circ\text{C}$ , mientras que los promedios de los flujos de alimentación de la zona de calentamiento y de enfriamiento fueron de  $0.42 \pm 0.20$  y  $0.43 \pm 0.20$  L/min, respectivamente.

Se realizó una comparación de la calidad del agua de alimentación y del agua de permeado con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Esta norma establece los límites máximos permisibles (LMP) de calidad de agua para uso y consumo humano, así como los tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Cabe mencionar que sólo se tomaron algunos parámetros químicos inorgánicos de referencia relacionados a la calidad del agua con alto contenido de sales, ya que para cumplir totalmente con esta norma también se debe de cumplir con las características bacteriológicas, radiactivas, físicas y organolépticas, así como los constituyentes químicos orgánicos establecidos en dicha norma. En las Tablas 8 a 10 se muestran los resultados de la calidad de agua de alimentación y del permeado empleado membranas de PTFE y PVDF, utilizando como agua de alimentación soluciones salinas sintéticas de NaCl y CaSO<sub>4</sub>, así como una mezcla de ambas sales.

**Tabla 8.** Calidad del agua de alimentación y del permeado empleado membranas de PTFE y PVDF de 0.45 µm, utilizando como agua de alimentación 5 g/L de NaCl.

Parámetro	Agua de alimentación						Permeado				NOM-127 LMP
	0 horas		4 horas		8 horas		4 horas		8 horas		
	PTF E	PVD F	PTF E	PVD F	PTF E	PVD F	PTF E	PVD F	PTF E	PVD F	
*CE (µS/cm)	8 978	9 864	10 240	10 570	10 406	10 628	32	50	28	44	-----
SDT (mg/L)	4 489	4 932	5 120	5 285	5 203	5 314	16	25	14	22	<b>1 000</b>
Na <sup>+</sup> (mg/L)	1 378	2 372	1 530	2 208	1 538	2 179	0.02	0.05	0.0	0.0	<b>200</b>
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	416	262	1 269	255	1 306	234	0.1	0.1	0.0	0.0	<b>250</b>

*Alcalinidad (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	4.13	4.13	3.72	3.72	3.93	3.93	3.82	3.82	3.93	4.11	-----
Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	8.62	8.62	13.1	13.1	14.9	14.9	4.31	5.11	5.11	4.31	<b>500</b>
pH	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	6.5	6.5	6.5	6.5	<b>6.5-8.5</b>
*Tempe. (°C)	23.2	23.2	23.4	23.4	23.3	23.3	23.1	23.1	23.2	23.2	-----
*COT (mg/L)	0.74	1.71	1.86	1.96	2.41	2.26	1.62	2.76	1.65	2.61	-----

\*Parámetros que no se encuentran registrados en la norma, por lo tanto, no cuentan con un valor de referencia.

**Tabla 9.** Calidad del agua de alimentación y del permeado empleado membranas de PTFE y PVDF de 0.45 µm, utilizando como agua de alimentación 2 g/L de CaSO<sub>4</sub>.

Parámetro	Agua de alimentación						Permeado				NOM-127 LMP*
	0 horas		4 horas		8 horas		4 horas		8 horas		
	PTF E	PVD F	PTF E	PVD F	PTF E	PVD F	PTF E	PVD F	PTF E	PVD F	
*CE (µS/cm)	3 624	3 484	3 706	3 842	3 730	3 948	40	32.8	36	28	-----
SDT (mg/L)	1 812	1 742	1 853	1 921	1 865	1 974	20	16.4	18	14	<b>1 000</b>
*Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	471	476	468	495	504	515	0.14	0.23	0.07	0.23	-----
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	1 269	996	1 239	1 090	1 786	1 168	4.87	1.65	4.04	0.04	<b>400</b>
*Alcalinidad (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	7.30	3.77	8.58	10.1	7.23	9.85	10.1	5.99	9.26	4.86	-----
Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	1 145	1 935	1 174	1 202	1 200	1 282	1.57	2.55	2.16	2.16	<b>500</b>
pH	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	6.5	6.5	6.5	6.5	<b>6.5-8.5</b>
*Tempe. (°C)	23.2	23.2	23.4	23.4	23.3	23.3	23.1	23.1	23.2	23.2	-----
*COT (mg/L)	0.94	1.85	1.21	1.58	2.37	2.69	2.12	2.22	1.35	2.27	-----

\*Parámetros que no se encuentran registrados en la norma, por lo tanto, no cuentan con un valor de referencia.

