



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Análisis tecno-económico de un  
sistema de invernadero para cultivo  
de plantas ornamentales mediante  
el aprovechamiento de recurso  
geotérmico de baja entalpia**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

García Ávila Miguel Ángel

**DIRECTOR DE TESIS**

M.I. Rodrigo Alarcón Flores



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021**

## Agradecimientos

Quiero agradecer primero a mi familia, a mi padre, Miguel Ángel García Ortiz, y a mi madre, Guillermina Ávila Ramírez, por todo el apoyo que me han brindado desde pequeño para estudiar y realizar todos los proyectos que me proponga y ser una fuente de inspiración para no rendirme y seguir siempre hacia adelante. A mi hermana, Guillermina García Ávila, por estar siempre a mi lado, apoyarme en todo momento y ser mi confidente.

A mis amigos: Erick, Ángel, Pablo, Luis, Roberto, Dassa, Angie y Santiago por su apoyo, no solo durante nuestro tiempo en la universidad, también a lo largo de estos años y por animarme a seguir escribiendo este trabajo.

Al Doctor Héctor Miguel Aviña Jiménez, por permitirme estar en Grupo iiDEA, permitirme apoyar en los diferentes proyectos y en la realización de éste. Así como en darme la oportunidad de seguir desarrollándome como ingeniero y persona. A todos los miembros del grupo con los que he tenido el gusto de conocer y trabajar: Armando, Daniel, Toño, Fer, Adrián, Gerardo, Montse, Miguel, Garduño, Carlos, Cristian, Inti, Cesar, Daniel y Lalo. Quiero agradecer de manera especial al Maestro Jaime Silva Delgado y al Ingeniero Joaquín Encarnación Flores por su valiosa colaboración para el desarrollo de este trabajo.

Quiero darle las gracias a mi director de tesis, el Maestro Rodrigo Alarcón Flores, por la orientación, ayuda que me brindó y la paciencia que tuvo conmigo durante la realización de mi tesis. Y del apoyo que me brinda para seguir desarrollándome y ampliando mis conocimientos.

## Resumen

En el presente trabajo se analizará la viabilidad técnica y económica de la construcción de un invernadero climatizado mediante energía geotérmica para la producción de flores de corte.

En la primera parte del trabajo se explica que los invernaderos son estructuras que permiten tener las condiciones necesarias para el desarrollo óptimo de diferentes cultivos, además de una breve recopilación de esta tecnología a lo largo de la historia. También se analizan las diferentes variables que afectan al crecimiento de los cultivos y como el invernadero se ve influenciada por éstas. También se explican los diferentes métodos de calefacción y enfriamiento, además de una breve descripción sobre la energía geotérmica y sus aplicaciones para el aprovechamiento del calor en procesos industriales. Finalmente se mencionan tres ejemplos donde el calor geotérmico es utilizado para la calefacción en invernaderos y como beneficia a los productores.

El segundo capítulo analiza con mayor detalle a la agricultura en México, de manera específica a la agricultura protegida. En esta sección se elige al Domo de San Pedro como región de estudio debido a que es una zona con potencial geotérmico probado ya que se encuentra Grupo Dragón, empresa privada que opera en esa zona y que Grupo iiDEA, por medio del Instituto de Ingeniería, ha trabajado de manera conjunta en diferentes proyectos para el aprovechamiento de esta energía. También se selecciona el cultivo a cosechar, de entre seis diferentes plantas ornamentales, la rosa se utilizará en este estudio por ser la planta con un mayor valor de producción, al igual que información de los parámetros de cultivo. Además de realizar una comparativa entre cultivar a cielo abierto como en invernadero para resaltar que se puede tener rendimientos de 3 hasta 6 veces mayor en invernadero.

El tercer capítulo consta de en lista los parámetros necesarios para poder calcular las cargas térmicas, al igual de una breve descripción de cada uno de éstos. Se explica como en un trabajo previo, se logró cubrir la demanda energética para un invernadero que producía jitomate mediante la climatización de energía geotérmica. Otro punto importante es el dimensionamiento de los equipos necesarios para efectuar el proyecto, como son bombas de circulación de agua dulce y geotérmica, intercambiador de calor y el sistema de tuberías mediante un croquis. Se muestra un esquema de cómo funcionará todo el invernadero, que incluye la obtención de agua dulce, el riego de las plantas, la climatización que abarca tanto la calefacción como la refrigeración y en qué momento se activaran los equipos.

Por último, se realizó un análisis financiero en el cual se pudo observar que el proyecto no era rentable, principalmente por el costo de traer pipas para llenar el tanque de agua dulce. Es por ello que se tuvo que realizar diferentes ajustes, como el disminuir la cantidad de agua que se utilizaría semanalmente, reducir al personal y el tiempo de operación de las bombas. Después de los ajustes, se obtuvo que, para recuperar la inversión, sería en 7 años, de los 10 años de vida útil de un invernadero.

Se concluyo que el proyecto es técnicamente viable, ya que se cubren las necesidades térmicas con el recurso de la región, y para mejorar el tiempo de retorno, se deben de buscar mejores opciones para la obtención de agua dulce, ya sea mediante apoyos gubernamentales o la realización en sitios donde se tenga acceso al agua.

## Índice General

Agradecimientos .....	I
Resumen.....	II
Índice General.....	III
Lista de Figuras.....	VII
Lista de tablas y gráficas .....	IX
Nomenclatura .....	XI
Introducción .....	1
Planteamiento del problema .....	2
Objetivo general.....	3
Objetivos particulares .....	3
Capítulo 1 Estado del arte de los invernaderos.....	5
1.1 Antecedentes .....	5
1.2 Parámetros y métodos de cultivo .....	7
1.3 Tipos de invernaderos .....	8
1.2.1 Malla sombra o casa sombra .....	8
1.2.2 Invernadero Raspa y Amagado .....	9
1.2.3 Invernadero túnel .....	10
1.2.4 Invernadero multitúnel .....	11
1.2.4.1 Invernadero capilla o multicapilla .....	11
1.2.4.2 Invernadero gótico .....	12
1.2.4.3 Invernadero asimétrico o tropical .....	12
1.4 Climatización de invernaderos .....	13
1.4.1 Sistemas de enfriamiento .....	14
1.4.2 Sistemas de calefacción .....	14
1.5 Fuentes de energía para la calefacción.....	16
1.5.1 Energía geotérmica .....	16
1.5.2 Origen del calor interno.....	17
1.5.3 Gradiente geotérmico .....	18
1.5.4 Tectónica de placas .....	18
1.5.5 Beneficios de un invernadero geotérmico.....	20

1.5.6 Otras aplicaciones del calor geotérmico.....	23
1.6 Geotermia en México .....	24
1.6.1 Usos directos en México .....	25
1.7 Casos de éxito .....	26
Conclusiones .....	28
Capítulo 2 Selección del sitio y del cultivo.....	29
2.1 Agricultura en México.....	29
2.1.1 Agricultura protegida en México .....	29
2.2 Región de estudio .....	33
2.2.1 Clima regional.....	34
2.2.2 Radiación solar .....	34
2.3 Características de Nayarit.....	35
2.3.1 Recursos naturales.....	35
2.3.2 Agricultura en Nayarit.....	36
2.3.3 Recurso geotérmico.....	37
2.4 Selección de cultivo .....	38
2.4.1 Floricultura.....	39
2.4.2 Selección.....	41
2.5 La Rosa .....	42
2.5.1 Antecedentes .....	42
2.5.2 Rosas en México.....	43
2.6 Requerimientos edafoclimáticos de la rosa .....	44
2.6.1 Parámetros climáticos .....	44
2.6.2 Nutrición .....	45
2.6.3 Plagas y enfermedades .....	45
2.7 Producción de rosas .....	46
2.7.1 Rosa planta .....	47
Conclusiones .....	50
Capítulo 3 Propuesta de diseño .....	51
3.1 Antecedentes .....	51
3.1.1 Contexto .....	51

3.1.2 Selección del invernadero para cultivo de jitomate .....	51
3.1.3 Consideraciones técnicas y climáticas .....	52
3.1.4 Resultados .....	54
3.2 Propuesta de diseño de invernadero para cultivo de flores en Nayarit .....	54
3.2.1 Parámetros climáticos .....	54
3.2.2 Cubierta para el invernadero .....	57
3.2.3 Modelo del invernadero.....	58
3.3 Análisis energético del invernadero .....	61
3.3.1 Calor generado por la radiación neta.....	62
3.3.2 Calor cedido por la cubierta.....	64
3.3.3 Calor cedido por evapotranspiración.....	66
3.3.4 Calor cedido por el suelo .....	67
3.3.5 Calor cedido por la renovación de aire .....	68
3.3.6 Calor absorbido por condensación .....	71
3.3.7 Calor de equipos auxiliares .....	71
3.4 Sistema de enfriamiento .....	74
3.4.1 Ventilación natural.....	74
3.4.2 Nebulización .....	75
3.5 Memoria de cálculo .....	75
3.5.1 Condiciones internas y externas del invernadero.....	75
3.5.2 Comparación con Mexicali .....	78
3.5.3 Calefacción .....	79
3.5.4 Enfriamiento.....	81
3.6 Equipos auxiliares .....	82
3.6.1 Intercambiador de calor .....	82
3.6.2 Equipos de bombeo .....	87
3.7 Lista de material requerido.....	90
3.8 Recapitulación .....	92
3.9 Esquema de operación.....	96
Conclusiones .....	100
Capítulo 4 Análisis económico.....	101

4.1 Costos e inversiones del proyecto .....	101
4.2 Inversiones del proyecto.....	101
4.2.1 Inversiones fijas .....	102
4.2.2 Inversiones diferidas .....	102
4.2.3 Total de las inversiones .....	102
4.3 Plan de producción.....	104
4.3.1 Ingresos.....	106
4.4 Costos del proyecto .....	107
4.4.1 Insumos agrícolas .....	108
4.4.2 Mano de obra .....	109
4.4.3 Energía eléctrica .....	110
4.4.4 Costo del agua geotérmica .....	112
4.4.5 Costo del agua dulce .....	116
4.4.6 Costos totales.....	118
4.5 Modelo financiero .....	120
Conclusiones .....	127
Capítulo 5 Conclusiones.....	129
<b>Anexo 1</b> .....	131
Referencias .....	132