**Tabla 10.** Calidad del agua de alimentación y del permeado empleado membranas de PTFE y PVDF de 0.45 µm, utilizando como agua de alimentación 2 g/L de NaCl + 1 g/L de CaSO<sub>4</sub>.

Parámetro	Agua de alimentación						Permeado				NOM-127 LMP*
	0 horas		4 horas		8 horas		4 horas		8 horas		
	PTF E	PVD F	PTF E	PVD F	PTF E	PVD F	PTF E	PVD F	PTF E	PVD F	
*CE (µS/cm)	5 852	5 792	6 090	6 276	6 358	6 270	64	10.4	64	8.0	-----
SDT (mg/L)	2 926	2 896	3 045	3 138	3 179	3 135	32	5.2	32	4.0	<b>1 000</b>

Na <sup>+</sup> (mg/L)	629	655	645	661	666	690	0.2	0.9	0.1	0.4	<b>200</b>
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	373	369	438	1 354	535	1 025	0.54	0.0	0.0	0.0	<b>250</b>
*Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	215	233	231	242	215	240	2.64	0.11	2.16	0.11	-----
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	595	602	625	623	626	603	0.45	0.42	0.0	0.16	<b>400</b>
*Alcalinida d (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	5.31	5.99	4.86	6.20	7.85	8.89	2.17	2.82	3.72	3.75	-----
Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	609	369	624	1 354	645	1 025	2.74	0.0	3.59	0.0	<b>500</b>
pH	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	6.5	6.5	6.5	6.5	<b>6.5-8.5</b>
*Tempe. (°C)	23.2	23.2	23.4	23.4	23.3	23.3	23.1	23.1	23.2	23.2	-----
*COT (mg/L)	0.90	0.85	2.82	1.99	2.43	2.30	2.02	2.76	2.41	2.30	-----

\*Parámetros que no se encuentran registrados en la norma, por lo tanto, no cuentan con un valor de referencia.

Como es de esperarse, los resultados muestran que la calidad del agua de las tres soluciones salinas sintéticas utilizadas como agua de alimentación sobrepasan los LMP establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Por el contrario, el agua de permeado de estos tres influentes cumple parcialmente con los LMP establecidos en esta norma. Sin embargo, para compensar el bajo aporte de aniones y cationes o la ausencia de ellos, esta agua puede ser remineralizada agregándole sales o mezclándola con el agua de rechazo del propio sistema desalinizador.

### Salinidad

Los resultados muestran un incremento de la salinidad expresada como SDT en las tres soluciones salinas sintéticas utilizadas como agua de alimentación a partir de las 4 horas continuas de prueba, continuando con este comportamiento hasta el final de las pruebas experimentales (8 horas). Este incremento de la salinidad se debe a la transferencia de vapor de agua dentro de la unidad AGMD y a las pérdidas de masa al ambiente en forma de vapor. Sin embargo, este incremento no afecta de manera significativa la producción de permeado. De acuerdo con Alkudhiri [] la disminución en la producción de permeado, por efecto del incremento de la salinidad en concentraciones inferiores a 40 g/L de SDT, es muy pequeña. Estos autores estimaron que la reducción de permeado sea del orden de 0.03 kg/m<sup>2</sup>h en un rango de 0 a 40 g/L de SDT. Bajo este contexto, se decidió recircular el agua de rechazo para seguir alimentando la unidad AGMD, tal y como se muestra en la Fig. 4. Por su salinidad, las soluciones salinas utilizadas como agua de alimentación se encuentran dentro de la categoría de agua salobre y marina (APHA, 1995a), reportados a través del valor de la CE (µS/cm) y por medio de la concentración de SDT (mg/L). La calidad del agua de estos influentes sobrepasa el valor de SDT (1 000 mg/L) establecido en la NOM-127-SSA1-1994.

Los resultados muestran una mejora en la calidad del agua de los permeados, obteniendo una disminución de la salinidad del 99.6% y 99.8 % a las 4 y 8 horas continuas de prueba, respectivamente. El valor de la CE no se encuentra reportado en la NOM-127-SSA1-1994. Sin embargo, el agua de permeado cumple con los LMP establecidos para la concentración de SDT, obteniendo valores por debajo de lo establecido en dicha norma (1 000 mg/L de SDT). Por su baja salinidad, La calidad del agua de los permeados se clasifica en la categoría de agua potable (APHA, 1995-a). En la Tabla 11 se muestra la clasificación del agua de alimentación y del agua de permeado por su salinidad con base a lo propuesto por APHA (1995a).