## Lista de Figuras

### Capítulo 1

Fig. 1.1 Usos y partes de un invernadero: a) Cultivos en invernaderos (Geothermal Education Office, 2000), b) Diagrama de un invernadero (orensila, 2019) .....	5
Fig. 1.2 Línea del tiempo con la evolución de los invernaderos (Vallejo & Asunción, 2004) (Rodríguez Rivas, 2009),.....	6
Fig. 1.3 Invernaderos a lo largo de la historia: a) Ilustración de un Kemet (Gijón Belenguer, 2018), b) Ilustración de un jardín chino, c) Ilustración de una Caja Ward 1851 (Harford, 2020), d) Ilustración del exterior de un invernadero del Siglo XIX (World History Archive, Alamy Foto, 2020).....	6
Fig. 1.4 Diferentes tipos de invernaderos (NOVAGRIC, 2016) .....	8
Fig. 1.5 Invernadero tipo malla sombra (NOVAGRIC, 2016).....	9
Fig. 1.6 Invernadero tipo Raspa y Amagado (NOVAGRIC, 2016) .....	10
Fig. 1.7 Invernadero tipo túnel (IMA, 2020; NOVAGRIC, 2016).....	10
Fig. 1.8 Invernadero tipo capilla (NOVAGRIC, 2016) .....	11
Fig. 1.9 Invernadero tipo gótico (NOVAGRIC, 2016) .....	12
Fig. 1.10 Invernadero tipo asimétrico (IMA, 2020) .....	13
Fig. 1.11 Arreglos para la climatización de invernaderos: (a) calentamiento por tuberías aéreas; (b) calentamiento de banco; (c) tubos de calentamiento de posición baja para calentamiento aéreo; (d) calentamiento del suelo. (e) Instalaciones de calefacción con movimiento de aire forzado; (e) posición lateral; (f) ventilador aéreo; (g) conductos de alta posición; (h) conductos de baja posición (Dickson & Fanelli, 2003) .....	15
Fig. 1.12 Estructura de la Tierra en zonas concéntricas (LLopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008).....	17
Fig. 1.13 Esquema del proceso de la tectónica de placas (Íbid, pp.29) .....	18
Fig. 1.14 Mapa de las placas tectónicas (Íbid, pp.29) .....	19
Fig. 1.15 Esquema de un sistema hidrotermal (Íbid, pp.29) .....	20
Fig. 1.16 Diagrama de usos en cascada (LLopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008) .....	22
Fig. 1.17 Diagrama de Lindal (LLopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008).....	23
Fig. 1. 18 Usos directos de la energía geotérmica: a) Climatización de piscinas, b) Climatización de edificios, c) Deshielo de pisos, d) Procesado de madera, e) Crianza de caimanes en California, f) Climatización de invernaderos (Ibid, pp. 132-145).....	24
Fig. 1.19 Recurso geotérmico en México (Santoyo & Barragán Reyes, 2010) .....	25

### Capítulo 2

Fig. 2.1 Ilustración de una chinampa (Iglesias y Cabrera, 2014) .....	30
Fig. 2.2 Ilustración de un tochimal (Bastida Tapia, 2017).....	30
Fig. 2.3 Localización del sitio de estudio (Google Maps, 2020) .....	34
Fig. 2.4 Corredores comerciales en México (El Economista, 2019) .....	36
Fig. 2.5 Mapa del gradiente geotérmico y flujo de calor de México (Instituto de geofísica de la UNAM, 2017).....	38

Fig. 2.6 Ilustración del Palacio Malmaison (Urquijo, 2014).....	43
Fig. 2.7 Principales estados de cultivo de la rosa (Ibid, pp. 134) .....	43
Fig. 2.8 Usos industriales de la rosa (Balansiya, 2018) .....	44
Fig. 2.9 Evolución del comercio exterior de rosas en México (SIAP, 2018) .....	46

### Capítulo 3

Fig. 3.1 Temperatura promedio (PI INGENERA - GRUPO IIDEA, 2019) .....	55
Fig. 3.2 Velocidad del viento promedio (Ibid, pp. 9).....	55
Fig. 3.3 Radiación solar normal directa (World Bank Group, 2020).....	56
Fig. 3.4 Esquema del invernadero geotérmico; donde: a) pozo de producción, b) intercambiador de calor, c) pozo de reinyección, d) tanque de agua, e) bomba de circulación, f) tubería de calefacción, g) invernadero (Elaboración propia) .....	59
Fig. 3.5 Modelo del invernadero propuesto .....	59
Fig. 3.6 Esquema de la forma óptima de plantación (Reid, 2008) .....	60
Fig. 3.7 Flujos de calor en el invernadero (Salazar Moreno, López Cruz, & Sánchez Cruz, 2018) .....	61
Fig. 3.8 Arreglo del sistema de tubería de calefacción para el invernadero .....	80
Fig. 3.9 Sistema de nebulización: a) filtro, b) cisterna, c) bomba, d) aspersores (Plasson, 2018) .....	82
Fig. 3.10 Esquema del uso de intercambiadores de calor en invernaderos (Rafferty & Boyd, 2008)....	83

### Capítulo 4

Fig. 4.1 Abono para rosas (PISUMMA, 2017).....	108
Fig. 4.2 Material para aplicación de pesticida: a) Insecticida (PireKrone, 2019), b) Rociador manual (Grainger, 2019), c) Equipo de protección para el operario (Vallen, 2019).....	109
Fig. 4.3 Película plástica para invernadero: a) Cinta para parchado, b) Película plastica (Hydro Enviroment, 2020).....	109
Fig. 4.4 Medición de la cantidad de lluvia (Hernán Pepa, 2013) .....	116

## Lista de tablas y gráficas

### Capítulo 1

Tabla 1.1 Comparación de diferentes fuentes de energía para la climatización de invernaderos (CanGEA, 2014) .....	21
Tabla 1.2 Comparación de una planta geo termoeléctrica e invernadero geotérmico (CanGEA, 2014).....	22
Tabla 1.3 Usos directos en México (Gutiérrez Negrín, Maya González, & Quijano León, 2015) .....	26

### Capítulo 2

Tabla 2.1 Superficie dedicada a la agricultura protegida (Íbid, pp.281) .....	31
Tabla 2.2 Superficie cubiertas en México (SIAP, 2019) .....	32
Tabla 2.3 Países con mayor superficie dedicada a la agricultura protegida (Íbid, pp.287) .....	33
Tabla 2.4 Comparación entre cultivos en invernaderos (SIAP, 2019) .....	39
Tabla 2.5 Principales flores de exportación en México (INEGI, 2015) .....	41
Tabla 2.6 Producción agrícola (Ibid, 2019) .....	42
Tabla 2.7 Nutrientes para la rosa (Yong, 2004).....	45
Tabla 2.8 Producción de rosas (planta) en cielo abierto (SIAP, 2019).....	47
Tabla 2.9 Producción de rosas (planta) en invernadero (SIAP, 2019).....	47
Tabla 2.10 Producción de rosas (gruesas) en cielo abierto (SIAP, 2019) .....	48
Tabla 2.11 Producción de rosas (gruesas) en invernadero (SIAP, 2019) .....	49
Gráfico 2.1 Irradiación solar directa promedio (World Bank Group, 2020) .....	35
Gráfico 2.2 Principales exportadores de flores (Ekos, 2019) .....	40

### Capítulo 3

Tabla 3.1 Consideraciones de diseño (Jasso Rivera, 2016).....	52
Tabla 3.2 Consideraciones climáticas en Baja California (Íbid, 117-121).....	53
Tabla 3.3 Resultados del invernadero de jitomate (Íbid, pp. 121,136) .....	54
Tabla 3.4 Parámetro de diseño (Jasso Rivera, 2016).....	58
Tabla 3.5 Coeficiente de absorción de una cubierta vegetal para la radiación solar (Íbid, pp.50) .....	63
Tabla 3.6 Valores de albedo para diferentes tipos de suelo (Ibid, pp. 50) .....	63
Tabla 3.7 Conductividad térmica de cubiertas de invernaderos (Íbid, pp. 52) .....	65
Tabla 3.8 Conductividad térmica de algunos tipos de suelo (Íbid, pp. 55) .....	68
Tabla 3.9 Cambios de aire (Íbid, pp 53) .....	68
Tabla 3.10 Coeficientes de descarga para diferentes tipos de ventanas (Íbid, pp. 54) .....	70
Tabla 3.11 Coeficientes de efecto de viento en invernaderos (Íbid, pp. 53) .....	70
Tabla 3.12 Emisividad de algunos materiales (IDAE, 2008) .....	73
Tabla 3.13 Parámetros de desarrollo (Van Beveren, Bontsema, Van Straten, & Van Henten, 2014; Rosa, 2015; Fundación PRODUCE Chiapas, a.c., 2009) .....	75
Tabla 3.14 Resultados para la calefacción .....	81
Tabla 3.15 Resultados para la refrigeración .....	81

Tabla 3.16 Características del intercambiador de calor (Alfa Laval, 2015) .....	86
Tabla 3.17 Requerimientos para el intercambiador de calor.....	87
Tabla 3.18 Rugosidad absoluta de diferentes materiales (Universidad de la República, 2015) .....	89
Tabla 3.19 Selección del equipo de bombeo .....	89
Tabla 3.20 Recapitulación de los parámetros del proyecto .....	92
Tabla 3.21 Resultados del proyecto.....	95

Gráfico 3.1 Comparación entre las temperaturas del invernadero y ambientales (PI INGENERA - GRUPO IIDEA, 2019) .....	56
Gráfico 3.2 Carga térmica en enero.....	76
Gráfico 3.3 Carga térmica en mayo.....	76
Gráfico 3.4 Comparación entre las cargas térmicas en enero .....	77
Gráfico 3.5 Comparación entre las cargas térmicas en mayo.....	77
Gráfico 3.6 Comparación entre las dos locaciones para la calefacción .....	78
Gráfico 3.7 Comparación entre las dos locaciones para la refrigeración .....	79

#### Capítulo 4

Tabla 4.1 Inversiones fijas del proyecto .....	103
Tabla 4.2 Rendimiento de las rosas en diferentes invernaderos (Zeroni & Gale, The effect of root temperature on rose plants in relation to air temperature, 1987) .....	105
Tabla 4.3 Producción mensual de rosas (Kool & de Koning, 1996).....	106
Tabla 4.4 Estacionalidad de los precios para rosas de invernadero (SNIIM, 2020) .....	107
Tabla 4.5 Costo de mano de obra.....	110
Tabla 4.6 Costo de la energía eléctrica (CFE, 2020) .....	110
Tabla 4.7 Consumo y costo de la energía eléctrica .....	111
Tabla 4.8 Costo del agua geotérmica, análisis directo .....	113
Tabla 4.9 Especificaciones técnicas del calentador de agua (ManualPDF.es, 2020) .....	114
Tabla 4.10 Datos para el análisis de combustión (Aviña Jiménez, 2018, pág. 18).....	114
Tabla 4.11 Datos para el análisis de combustión .....	115
Tabla 4.12 Costo del agua geotérmica, análisis indirecto .....	115
Tabla 4.13 Costos del proyecto.....	119
Tabla 4.14 Flujo de caja libre del proyecto .....	120
Tabla 4.15 Indicadores financieros .....	122
Tabla 4.16 Inversiones fijas modificadas .....	123
Tabla 4.17 Costos modificados .....	124
Tabla 4.18 Flujo de caja libre modificado .....	125
Tabla 4.19 Indicadores financieros, modificado.....	126

## Nomenclatura

$A_c$	Área de la cubierta [m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{evap}}$	Calor cedido por la evapotranspiración [W]
$A_{\text{sol}}$	Área captadora de energía solar [m <sup>2</sup> ]	$Q_n$	Calor suministrado por la radiación neta [W]
$A_{\text{suelo}}$	Área de plantación del invernadero [m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{neb}}$	Calor cedido por nebulización [W]
$A_{\text{vent}}$	Área total de las ventanas [m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{vent}}$	Calor cedido por la renovación de aire [W]
$C_d$	Coefficiente de descarga	$Q_{\text{suelo}}$	Calor cedido al suelo [W]
$C_f$	Coefficiente de infiltración	$Q_{\text{tub}}$	Calor suministrado por tubería [W]
$C_{p_{\text{agua}}}$	Calor específico del agua [ $\frac{J}{kgK}$ ]	$q_{\text{uevp}}$	Flujo másico por nebulización [ $\frac{kg}{s}$ ]
$C_{p_{\text{aire}}}$	Calor específico del aire [ $\frac{J}{kgK}$ ]	$R$	Renovaciones de aire [ $\frac{1}{h}$ ]
$C_w$	Coefficiente de efecto del viento	$R_a$	Número de Rayleigh
$DPV$	Deficit de presión parcial [kPa]	$Re$	Número de Reynolds
$e_c$	Espesor de la cubierta plástica [mm]	$r_{\text{ext}}$	Radio exterior de la tubería [mm]
$e_e$	Presión parcial del vapor de agua en el aire [kPa]	$r_{\text{int}}$	Radio interno de la tubería [mm]
$e_s$	Presión parcial de saturación vapor de agua en el aire [kPa]	$T_{\text{atm}}$	Temperatura de emisión de energía de la atmósfera [K]
$ET_c$	Evapotranspiración del cultivo [ $\frac{kg}{s}$ ]	$T_{\text{entrada}}$	Temperatura del agua a la entrada de la tubería [°C]
$ET_o$	Evapotranspiración de referencia [ $\frac{kg}{s}$ ]	$T_{\text{ext}}$	Temperatura del aire en el exterior del invernadero [°C]
$f_n$	Factor de nubosidad [1]	$T_{\text{inv}}$	Temperatura del aire en el invernadero [°C]
$f_p$	Fracción del suelo cubierta por plantas [1]	$T_s$	Temperatura superficial de la tubería [°C]

G	Flujo volumétrico de ventilación $[\frac{m^3}{s}]$	T <sub>salida</sub>	Temperatura del agua a la salida de la tubería [°C]
g	Aceleración de la gravedad $[\frac{m}{s^2}]$	T <sub>suelo</sub>	Temperatura del suelo del invernadero [°C]
h	Distancia entre el centro de la ventana lateral y cenital [m]	u	Velocidad del viento a una altura de 2 metros $[\frac{m}{s}]$
h <sub>ext</sub>	Coficiente de transferencia convectivo del aire externo y la cubierta del invernadero $[\frac{W}{m^2 K}]$	U	Coficiente de transferencia de calor de la cubierta $[\frac{W}{m^2 K}]$
h <sub>tub,ext</sub>	Coficiente convectivo en el exterior del tubo $[\frac{W}{m^2 K}]$	v	Velocidad del aire en el exterior del invernadero $[\frac{m}{s}]$
h <sub>int</sub>	Coficiente de transferencia convectivo del aire interno y la cubierta del invernadero $[\frac{W}{m^2 K}]$	v <sub>m</sub>	Velocidad del agua en la tubería $[\frac{m}{s}]$
h <sub>tub,int</sub>	Coficiente convectivo en el interior del tubo $[\frac{W}{m^2 K}]$	α	Coficiente de absorción de radiación solar de la cubierta [1]
HR	Humedad relativa [%]	α <sub>cc</sub>	Coficiente global de transferencia de calor de la cubierta $[\frac{W}{m^2 K}]$
I <sub>rad</sub>	Radiación solar externa $[\frac{W}{m^2}]$	α <sub>s</sub>	Coficiente de absorción de radiación solar de la planta [1]
k	Conductividad térmica del fluido $[\frac{W}{mK}]$	α <sub>suelo</sub>	Coficiente de absorción de radiación solar del suelo [1]
k <sub>c</sub>	Coficiente del cultivo [1]	β	Coficiente de expansión volumétrica $[\frac{1}{K}]$
ks	Coficiente de intercambio térmico a través del suelo $[\frac{W}{mK}]$	Δ	Pendiente de la curva de presión de vapor $[\frac{kPa}{°C}]$
k <sub>tub</sub>	Conductividad térmica de la tubería $[\frac{W}{mK}]$	γ	Constante psicométrica $[\frac{kPa}{°C}]$

LAI	Índice de área foliar del cultivo [1]	$\varepsilon_{atm}$	Emisividad de la atmósfera [1]
Lc	Longitud característica de la tubería [m]	$\varepsilon_{tb}$	Emisividad de la tubería [1]
Lp	Longitud total de la tubería de calefacción [m]	$\lambda$	Calor latente de vaporización del agua [ $\frac{J}{kg}$ ]
m	Flujo másico del agua [ $\frac{kg}{s}$ ]	$\lambda_c$	Conductividad de la cubierta plástica [ $\frac{W}{mK}$ ]
Nu	Número de Nusselt	$\nu$	Viscosidad cinemática del fluido [ $\frac{m^2}{s}$ ]
P	Presión atmosférica [kPa]	$\rho$	Densidad del aire [ $\frac{kg}{m^3}$ ]
Pr	Número de Prandtl	$\rho_{suelo}$	Albedo del suelo [1]
ps	Profundidad a la que se estima la diferencia de temperatura [m]	$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman [ $\frac{W}{m^2 K^4}$ ]
Q <sub>cond</sub>	Calor suministrado por condensación [W]	$\tau$	Coefficiente de transmisión de radiación solar de la cubierta [1]
Q <sub>cub</sub>	Calor cedido por la cubierta [W]		

## Introducción

Uno de los mayores problemas que tiene el campo mexicano es la migración de los campesinos a las urbes en busca de mejores oportunidades, llegando a tener un 30% de la población rural cambiándose a las ciudades (Castillo Ramírez, 2019). Esto se debe a la poca información o a las trabas burocráticas para los apoyos gubernamentales, los bajos precios que reciben de sus productos y la escasez tecnológica para mejorar la calidad de los cultivos ya que se utilizan métodos tradicionales que dependen de las temporadas de lluvias.

Otro problema que afronta el campo mexicano es el calentamiento global ya que un 74% de las actividades agrícolas depende de las épocas de lluvia (CEDRSSA, 2017) las cuales se ven afectados por un aumento en las sequías, heladas e inundaciones; al igual que a un aumento en la temperatura y proliferación de plagas y malas hierbas. Es por ello que para evitar daños a los cultivos de las condiciones ambientales, se ha optado por la utilización de invernaderos, estructuras que pueden ser tan simples como postes de madera y películas plásticas, como estructuras automatizadas de metal con cubiertas de cristal; con la finalidad de generar las condiciones adecuadas para el desarrollo óptimo de los cultivos, disminuir el tiempo de desarrollo de las plantas y mejorar la calidad de los productos en comparación con la siembra a cielo abierto.

Para mantener un control de las condiciones ideales de desarrollo de las plantas dentro de los invernaderos, se realiza mediante el empleo de combustibles fósiles. Pero debido al alza constante de sus precios y al fuerte impacto ambiental que se genera, se deben buscar soluciones que sean lo más amigables con el medio ambiente y económicamente atractivas, ya que, del total de la energía producida en el mundo, 30% está destinada a este sector, llegando a generar hasta un 22% del total de los GEI. Una solución viable a este problema es el aprovechamiento de energías renovables para que los productores tengan un suministro constante de energía.

A pesar de estos problemas, el campo mexicano tiene una gran área de oportunidad de crecimiento económico para el país, debido a que se cuenta con 198 millones de hectáreas cultivables, siendo solamente aprovechadas 145 millones. Un área de oportunidad de desarrollo del campo mexicano es la floricultura, actividad que pertenece a la agricultura, principalmente para el desarrollo de microempresas del país, dado que tiene un valor de 8,714 millones de pesos, siendo las siguientes flores con el mayor valor de producción en el país: la rosa con 2,028 millones de pesos, el crisantemo con 1,932, la gladiola con 1,228, nochebuena con 576, liliium con 473, clavel y gerbera con 443 y 315 respectivamente. (SIAP, 2018). Del total de la producción, solo del 10 al 20% se exporta, principalmente a Estados Unidos y Canadá, generando un total de 1,585 millones de pesos anuales (INEGI, 2020), representando menos del 1% del total de las exportaciones. Actualmente, hay 120 países que participan como productores globales, siendo Holanda el mayor productor y exportador de flores de corte llegando a tener un valor de producción de 2,000 millones de dólares. (Tejeda Sartorius, Ríos Barreto, Trejo Téllez, & Vaquera Huerta, 2015)

## Planteamiento del problema

Un factor importante para el campo mexicano es el implementar diferentes tipos de tecnologías con el fin de mejorar la calidad de los productos agrícolas y dar la capacidad de producir en todo el año para aprovechar las temporadas de alta demanda de los productos agrícolas.