**Tabla 11. Clasificación del agua de alimentación y de permeado por su salinidad (APHA, 1995a)**

Clasificación	Agua de alimentación	Permeados
---------------	----------------------	-----------

	NaCl	CaSO <sub>4</sub>	NaCl + CaSO <sub>4</sub>	NaCl	CaSO <sub>4</sub>	NaCl + CaSO <sub>4</sub>
CE (µS/cm)	AM	AS	AM	AP	AP	AP
SDT (mg/L)	AS	AS	AS	AP	AP	AP

AM= Agua Marina (5 000-45 000 µS/cm; 10 000-100 000 mg/L)

AS= Agua Salobre (2 000-5 000 µS/cm; 1 000-10 000 mg/L)

AP= Agua Potable (100-2 000 µS/cm; 0-1 000 mg/L)

#### Aniones y Cationes

Las soluciones salinas sintéticas utilizadas como agua de alimentación están compuestas por sales de NaCl y CaSO<sub>4</sub>. Por lo anterior, se determinaron las concentraciones de los iones de sodio (Na<sup>+</sup>), calcio (Ca<sup>2+</sup>), cloruros (Cl<sup>-</sup>) y sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Al igual que la salinidad, la concentración de aniones y cationes tiende a incrementar en el agua de alimentación a partir de las 4 horas continuas de prueba continuando con este comportamiento hasta el final de las pruebas experimentales (8 horas). El incremento de la concentración de estos iones en el termotanque de alimentación que abastece a la unidad DMEA, se debe principalmente a su rechazo por parte de las membranas hidrófobas de PTFE y PVDF de 0.45 µm y a las pérdidas de agua en forma de vapor por difusión dentro de la unidad DMEA. Esta concentración se ve reflejada en los resultados obtenidos, rebasando los LMP para uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994). Los resultados muestran una mejora en la calidad del agua de los permeados, obteniendo una disminución de la concentración de aniones y cationes del 99.7% y del 100% a las 4 horas y 8 horas continuas de prueba, respectivamente, cumpliendo con los LMP establecidos en la NOM-127-SSA1-1994.

#### Alcalinidad y Dureza Total

Las tres soluciones salinas sintéticas utilizadas como agua de alimentación presentan una alcalinidad baja. Esto debido a la ausencia de sales de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos en su composición, los cuales contribuyen a una baja alcalinidad (Kemmer, 1989). Estas tres soluciones salinas presentan una dureza alta, debido al aporte del catión calcio (Ca<sup>2+</sup>) proveniente de la sal de CaSO<sub>4</sub>, colocándolas en la clasificación de aguas muy duras a excepción de la solución de NaCl, la cual no contiene sales de calcio ni magnesio, clasificándola en una solución blanda (Kiely, 1999). En la Tabla 12 se muestra la clasificación del agua de alimentación y del agua de permeado por su alcalinidad y dureza total con base a lo propuesto por Kemmer (1989) y Kiely (1999).

**Tabla 12.** Clasificación del agua de alimentación y de permeado por su dureza y alcalinidad total.

Clasificación	Agua de alimentación			Permeados		
	NaCl	CaSO <sub>4</sub>	NaCl + CaSO <sub>4</sub>	NaCl	CaSO <sub>4</sub>	NaCl + CaSO <sub>4</sub>
AT (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
DT (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Blanda	Muy dura	Muy dura	Blanda	Blanda	Blanda

DT= Dureza Total (Blanda 0-75; moderadamente dura 75-150; Dura 150-300; Muy dura >300 mg/L CaCO<sub>3</sub>)

AT= Alcalinidad Total (Baja <75; Media 75-150; Alta >150 mg/L CaCO<sub>3</sub>)

#### pH y Temperatura

La temperatura no tuvo una variación significativa. El valor de pH disminuyó de 7.5 en el agua de alimentación a 6.5 en el agua de permeado. Esta disminución de una unidad logarítmica de pH se da por el rechazo de iones por parte de las membranas utilizadas provocando la ausencia de aniones y cationes en el agua de permeado.