Aunque en el mundo se han logrado mejoras para los invernaderos con equipos más sofisticados que permiten tener productos de alta calidad, el costo total de la inversión varía del área de siembra y qué tan tecnificado estará el invernadero. De acuerdo con Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA), se requiere de inversiones de 350-400 pesos mexicanos por m<sup>2</sup> para invernaderos con baja tecnología y hasta 500 pesos para un invernadero con cierta automatización, llegando a costar entre 3.5 a 5 millones de pesos por hectárea, haciendo que a las pequeñas empresas y productores les sea inaccesible este tipo de tecnología.

Lo que se busca con esta investigación es el plantear una aplicación para el aprovechamiento directo de los recursos geotérmicos de baja entalpía, de los cuales México cuenta con un gran potencial a lo largo del territorio. Dicha aplicación está dirigida al sector agrícola, mediante el diseño de un invernadero eficiente y competitivo, para el cultivo de flores ornamentales, particularmente la producción de rosas, el cual tenga un control preciso de la temperatura del recinto durante todo el proceso de cultivo, con lo cual se pueda incrementar la producción de las flores ornamentales seleccionadas.

Para lograr el clima al interior del invernadero que provoque la máxima eficiencia de producción, se ha planteado un diseño aclimatado con energía geotérmica para compensar el descenso de la temperatura tanto en las noches como en las estaciones invernales, así como la implementación de una metodología de ventilación y humidificación en las diferentes horas del día.

## Objetivo general

Evaluar la factibilidad tecno-económica de un invernadero climatizado mediante energía geotérmica para la producción de flores ornamentales.

## Objetivos particulares

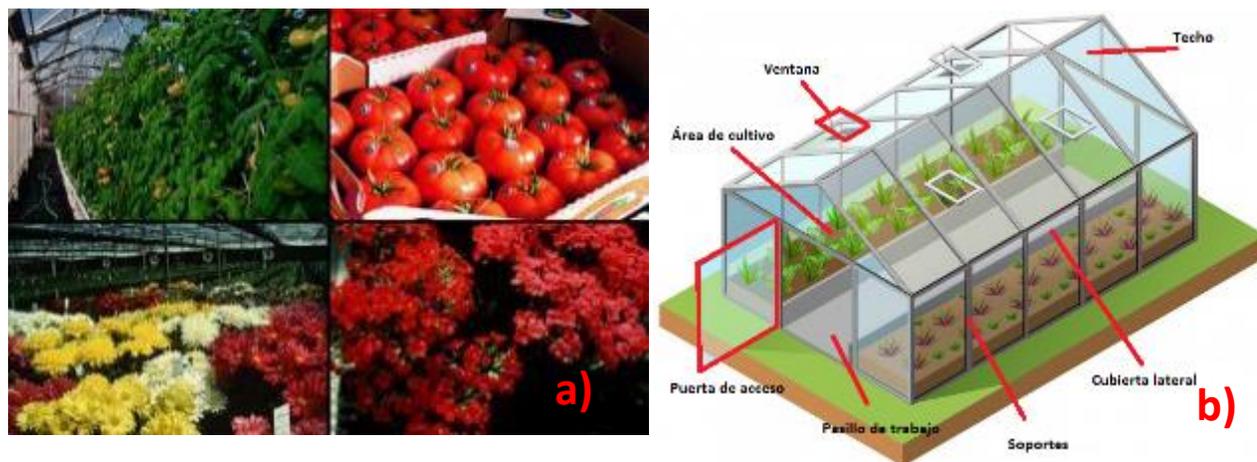
- Dar un panorama sobre los invernaderos, formas de climatización y requerimientos que se deben de cuidar dentro del invernadero.
- Definir las características y requerimientos para la siembra en invernaderos
- Cuantificar la cantidad de recurso geotérmico requerido para mantener las condiciones ideales del cultivo.
- Realizar un análisis de costo y rentabilidad del invernadero propuesto.

## Capítulo 1 Estado del arte de los invernaderos

En este capítulo se definirá lo que es un invernadero, su clasificación, y evolución a lo largo de la historia. Además, se explicará cómo se logra climatizar un invernadero, tanto de manera tradicional que es mediante energía solar y aprovechando fuentes externas como son la quema de combustibles, utilización de biomasa y uso de la energía geotérmica, al igual que los casos de éxito que se tiene tanto en México como en el mundo.

### 1.1 Antecedentes

Un invernadero es un espacio con cubiertas transparentes y su función es la de mantener en su interior el clima que se requiere para el crecimiento de los productos que se vayan a cultivar. En la **Fig. 1.1** se aprecian tanto diferentes productos que se pueden obtener al utilizar los invernaderos y un diagrama con las partes básicas de un invernadero.



*Fig. 1.1 Usos y partes de un invernadero: a) Cultivos en invernaderos (Geothermal Education Office, 2000), b) Diagrama de un invernadero (orensila, 2019)*

Las primeras civilizaciones en utilizarlos para proteger los cultivos de las condiciones climáticas de sus respectivas regiones fueron China y Egipto. Le siguieron Grecia e Italia con el fin de acelerar el crecimiento de sus cultivos. Durante la Edad Moderna, en el siglo XVII, en el Palacio de Versalles se construyó una zona denominada “Orangerie” el cual tenía la misma función que un invernadero, ya que en invierno alberga más de 1,500 arbustos, principalmente naranjos. No es hasta el siglo XIX, gracias a la producción masiva de vidrio, que los productores agrícolas, ingleses, franceses y escandinavos, empiezan a habituarse a sus beneficios, siendo los Países Bajos los primeros en utilizarlos para la cosecha de uvas alrededor de 1850, llegando a contar para 1960 con la mayor superficie sembrada bajo invernaderos. A partir de los años 60s, países con climas templados, como Italia, España y Francia o climas tropicales como el Caribe, empiezan a utilizar los invernaderos para aumentar la producción de sus cosechas. En la **Fig. 1.2**, se aprecia la evolución de los invernaderos en el tiempo mientras que en la **Fig. 1.3** se presentan algunos ejemplos a lo largo de la historia.

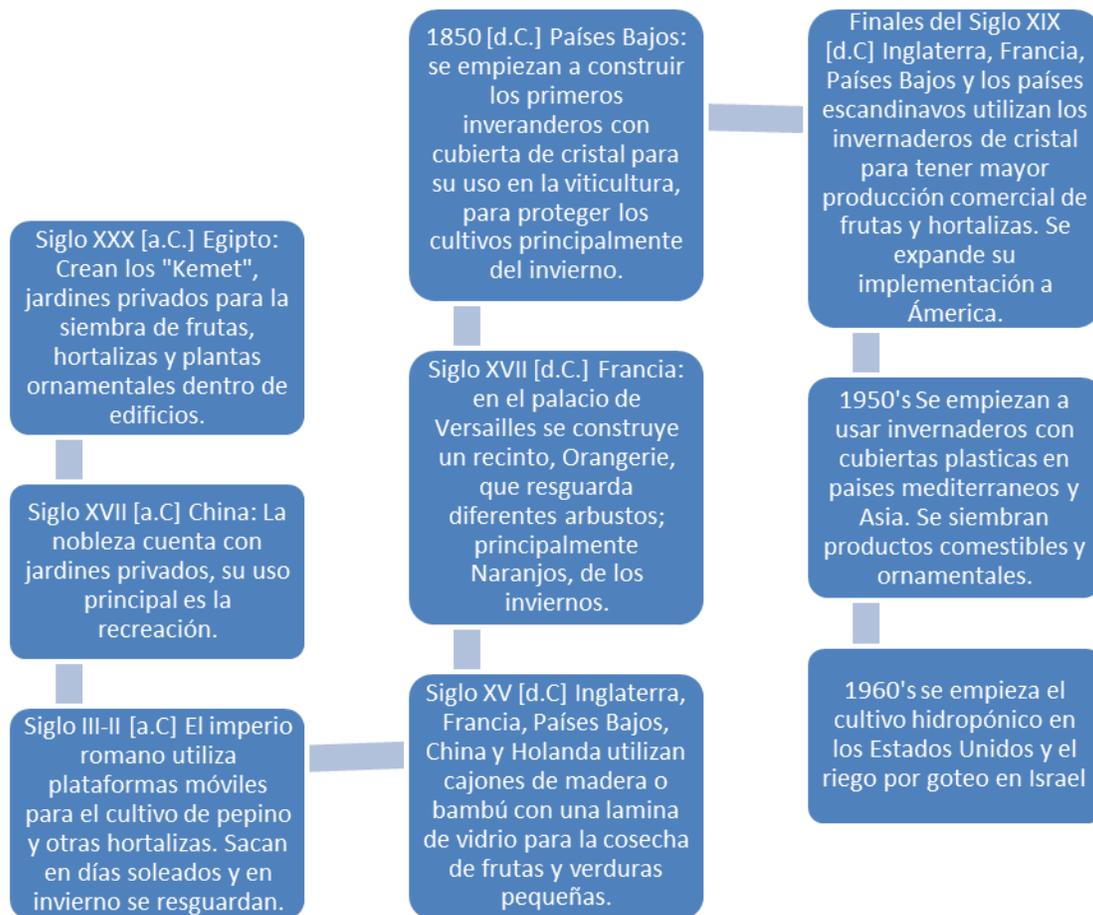


Fig. 1.2 Línea del tiempo con la evolución de los invernaderos (Vallejo & Asunción, 2004) (Rodríguez Rivas, 2009),

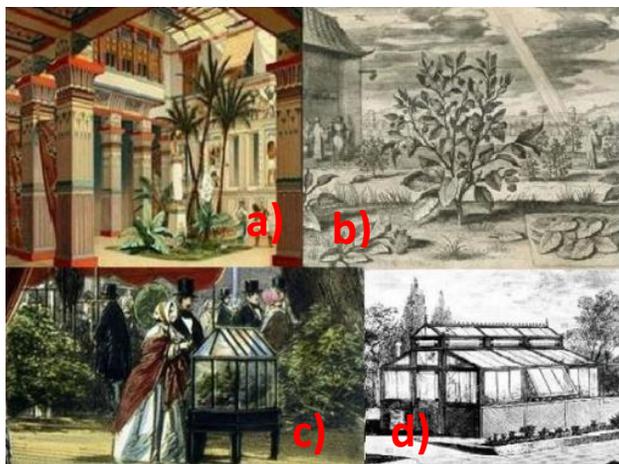


Fig. 1.3 Invernaderos a lo largo de la historia: a) Ilustración de un Kemet (Gijón Belenguer, 2018), b) Ilustración de un jardín chino, c) Ilustración de una Caja Ward 1851 (Harford, 2020), d) Ilustración del exterior de un invernadero del Siglo XIX (World History Archive, Alamy Foto, 2020)

## 1.2 Parámetros y métodos de cultivo

Al utilizar invernaderos, se deben de cuidar ciertos parámetros que afectan al crecimiento de las plantas. Dickson y Fanelli, (2003, p. 93) mencionan los siguientes:

- Luz: factor más importante para el desarrollo de las plantas, siendo éste el que influye a los demás. El rango de longitud de onda que las plantas realizan la fotosíntesis es entre 400 y 700 nm. Las plantas utilizan la luz solar para la producción de carbohidratos a partir del agua y dióxido de carbono.
- Temperatura: variable que repercute al desarrollo óptimo de las plantas. Éste depende de la intensidad luminosa, a mayor intensidad luminosa, mayor la temperatura. Cuenta con una subdivisión:
  - Nocturna y diurna: valores óptimos para el confort de las plantas.
  - Mínima letal: de alcanzar valores menores a éste, ocasiona daños a las plantas.
  - Máxima y mínima biológica: rango de valores que alteran el crecimiento y desarrollo de las plantas.
- Concentración de CO<sub>2</sub>: el CO<sub>2</sub> que se encuentra en la atmósfera sirve para generar carbohidratos que requiere la planta para desarrollarse. Este parámetro depende de manera proporcional a la intensidad de luz y temperatura.
- Agua: elemento que igual ayuda a la producción de carbohidratos. Lo absorbe del aire y tierra de sus alrededores. La cantidad de agua que se requiere dependerá del tipo de planta que se cultive.
- Cambios de aire: afecta a la transferencia de calor y absorción de agua entre las plantas y el aire. Igual que la cantidad de agua, los cambios de aire dependen del tipo de planta que se tenga.
- Equipos de climatización (calefacción y enfriamiento): afectan a los cambios de aire, temperatura del aire y suelo y humedad dentro del invernadero. Éstos se ven afectados por el material de construcción, el material de las paredes y techos y la etapa de desarrollo en la que se encuentre el cultivo.

Al tener control sobre estas variables, se tendrán un mejor control en la producción. Este control dependerá también del método de producción que se utilice, estos son, según Bruzos (2011):

- Suelo: método tradicional que aprovecha el suelo natural del terreno, las plantas se orientan en general a doble fila y el riego se realiza a través del uso de sistemas de goteo o dosificadores. El principal inconveniente de este método se presenta cuando la tierra es propensa a enfermedades que afectan los cultivos, o a suelos que se han ido degradando por la agricultura, ya que se van reduciendo sus nutrientes.
- Hidropónico: no requiere del uso del suelo natural del terreno, las plantas se encuentran suspendidas y sus raíces se encuentran en contacto con soluciones nutritivas.

- Bolsas y macetas: consiste en una mezcla de sustrato contenida en una bolsa de polietileno o macetas de plástico, barro o cajas de madera, que cuentan con agujeros en el fondo para el drenaje del exceso del agua. El sustrato puede ser aserrín, lana de roca, cáscara de arroz, cáscara de pino, entre otras. El método de riego utilizado es por goteo, ya que se realiza una mezcla de agua y nutrientes.
- Aeroponía o suspendido: sistema reciente que consiste en colocar las plantas en una cubeta o recipiente y las raíces quedan suspendidas. Se riega mediante una niebla de nutrientes y son menos propensas a contraer enfermedades debido a que no están en contacto con el terreno.

### 1.3 Tipos de invernaderos

Aunque los invernaderos se pueden clasificar de varias formas debido a los materiales de construcción, el rango de temperatura que logra mantener, por el tipo de cubierta entre otros, en la actualidad la forma más general de clasificarlos es por el modelo del invernadero, ver **Fig. 1.4**.



*Fig. 1.4 Diferentes tipos de invernaderos (NOVAGRIC, 2016)*

#### 1.2.1 Malla sombra o casa sombra

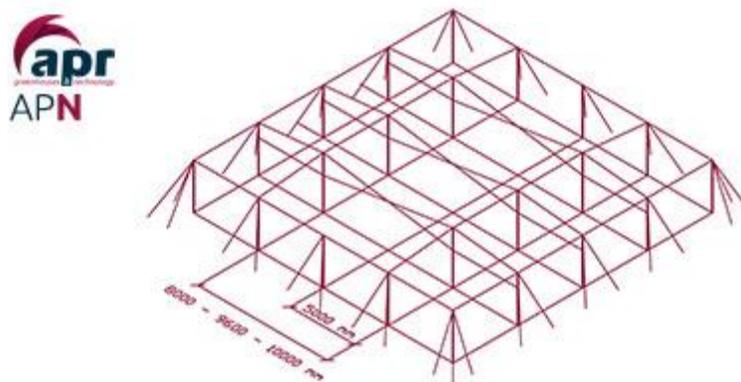
Es el invernadero más simple, más económico y de mayor facilidad de montaje ya que consta únicamente de tubos o perfiles para dar soporte a la estructura y de dos mallas de alambre superpuestas que sujetan la cubierta plástica, por lo que no se requiere de soldadura. Se adapta a cualquier terreno y permite una uniformidad luminosa en todo el invernadero.

Es resistente a vientos con velocidades mayores a los 86 kilómetros por hora y se recomienda para regiones de climas templados, los inconvenientes son que debido a su diseño no permite un buen

Análisis tecno-económico de un sistema de invernadero para cultivo de plantas ornamentales mediante el aprovechamiento de recurso geotérmico de baja entalpia

control del clima en su interior y puede llegar a acumular el agua de la lluvia generando bolsas de agua que terminan dañando la estructura.

Las dimensiones estándar son de 8 a 10 metros de ancho, 7 metros de alto y una distancia entre arcos internos de 8 a 10 metros y de 5 metros para los externos. Teniendo un costo aproximado de  $350 \frac{\$_{MXN}}{m^2}$  (Ramos Novelo, 2010), ver **Fig. 1.5**.



*Fig. 1.5 Invernadero tipo malla sombra (NOVAGRIC, 2016)*

### 1.2.2 Invernadero Raspa y Amagado

Éste es una modificación al tipo plano o malla sombra y son comunes en la región de Almería, España. La modificación consiste en que la parte alta o “raspa” se encuentra sostenido por tubos galvanizados o perfiles laminados y alambres, mientras que la parte baja o “amagado” está unido por horquillas de hierro a la base del invernadero.

Permite un mejor control del clima y cuenta con mayor capacidad de estanqueidad que los planos, además de permitir la instalación de ventanas cenitales.

Se utiliza para regiones de clima templado y presenta una alta resistencia a fuertes vientos.

Sus dimensiones estándar son de 8 a 9.6 metros de ancho, altura al cenit 7 metros y la separación entre arcos es de 8 a 10 metros en el interior y de 5 metros en el exterior, ver **Fig. 1.6**.

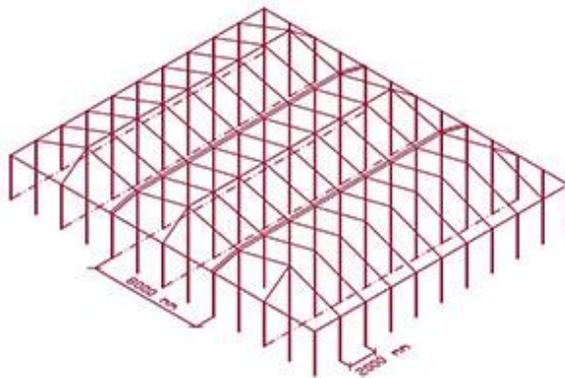


Fig. 1.6 Invernadero tipo Raspa y Amagado (NOVAGRIC, 2016)

### 1.2.3 Invernadero túnel

Éste es el segundo más económico, llegando a costar entre 375 y 380  $\frac{\$MXN}{m^2}$  (FIXR, 2018) y de estructura simple siendo la principal característica que lo diferencia del de casa sombra es su geometría completamente curva. Éste tampoco requiere de soldaduras y es de fácil transporte.

Debido a su diseño permite un mayor volumen de intercambios de renovación de aire, se logra un mejor control del clima además de que permite la instalación de equipos de climatización, instalación de ventanas y uso de maquinaria en su interior. Es favorable para cultivos pequeños, los cuales se practican en terrenos de máximo 200 metros cuadrados (de la Helguera y García, 2006).

Sus dimensiones estándar son de 8 a 9.60 metros de ancho, 4 a 5 metros de alto y una distancia entre arcos de 2.50 metros y de longitud variable ya que dependerá de las necesidades del productor, ver Fig. 1.7.

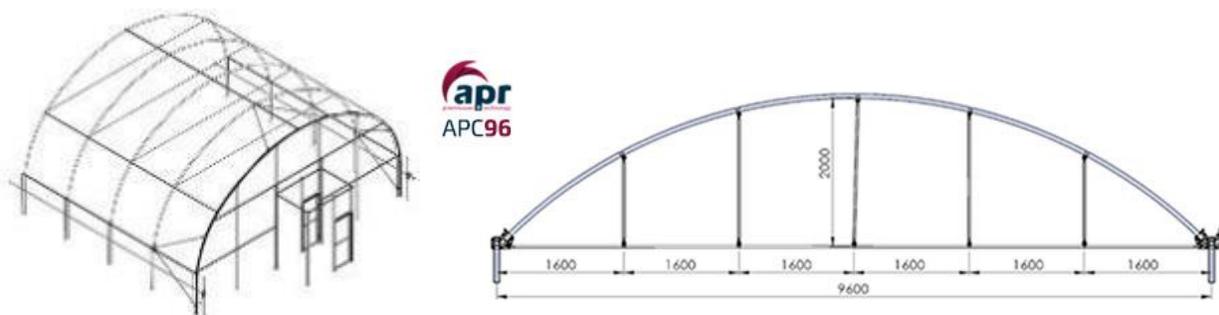


Fig. 1.7 Invernadero tipo túnel (IMA, 2020; NOVAGRIC, 2016)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dimensiones expresadas en metros

### 1.2.4 Invernadero multitúnel

En esta categoría, se consideran los invernaderos tipo: capilla, góticos y asimétricos, siendo la principal diferencia entre ellos su geometría. Su costo es de 1735  $\frac{\$MXN}{m^2}$  (FIXR, 2018), son de estructuras completamente metálicas y techos curvos. Se utilizan principalmente para cosechas más tecnificadas por su tamaño a comparación del tipo túnel y casa sombra.