#### Carbono Orgánico Total

El COT es una medida indirecta para medir la presencia o ausencia de materia orgánica presente en el agua. Se obtiene a partir de la diferencia del carbono total (CT) menos el carbono inorgánico (CI). El rango de COT que se puede encontrar

en el agua potable es de 0.1 a 25 mg/L, para agua tratada de 0.1 a 20 mg/L y para agua dulce de 0.1 a 2 mg/L (APHA, 1995-b). Los resultados de las Tablas 5.7, 5.8 y 5.9 muestran un incremento del COT en el agua de alimentación como en el agua de permeado. El incremento en el agua de alimentación puede venir de las tuberías de polietileno y de CPVC (polifloruro de vinil clorado), los cuales son polímeros sintéticos que en su estructura química contienen carbono. En el agua de permeado, este incremento puede deberse al soporte de la membrana, el cual es una malla de acero galvanizado con un revestimiento de pintura acrílica, la cual es afectada por la temperatura. Por lo anterior, se decidió realizar un estudio detallado con la finalidad de saber el origen del COT, sometiendo cada componente por separado a las mismas condiciones (80°C por 8 horas continuas con la mezcla de sales de NaCl y CaSO<sub>4</sub>). Se descarta la posibilidad del que el COT provenga de las membranas, así como de las juntas de neopreno que se encuentran en el interior de la unidad DMEA, esto lo comprueba los resultados mostrados en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Resultados del COT obtenidos a partir de un tratamiento térmico a 80°C por 8 horas continuas.

Muestra	COT (mg/L)
Solución salina sintética (Blanco)	< 0.58*
Junta de Neopreno	< 0.58
Membrana PTFE	< 0.58
Membrana PVDF	< 0.58

\* Límite de detección o cuantificación del equipo.

Como se mencionó en el párrafo anterior, el COT es un indicador comúnmente utilizado para medir la contaminación orgánica en el agua ultrapura. Por lo general, los niveles de impurezas son inferiores a los límites de detección: <0,05 µg/L en compuestos orgánicos volátiles y <0,025 µg/L en el caso de los semivolátiles. Estos niveles concuerdan con valores de COT inferiores a 1 µg/L (ppb). En la NOM-127-SSA1-1994 no se encuentra reportado un LMP para el COT, por lo que se decidió comparar los resultados de COT obtenidos en el agua de permeado con las especificaciones estándar para agua de uso reactivo propuesta por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) con número de designación D 1193-99. En la Tabla 14 se especifican cuatro tipos de grados con base en la calidad del agua de uso en el laboratorio o en aplicaciones donde se requiere agua con un contenido mínimo de impurezas. La mayoría del agua de permeado obtenida en nuestro sistema DMEA están por arriba del valor máximo establecido para agua grado reactivo Tipo III (0.2 mg/L de COT).

**Tabla 14.** Especificaciones para agua grado reactivo (ASTM, 1999).

Parámetro	Agua grado reactivo			
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Conductividad eléctrica valor máximo a 25°C en µS/cm	0.056	1.0	0.25	5.0
Resistividad eléctrica valor mínimo a 25°C en MΩ.cm	18	1.0	4.0	0.2
pH a 25°C	A	A	A	5.0 a 8.0
Carbono Orgánico Total (COT) valor máximo en µg/L	50	50	200	No limite
Sodio valor máximo en µg/L	1	5	10	50
Cloruros valor máximo en µg/L	1	5	10	50
Sílice valor máximo en µg/L	3	3	500	No limite



<sup>A</sup> La medición del pH en aguas grado reactivo de Tipo I, II y III ha sido eliminada de esta especificación porque estos grados de agua no contienen constituyentes en cantidad suficiente para alterar significativamente el pH.

A partir de los resultados obtenidos del COT (Tablas 8, 9, 10 y 13), se procedió a realizar un análisis de la degradación a nivel molecular de las membranas de PTFE y PVDF de 0.45  $\mu\text{m}$  por medio de espectroscopia infrarroja (IR). Las muestras de las membranas sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico (8 horas continuas de prueba a 80°C) se analizaron a través del espectrofotómetro infrarrojo por transformadas de Fourier (IFTR). Los resultados muestran un cambio (degradación parcial) en la estructura molecular de ambas membranas después de someterlas al tratamiento térmico. Sin embargo, esto no significa que las membranas se estén degradando completamente, ya que para llegar a ello se necesitan temperaturas superiores a los 200°C, temperaturas en las cuales no se alcanza en los sistemas DMEA. En las Figs. 11 y 12 se muestran los espectros IFTR de ambas membranas. En ellos se aprecia los grupos funcionales detectados, así como sus respectivas estructuras moleculares de las muestras comparadas con la base de datos del equipo, siendo el de mayor puntaje (celda número 1) el que más se asemeja a la muestra analizada.

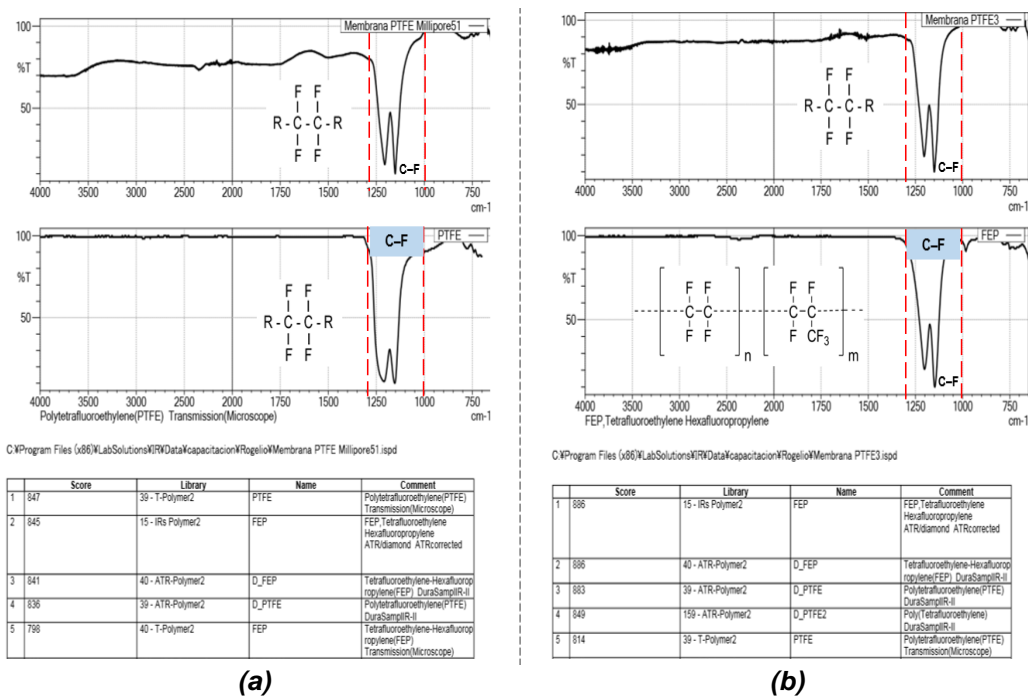


Figura 10. Espectros IFTR de la membrana PTFE (a) sin tratamiento térmico y (b) con tratamiento térmico.

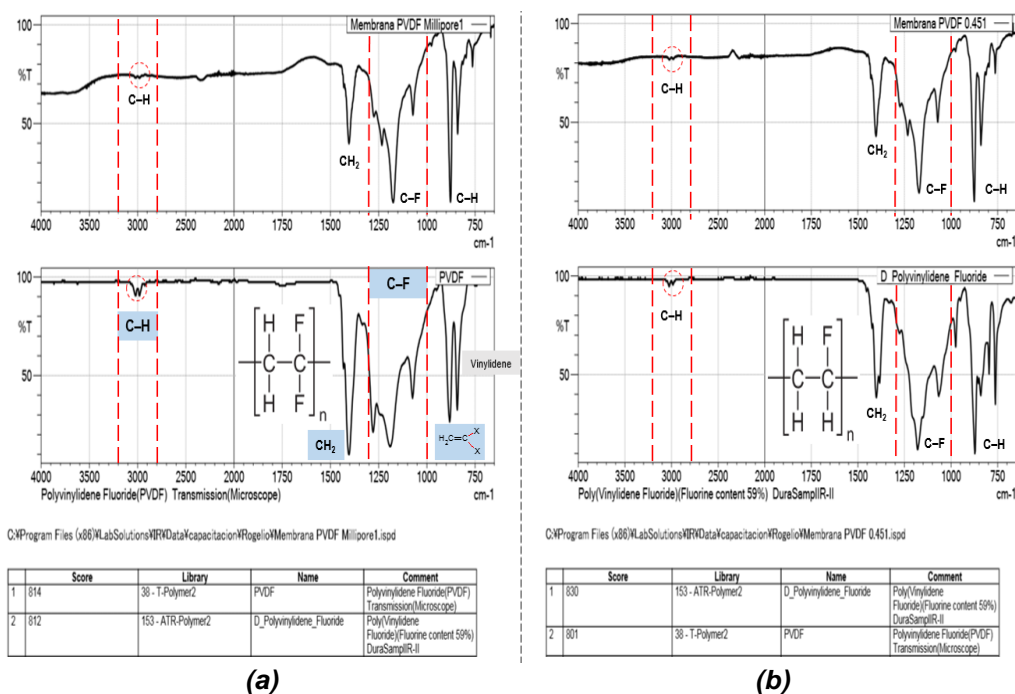


Fig. 11. Espectros IFTR de la membrana PVDF (a) sin tratamiento térmico y (b) con tratamiento térmico.