#### 1.2.4.1 Invernadero capilla o multicapilla

Su principal característica es su diseño de arcos curvos semicirculares y por su estructura completamente metálica. Su ensamblaje es estilo Mecano, ya que se utilizan estructuras prefabricadas que cuentan con barrenos por los que se unen entre ellos mediante grapas, tuercas y tornillos, haciendo que sean fáciles de montar y no se requiere de soldadura.

Debido a que cuenta con una mayor altura, permite una mejor circulación del aire, mejorando la ventilación y debido a su geometría curva, permite una mejor distribución de la luminosidad en el interior del invernadero. Presenta pocos obstáculos en su estructura por lo que permite el uso de maquinaria en su interior y la instalación de ventanas cenitales y perimetrales que mejoran la circulación del aire externo hacia el invernadero y la instalación de ventiladores para mejorar las renovaciones de aire y control de la temperatura.

Se utiliza para regiones de climas templados y fríos, pero se puede adaptar a cualquier clima con ciertas modificaciones. Es resistente a vientos mayores a los 90 kilómetros por hora, cuenta con buena ventilación y debido a su configuración, evita la acumulación de lluvia en su estructura.

Sus dimensiones estándar son de 8 a 9.60 metros de ancho, altura bajo canal de 4 a 5.50 metros, altura al zenit de 5.80 a 6.80 metros y la separación entre pilares de 5 metros en el interior y de 2.50 metros en el exterior y de longitud variable con las especificaciones del cliente, ver **Fig. 1.8**.

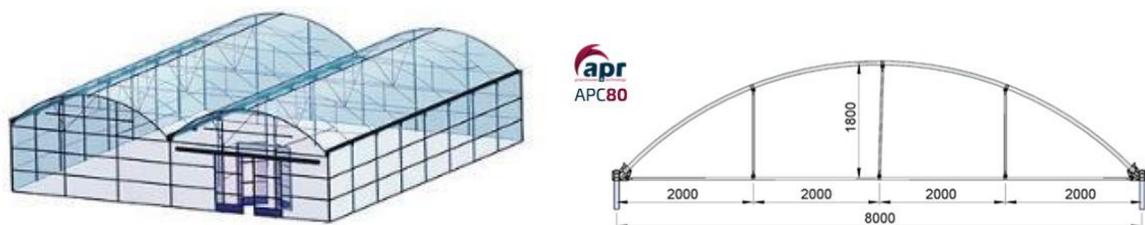


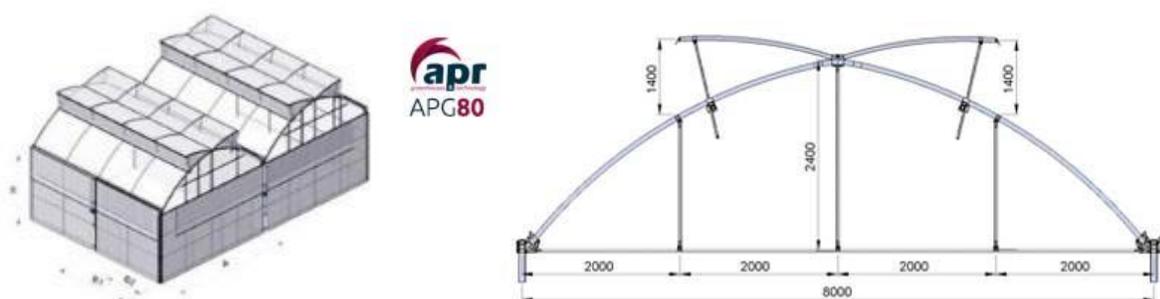
Fig. 1.8 Invernadero tipo capilla (NOVAGRIC, 2016)<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Dimensiones están expresadas en metros

#### 1.2.4.2 Invernadero gótico

Aunque su diseño es similar al de capilla, la diferencia es la de los arcos tipo ojival. Tiene una mayor ventilación debido a las ventanas cenitales plegables que se le puede instalar, como el que se muestra en la **Fig. 1.9**, mayor entrada de luz y facilidad de uso de maquinaria agrícola en el interior del invernadero.

Se emplea para climas extremos, templados y fríos, además de que permite todo tipo de cultivo, en especial los suspendidos e hidropónicos. Sus dimensiones estándar son de 8 a 9.60 metros de ancho, altura bajo canal de 4 a 5 metros, altura al zenit de 6 a 7.40 metros y la separación entre pilares de 5 metros en el interior y de 2.50 metros en el exterior.



*Fig. 1.9 Invernadero tipo gótico (NOVAGRIC, 2016)<sup>3</sup>*

#### 1.2.4.3 Invernadero asimétrico o tropical

Su nombre se debe a la geometría que presenta ya que uno de sus lados está más inclinado que el otro, esto se debe a que busca aprovechar la mayor cantidad de radiación solar, principalmente durante el invierno. La inclinación dependerá de la incidencia perpendicular que se tenga del sitio.

Cuenta con ventilación fija que se localiza en el centro de cada uno de los arcos que la compone, permite la instalación de ventanas cenitales orientadas de tal manera que protejan los cultivos de los vientos mayores a 90 kilómetros por hora y presenta buena estanqueidad de lluvia y aire.

Se utiliza para regiones de climas tropicales y debido a que es el de mayor dimensión de los multitúnel, permite una elevada inercia térmica debido a tener un mayor volumen de aire interno.

Sus dimensiones estándar son de 9.60 metros de ancho, altura bajo canal de 4 a 5 metros, altura del pilar es de 6.4 a 7.4 metros y la separación entre pilares de 4 a 5 metros en el interior y de 2 a 2.5 metros en el exterior, ver **Fig. 1.10**.

<sup>3</sup> Dimensiones expresadas en metros

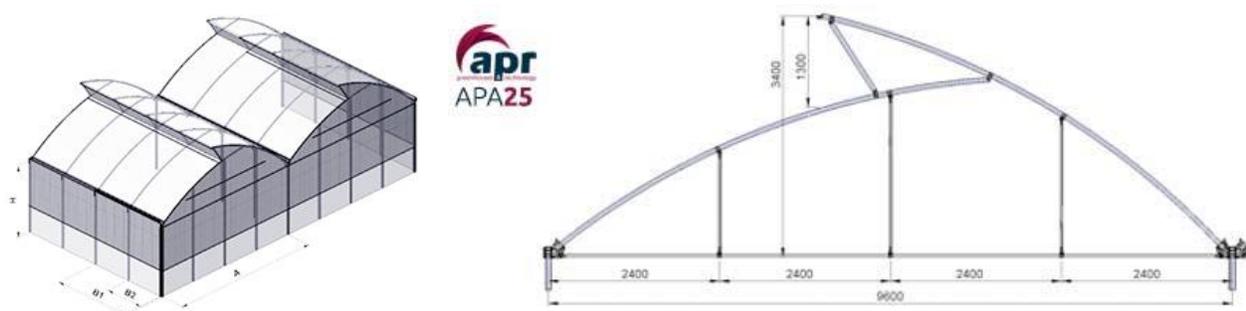


Fig. 1.10 Invernadero tipo asimétrico (NOVAGRIC, 2016)<sup>4</sup>

## 1.4 Climatización de invernaderos

Los invernaderos pueden mantener temperaturas desde 5 hasta 18 °C dependiendo del tipo de invernadero y del clima de la región. Pero en ocasiones necesitan equipos adicionales para mantener la temperatura. Vallejo y Asunción (2004), mencionan que la calefacción se empezó a utilizar hace 500 años, siendo utilizadas hogueras de carbón, estufas, calderas de agua caliente y carbón, siendo utilizadas actualmente gas natural como combustible para las calderas y energía geotérmica.

Los principales países que han aprovechado la energía geotérmica en uso anual son: Turquía, China, Países Bajos, Rusia y Hungría. De acuerdo con la World Geothermal Congress 2015 (WGC2015) a nivel mundial se tiene 1,163 hectáreas calentados por medio de la energía geotérmica con una capacidad instalada de 2,459 MWt, utilizándose 35,826 TJ/año en 32 países (Lund & Toth, 2020).

En promedio se requieren de 20 TJ/año/hectárea, siendo los vegetales como pepinos y jitomates, plantas ornamentales, árboles semilleros y cactus, algunos de los cultivos que se siembran en estos invernaderos. Entre los beneficios de los invernaderos climatizados son:

- Menor tiempo de crecimiento.
- Reducción de un 35% en costos de producción.
- Permite cultivar en región donde las condiciones climáticas no son las adecuadas
- Utiliza recurso geotérmico de baja temperatura, de 25 a 90 °C
- Mejor control de humedad.
- Requiere el uso de equipos simples.
- Permite tener cultivos anuales y no depender de la estación del año

<sup>4</sup> Dimensiones expresadas en metros

### 1.4.1 Sistemas de enfriamiento

La radiación solar es la principal fuente de calor del invernadero, debido a los materiales que se usan en su construcción; sea vidrio o plástico, parte de esta radiación se refleja al exterior, pero el resto es absorbido por las plantas para la fotosíntesis o se transforma en calor latente debido a la humedad que se genera debido a la transpiración de las plantas.