#### 4. Conclusiones

Se construyó una estación de prueba para evaluar dos tipos de membranas porosas e hidrófobas en una unidad AGMD existente. El prototipo experimental, se utilizó para realizar catorce pruebas experimentales. Con base en las pruebas realizadas se concluye lo siguiente:

-La producción de permeado se ve afectado principalmente por la temperatura de alimentación. Se observó una producción máxima de permeado de 9.23 L/m<sup>2</sup>h a 80°C con las membranas de PTFE y de 7.93 L/m<sup>2</sup>h para las membranas de PVDF para la misma temperatura de operación. Los resultados muestran que la producción de permeado presenta una tendencia de tipo exponencial como función de la diferencia de temperatura promedio entre el canal de alimentación y enfriamiento. El ajuste exponencial realizado presenta un R<sup>2</sup> en ambos casos de 0.99.

-El calor que se transfiere como calor latente de vaporización a través de la unidad empleando membranas de PTFE osciló en un intervalo de 77.39 % como máximo a un valor mínimo de 49.35 % dependiendo de las condiciones de operación. Las contribuciones por calor sensible a través del sistema, osciló en un intervalo de entre el 35.8% y el 7.4%, mientras que las pérdidas globales hacia el medio ambiente fueron evaluadas en un promedio de 21.8%. Por otra parte, al utilizar membranas de PVDF el calor latente de vaporización osciló en un intervalo de 77.46 % como máximo a un valor mínimo de 51.09 % dependiendo de las condiciones de operación. El calor sensible transferido fue de 23.49% y 9.81%. Las pérdidas globales hacia el medio ambiente fueron evaluadas en un promedio de 29.69%. Se observó una mayor pérdida de calor al medio ambiente al emplear membranas de PVDF.

-Las membranas de PTFE y PVDF de 0.45 µm demostraron ser útiles para el proceso de separación de la DMEA, en ambos casos la calidad de agua de permeado se mantuvo por debajo de los límites máximos permisibles (LMP) de calidad de agua para uso y consumo humano establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 (modificada en el 2000) para los parámetros: Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, DT, SDT y pH lo que posibilita, con un tratamiento posterior, la potabilización del producto. Sin embargo, el permeado no cumple con las especificaciones de grado reactivo propuesta por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) por las concentraciones de contaminación orgánica que fue medida a través de COT.

-Las membranas no presentaron desgaste térmico significativo a una temperatura de 80°C durante las pruebas de operación. Sin embargo, pruebas con mayor tiempo de exposición deber ser llevada a cabo con el fin de evaluar el posible desgaste con mayor tiempo de operación.

-Se observó que las membranas hidrófobas no retienen en su totalidad los iones. Para las membranas de PTFE y NaCl se observó un flujo máximo de sal de  $2.88 \times 10^{-5}$  g/min a una temperatura de 80 °C y un flujo menor de  $1.55 \times 10^{-5}$  g/min para una temperatura de 50 °C. Para el caso de la membrana de PVDF se observó un flujo máximo  $0.97 \times 10^{-5}$  g/min de NaCl a una temperatura de 80 °C y un flujo menor de  $0.68 \times 10^{-5}$  g/min de NaCl a una temperatura de operación de 50 °C. Con base en lo anterior se concluye que las membranas de PVDF retienen mayor cantidad de iones.

-Las pruebas de IFTR mostraron los mismos grupos funcionales del material que están fabricadas las membranas al comparar los espectros de absorción de una muestra sin tratamiento térmico contra una muestra con tratamiento térmico. Por lo tanto, se concluye que no se observa degradación térmica en el tiempo de exposición.

-Se observó un GOR promedio muy similar en ambos casos: de 0.63 para la membrana de PTFE y de 0.64 para membranas de PVDF. En sistemas de una sola etapa sin recuperación de calor el GOR máximo posible es 1.0.

-El consumo de energía térmica promedio para las membranas de PTFE fue de 1.04 kWh/L mientras que para las membranas de PVDF el consumo promedio fue de 1.03 kWh/L. No se observa una diferencia significativa al comparar ambas membranas.

-La razón de recuperación en ambos es inferior al 1%. Para las membranas de PTFE se observó un valor de RR de 0.31% y para las membranas de PVDF 0.27 %. El cociente de desempeño en ambos casos fue el mismo con un valor de 0.7 L/Wm<sup>2</sup>h.