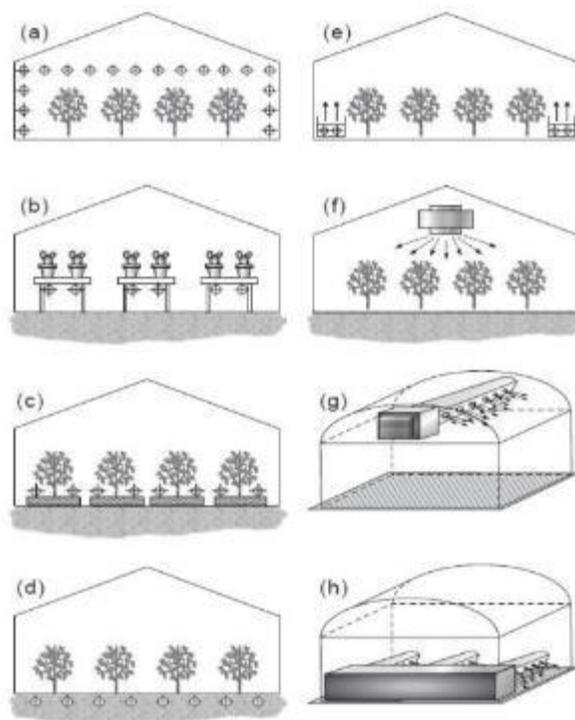
Para evitar que el invernadero alcance temperaturas que puedan dañar a las plantas, se utilizan diferentes métodos para controlar la temperatura, de acuerdo a La Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (2015), ASHRAE por sus siglas en inglés, estos son:

- Ventilación natural: se origina por diferencia de presiones debido al gradiente de temperatura y al viento. Se ha utilizado con los invernaderos más antiguos, se logra con la instalación de ventanas laterales y con techos retráctiles.
- Ventilación mecánica: se logra con el uso de ventiladores instalados en las paredes laterales o al final de ellas, empujando el aire hacia las ventanas que se encuentran en la pared opuesta del ventilador. La velocidad no debe de superar los 2 m/s para evitar daños a las plantas.
- Sombreo: se puede lograr que la temperatura disminuya con el uso de materiales plásticos, poroso o con tejidos instalados en los techos o en las canelatas de los invernaderos. La capacidad de sombreado dependerá del material siendo los más recomendables, los materiales de color blanco a diferencia del color negro y verde, ya que reduce la ganancia de temperatura de un 50 a 100%.
- Sistemas de aire lavado o evaporativos: se instalan de la misma manera que en la ventilación mecánica. Estos equipos toman aire caliente del exterior el cual circula por paneles con filtros que humidifican el aire reduciendo su temperatura, llegando a enfriar el aire entre 1.5 y 2 °C sobre la temperatura de bulbo húmedo. Se deben de instalar con una separación de 7.5 metros entre los ventiladores.
- Nebulización: se utilizan bombas que presurizan el agua de 5.5 a 7 MPa y expulsan hacia boquillas que generan gotas de 35  $\mu\text{m}$  o menos. La neblina que se forma son gotas de agua con diámetros menores a los 40  $\mu\text{m}$ , éstos deben de estar instalados de tal manera que cubran todo el invernadero y en caso de usar un sistema de ventilación mecánica, deben de estar instalados a la entrada y unos cuantos distribuidos en el invernadero.

### 1.4.2 Sistemas de calefacción

Existen dos formas principales para la climatización de los invernaderos, la primera es de manera directa con tuberías de plástico instaladas en el suelo y regulación manual por medio de válvulas, y la segunda con equipos sofisticados y automatizados para la regulación del calor suministrado. Para estas dos formas existen diferentes configuraciones para la climatización como se muestra en la **Fig. 1.11**, estas son:

- Calefacción del suelo: su principal objetivo es el calentar el sistema radical de las plantas. Se utiliza para cubrir solo una parte de la demanda total y utilizar en conjunto con otros sistemas.
- Calefacción suelo-aire: son instalaciones colocadas al ras del piso con el propósito de calentar el aire y la parte superior del piso. Se utiliza para cubrir la demanda total o la demanda base del invernadero.
- Calefacción mediante tuberías aéreas: consiste en tuberías metálicas colocadas arriba del piso. La principal ventaja es que permiten una regulación rápida y precisa de la temperatura, el inconveniente es que afectan la difusión de la luz por las extensiones que se deben de cubrir.
- Calentador convector asistido por ventiladores: mejora la transferencia de calor con ayuda del ventilador llevando el aire caliente a todo el invernadero.
- Otros: depende de las soluciones particulares de cada productor, en Grecia se ha utilizados intercambiadores de calor aire-agua o con evaporadores.



*Fig. 1.11 Arreglos para la climatización de invernaderos: (a) calentamiento por tuberías aéreas; (b) calentamiento de banco; (c) tubos de calentamiento de posición baja para calentamiento aéreo; (d) calentamiento del suelo. (e) Instalaciones de calefacción con movimiento de aire forzado en posición lateral; (f) ventilador aéreo; (g) conductos de alta posición; (h) conductos de baja posición (Dickson & Fanelli, 2003)*

## 1.5 Fuentes de energía para la calefacción

Para calentar el invernadero, ASHRAE propone diferentes métodos, estos son:

- Sistema de calefacción por agua caliente: equipos que utilizan biocombustibles o combustibles fósiles para calentar agua que circula por tuberías. La transferencia de calor se debe por efectos de radiación.
- Intercambiador de calor: la fuente de calor le cede energía al fluido de trabajo, sea aire o agua, con el cual calentará el invernadero. En caso de usar agua, se debe de instalar un sistema de tuberías, y para el caso de aire, se inyecta al invernadero por medio de ventiladores que puede estar en el techo o en paredes del invernadero.
- Sistemas de cogeneración: se aprovecha tanto el calor remanente como la energía eléctrica que se genera de plantas de generación eléctrica. Se debe considerar un equipo de respaldo en caso de no contar con un suministro de energía continuo.
- Fuentes alternas: se utiliza energía solar pasiva que son elementos de construcción como paredes, suelos, etc. Deben de ser al menos la mitad del volumen del invernadero para cubrir los requerimientos. Otra fuente de energía es el uso de energía geotérmica ya sea con el uso de intercambiadores de calor o de manera directa con un sistema de tuberías.

### 1.5.1 Energía geotérmica

La energía geotérmica se puede definir de una manera muy sencilla: “el calor contenido dentro de la Tierra”, ya que proviene del griego “geos” y “thermos”, los cuales significan tierra y calor respectivamente.

Según Dickson & Fanelli (2003), la energía geotérmica no solo es el calor almacenado en la Tierra, también es la que genera fenómenos geológicos a escala planetaria. Estos fenómenos pueden ser: los movimientos de las placas tectónicas, erupciones volcánicas, hidrotermalismo, etc.

Una definición más reciente y que será utilizada para el desarrollo de esta tesis es la que mencionan Dickson & Fanelli (2003): “La energía geotérmica es la cantidad de calor de la Tierra que puede ser aprovechado y explotado por el ser humano”.

Para entender cómo se puede aprovechar el calor dentro de la Tierra, se debe de conocer la estructura interna de la Tierra.

Una forma de explicar la estructura interna de la Tierra es dividiéndola en tres zonas concéntricas, como se muestra en la **Fig. 1.12**:

- Corteza: la analogía más común es de la cáscara de una manzana. Llega a tener una profundidad de 10 kilómetros en las zonas oceánicas, y de 30 kilómetros en los continentes. La temperatura promedio es de 15 a 20 °C en la superficie, hasta una temperatura de 1,000 °C

en la zona de contacto con el manto. La corteza y la parte sólida del manto forman la litósfera, que se encuentra dividida en varias placas litosféricas que están en constante movimiento.

- Manto: Es la capa que envuelve al núcleo. Empieza donde termina la corteza hasta una profundidad de 2,900 kilómetros. Tiene temperaturas entre 1,000 y 3,000 °C. De textura plástica hacia el centro, volviéndose sólido hacia la superficie.
- Núcleo: compuesta principalmente de hierro y níquel y se divide en dos;
  - Núcleo externo: se encuentra en estado líquido. Se encuentra a una profundidad de 2,900-5,200 kilómetros debajo de la corteza y con temperaturas de 3,500 °C.
  - Núcleo interno: se encuentra en estado sólido. Se encuentra a una profundidad de 5,200-6,370 kilómetros y con temperaturas de 4,200 °C.

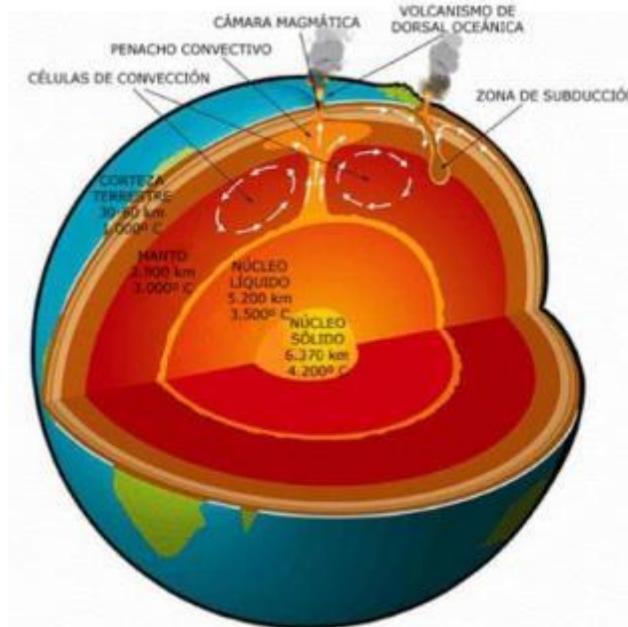


Fig. 1.12 Estructura de la Tierra en zonas concéntricas (LLopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008)

### 1.5.2 Origen del calor interno

Se consideran cuatro fenómenos que dieron origen a este calor:

- Calor inicial: liberado durante la formación de la Tierra hace aproximadamente 4,500 millones de años y que sigue liberándose hacia la superficie.
- Desintegración de isótopos radiactivos: siendo el uranio 235 y 238, torio 232 y potasio 40 que se encuentran en la corteza y el manto.
- Movimiento diferencial entre las capas de la Tierra. En especial entre el manto y la corteza.
- Cristalización del núcleo: entre el núcleo externo y el interno de manera continua y liberando calor en el proceso.