## Referencias

- [1] 2030 water resource group, "Charting our water future," 2009. Retrieved from [http://www.2030waterresourcesgroup.com/water\\_full/](http://www.2030waterresourcesgroup.com/water_full/).
  - [2] N. Ghaffour, T.M. Missimer, G.L. Amy, Technical review and evaluation of the economics of water desalination: current and future challenges for better water supply sustainability, *Desalination* 309 (2013) 197-207.
  - [3] M. Elimelech, W. Philip, The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment, *Science* 333 (2011) 712.
  - [7] M.S El-Bourawi, Z. Ding, R. Ma, M. Khayet, A framework for better understanding membrane distillation separation process, *J. Membr. Sci.* 2006; 285(1-2):4-29.
  - [8] A. Alkudhiri, N. Darwish, N. Hilal, Membrane distillation: a comprehensive review, *Desalination* 287 (2012) 2-18.
- A. Alkudhiri, N. Darwish, N. Hilal, Treatment of high salinity solutions: Application of air gap membrane distillation. *Desalination* 287 (2012) 55-60.
- A. Alkudhiri, N. Darwish, N. Hilal, Treatment of saline solutions using Air Gap Membrane Distillation: Experimental study. *Desalination* 323 (2013) 2-7.
- A. Alkudhiri, N. Darwish, N. Hilal, Produced water treatment: Application of Air Gap Membrane Distillation. *Desalination* 309 (2013) 46-51.
- A. Alkudhiri, N. Hilal, Air gap membrane distillation: A detailed study of high saline solution, *Desalination* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2016.07.046>
- [7] E. Drioli, V. Calabro, Y. Wu, Microporous membranes in membrane distillation, *Pure Appl. Chem.* 58 (12) (1986) 1657-1662.
- [32] K. He, H. Hwang, I. Moon, Air gap membrane distillation on the different types of membrane, *Korean J. Chem. Eng.* 28 (3) (2011) 770-777.
- [33] V. Calabro, G. Pantano, M. Kang, R. Molinari, E. Drioli, Experimental study on integrated membrane processes in the treatment of solutions simulating textile effluents. Energy and exergy analysis, *Desalination* 78 (2) (1990) 257-277.
- J.A. Sanmartino, *et al.*, Desalination and concentration of saline aqueous solutions up to supersaturation by air gap membrane distillation and crystallization fouling, *Desalination* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2016.03.010>

J. Xu, Y. B. Singh, G. L. Amy, N. Ghaffour, Effect of operating parameters and membrane characteristics on air gap membrane distillation performance for the treatment of highly saline water, Journal of Membrane Science 512 (2016) 73-82, <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2016.04.010>

## 2 Conclusiones

Como parte de los proyectos productivos con aprovechamiento de agua tratada y energía renovable, se construyeron áreas experimentales para la producción de fresa, arándano y aguacate basados en agua proveniente de un sistema de desalinización alimentado con energía solar.

La Implementación del sistema de desalinización en áreas demostrativas para cultivo de Aguacate, arándano y fresa, lograron aportar conocimiento y experiencia en el campo del manejo integral del agua, energía y cultivos.

Para el cultivo de arándano y fresa se construyó una estructura de invernadero con arco techo que cubre una superficie aproximada de 200 m<sup>2</sup>, en donde se lleva a cabo el seguimiento y validación de 450 plantulas de fresa y 60 plantas de arándano con riego por goteo e hidropónico.

Los resultados obtenidos relacionados con la implementación del sistema de desalinización en los proyectos productivos (aguacate, arándano y fresa), fueron satisfactorios ya que a la fecha las plántulas de aguacate se mantienen en crecimiento al igual que las plántulas de arándano y fresa estas últimas con producción frutal.

Se estructura para paneles solares que alimenta de energía solar al sistema de desalinización por nanofiltración mismo que se logró implementar a los sistemas de riego por micro-aspersión, goteo e hidropónico.

Se llevó a cabo la evaluación experimental de un sistema de desalinización por nanofiltración alimentado con energía fotovoltaica en cultivo aguacate, arándano y fresa, en los resultados se pudo observar una relación casi lineal entre la producción de permeado y la intensidad de la irradiancia solar, lo cual también se refleja de esta manera para la producción de permeado y la presión de entrada del sistema. Se pudo observar que la CE y los SDT disminuyeron conforme se incrementó la presión de entrada del sistema.

A la fecha los cultivos se encuentran en desarrollo presentando crecimiento en tallos, flores y frutos.

Se apoyó la realización de un artículo científico denominado “Desalinización por destilación por membrana con espacio de aire: Estudio experimental y evaluación de la calidad del agua”.

### 3 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Comité Estatal de Sanidad Vegetal del Estado de México (CESAVEM). Manejo Fitosanitario del Aguacate. En línea. Fecha de consulta: 2 de junio de 2010. <http://www.cesavem.org/index.php?accion=aguacate>

Equihua, M.A., Gasca, C.L. y Salinas, C.A. 2007. Plagas. 135-169. En: Téliz, M. y A. Mora. El aguacate y su Manejo Integrado. Segunda Edición. Mundi prensa, México, S. A. de C. V. México, D.F. 320 p.

Embleton, T.W., W.W. Jones, C.K. Labanauskas and W. Reuther. 1973. Leaf analysis as a diagnostic tool and guide to fertilization. En: The Citrus Industry. III. Reuther W. Div. Agric. Sci., Univ. California, Berkeley, CA, pp 183–210.

Glenn EP, Brown JJ., Blumwald E. 1999. Salt tolerance and crop potential of halophytes. Crit. Rev.Plant Sci. 18:227-255.

Greenway H, Munns R. 1980. Mechanisms of salt tolerance in non-halophytes. Ann. Rev. Plant Physiol. 31:149-190.

Grover A, Singh A., Blumwald E. 2011. Transgenic strategies towards the development of salt-tolerance plants. En: Agricultural salinity assessment and management. ASCE manual and reports on engineering practice # 71. eds. (Wallender WW: Tanji KK.). ASCE. Capt. 8: 235-274.

López-Climent MF, Arbona V, Pérez-Clemente RM, Gómez-Cadenas A. 2008. Relationship between salt tolerance and photosynthetic machinery performance in citrus. Environmental and Experimental Botany Vol. 62, 2:176–184.

Maas EV. 1984. Salt Tolerance of plants. En: The handbook of plant Science in Agriculture, (ed. RB Christie), CRC Press Boca Raton (Florida).

Maas EV y Hoffman GJ, 1977. Crop salt tolerance: Current assessment. J Irrig Drain E-ASCE 103: 115-134

Ben-Ya'acov A. and E. Michelson (1995) Avocado Rootstocks. Horticultural Reviews 17:381-429. [Links]

Bernstein N., M. Loffe and M. Zilberstaine (2001) Salt-stress effects on avocado rootstock growth. I Establishing criteria for determination of shoot growth sensitivity to the stress. Plant and Soil 233:1-11. [ Links ]

Bernstein N., A. Meiri, and M. Zilberstaine (2004) Root growth of avocado is more sensitive to salinity than shoot growth. Journal of the American Society for Horticultural Science 129:188-192. [Links]

Crowley D., M. L. Arpaia, W. Smith, P. Clark, G. Bender and G. Witney (2003) Rootstock selections for improved salinity tolerance of avocado. In: Proceedings of California Avocado. G. Witney (ed.). Research Symposium. Ventura, California, 1 Nov. California Avocado Commission, California, USA. pp:116-119. [Links]

Kozłowski T. T. (1997) Responses of woody plants to flooding and salinity. Tree Physiology Monograph 1:1-29. [Links]



Macías A. (2011) México en el mercado internacional de aguacate. *Revista de Ciencias Sociales* 17:517-532. [Links]

Maldonado-Torres R., M. E. Álvarez-Sánchez, G. Almaguer-Vargas, A. Barrientos-Priego and R. García-Mateos (2007) Nutritional standards for 'Hass' avocado. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 13:103-108. [Links]

Mickelbart M. and M. L. Arpaia (2002) Rootstocks influence changes in ion concentrations, growth, and photosynthesis of Hass avocado trees in response to salinity. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 127:649-655. [Links]

Mickelbart M., S. Melser and M. L. Arpaia (2007) Salinity-induced changes in ion concentrations of 'Hass' avocado trees on three rootstocks. *Journal of Plant Nutrition* 30:105-122. [Links]

Rubí M., A. L. Franco, S. Rebollar, E. E. Bobadilla, I. Martínez y Y. Siles (2013) Situación actual del cultivo del aguacate (*Persea americana* Mill.) en el Estado de México, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 16: 93-101. [Links]

Requerimientos Agroecológicos de cultivos

<http://www.inifapcirpac.gob.mx/PotencialProductivo/Jalisco/Cienega/RegionCienegaReqAgroecologicos.pdf>