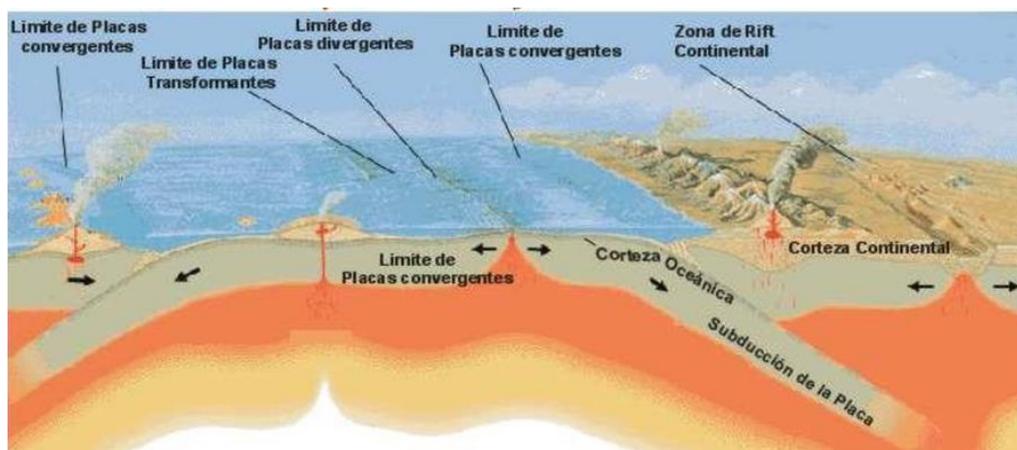
### 1.5.3 Gradiente geotérmico

El calor se transmite desde el núcleo y manto hacia la corteza para disiparse en la atmósfera. Este flujo de calor generado se puede comprobar al realizar perforaciones de baja profundidad ya que aumenta la temperatura con la profundidad. Llopis Trillo y Rodrigo Angulo (2008, p.18) reportan que este gradiente geotérmico tiene un valor promedio de 2-5 °C y cuando se tienen valores mayores a 5°C/100 m, se le considera como zona de alto potencial geotérmico.

### 1.5.4 Tectónica de placas

Estas zonas de alto potencial geotérmico se encuentran en los límites de las placas litosféricas, ver **Fig.1.13**, los cuales se dividen en:

- Zonas de divergencia: se separan las placas, permitiendo que el magma asciende y forme una capa en litósfera.
- Zonas de convergencia o subducción: una placa se introduce bajo otra, siendo absorbida la placa con mayor densidad.
- Zonas de fractura: o de falla, donde dos placas que se deslizan una con otra sin crearse o destruirse la litósfera.



*Fig. 1.13 Esquema del proceso de la tectónica de placas (Íbid, pp.29)*

Debido a esto, las zonas de alta actividad volcánica y sísmica son las regiones con mayor potencial geotérmico. Un ejemplo es alrededor de la cuenca del océano Pacífico conocido Cinturón de Fuego. Esta zona comprende al oeste de América y al este de Asia y Oceanía, ver **Fig. 1.14**.

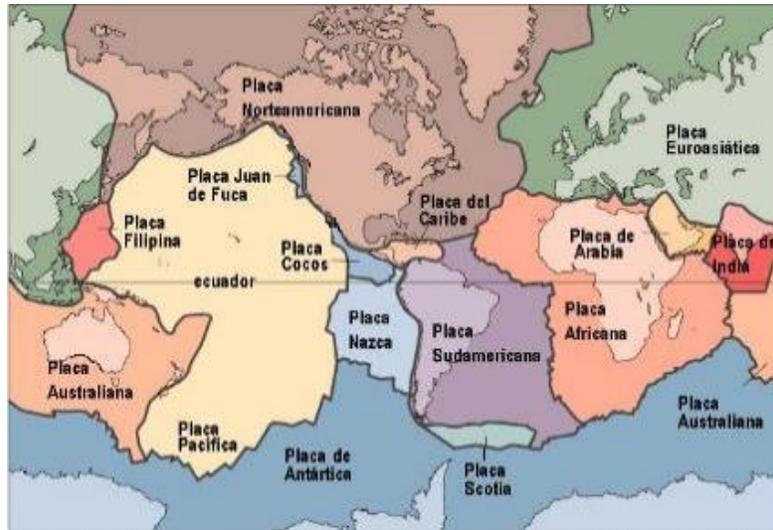


Fig. 1.14 Mapa de las placas tectónicas (Íbid, pp.29)

Las zonas de alto potencial geotérmico se encuentran en la corteza de la Tierra, en zonas específicas donde el flujo de calor es mayor que en sus alrededores.

Los más comunes y explotados son los sistemas hidrotermales que están compuestos por los siguientes elementos, ver **Fig. 1.15**:

- Fuente de calor: suele ser una intrusión magmática que se encuentra en proceso de enfriamiento y liberando su calor hacia el exterior.
- Acuífero: consiste en roca permeable la cual contiene un cuerpo de agua que será el medio de transporte para el calor suministrado.
- Capa sello: consiste en roca impermeable que evita las fugas del acuífero y presuriza el sistema. Las zonas que se pueden aprovechar son conocidos como yacimientos geotérmicos.
- Zona de recarga: consiste en roca permeable que se conecta al acuífero mediante fracturas y fisuras, permitiendo un flujo constante de agua caliente.

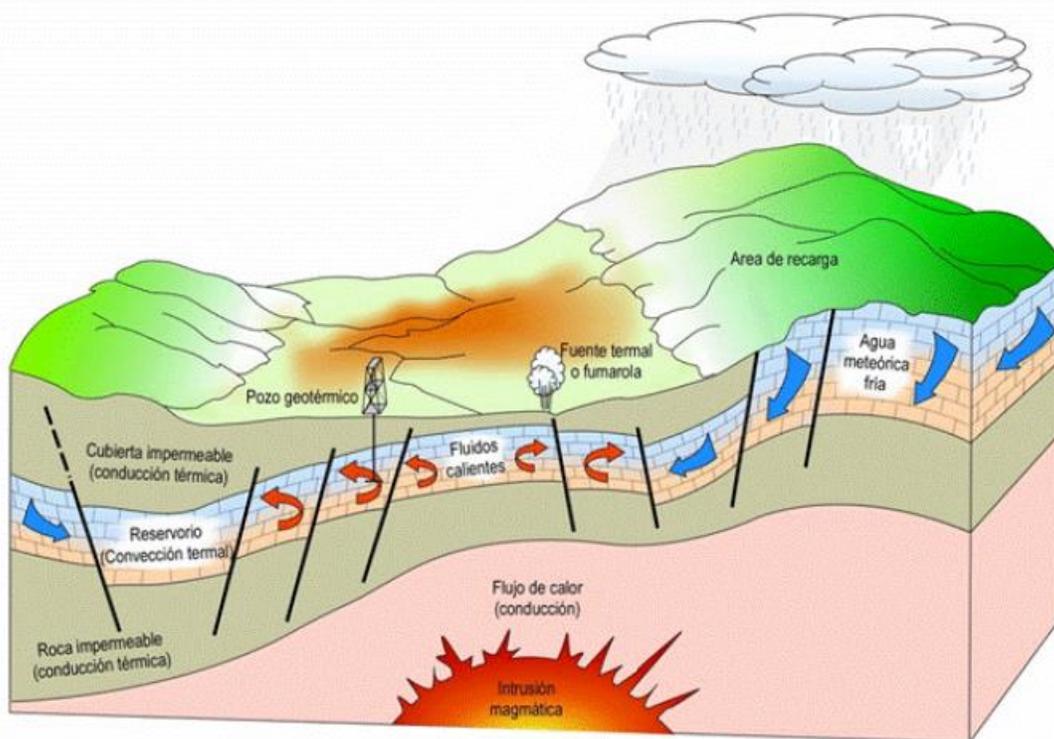


Fig. 1.15 Esquema de un sistema hidrotermal (Íbid, pp.29)

Este estudio se basará en la clasificación de Llopis Trillo y Rodrigo Angulo (Íbid, pp.46-51):

- Muy baja temperatura: recursos que se tiene temperaturas menores a los 30 °C. Se utilizan para la climatización mediante el uso de bombas de calor.
- Baja temperatura: recursos con temperaturas entre los 30 y 90 °C. Se utilizan principalmente para los usos directos, que son los procesos que aprovechan el calor de manera directa.
- Media temperatura: tiene valores entre 90 y 150 °C. Se utilizan principalmente para la producción indirecta de energía eléctrica o ciclos orgánicos.
- Alta temperatura: son los recursos con temperaturas mayores a los 150 °C. Son los que se utilizan para la producción directa de energía eléctrica.

### 1.5.5 Beneficios de un invernadero geotérmico

La principal ventaja de utilizar energía geotérmica para la climatización de invernaderos es debido a que se requiere de calentar de manera constante los invernaderos, estos pueden variar la cantidad de horas que se requiere climatizar. Por ejemplo, como se había mencionado antes, en Kenia se calienta por 5 horas seguidas. La Asociación Canadiense de Energía Geotérmica, CanGEA por sus siglas en inglés, reporta que el costo total por calefacción es entre el 5 y 15 % del costo total de producción, en

la **Tabla 1.1** se aprecia una comparación del costo de diferentes formas de calentar un invernadero en Estados Unidos.

*Tabla 1.1 Comparación de diferentes fuentes de energía para la climatización de invernaderos (CanGEA, 2014)*

Aplicación	Costo Unitario centavos/kWh	Costo Unitario centavos/kWh	Costo Unitario centavos/kWh	Costo Unitario centavos/kWh
	Geotermia	Gas Natural	Diesel	Eléctrico
Climatización de invernaderos	0.71	0.70	0.72	0.75

Aunque el uso de gas natural es el más económico, al ser combustible fósil tendrá un mayor impacto ambiental en comparación con la energía geotérmica para la climatización de los invernaderos. Se realizará un análisis en la inversión en el capítulo 4 comparando el uso de de estas dos fuentes de energía para conocer cuál es la más económicamente atractiva. Una ventaja es el aprovechamiento del recurso remanente del fluido geotérmico ya sea por la generación de energía eléctrica o mediante usos en cascada; los usos en cascada son el aprovechamiento del fluido geotérmico que es utilizado para diferentes procesos con diferentes valores de temperatura como el que se muestra en la **Fig. 1.16**, esto mejora el rendimiento del recurso, aumenta el factor de carga y se reduce el periodo de recuperación de la inversión. La desventaja es que, dependiendo de las concentraciones minerales del agua, podrá afectar en el rendimiento de los equipos.

Análisis tecno-económico de un sistema de invernadero para cultivo de plantas ornamentales mediante el aprovechamiento de recurso geotérmico de baja entalpia

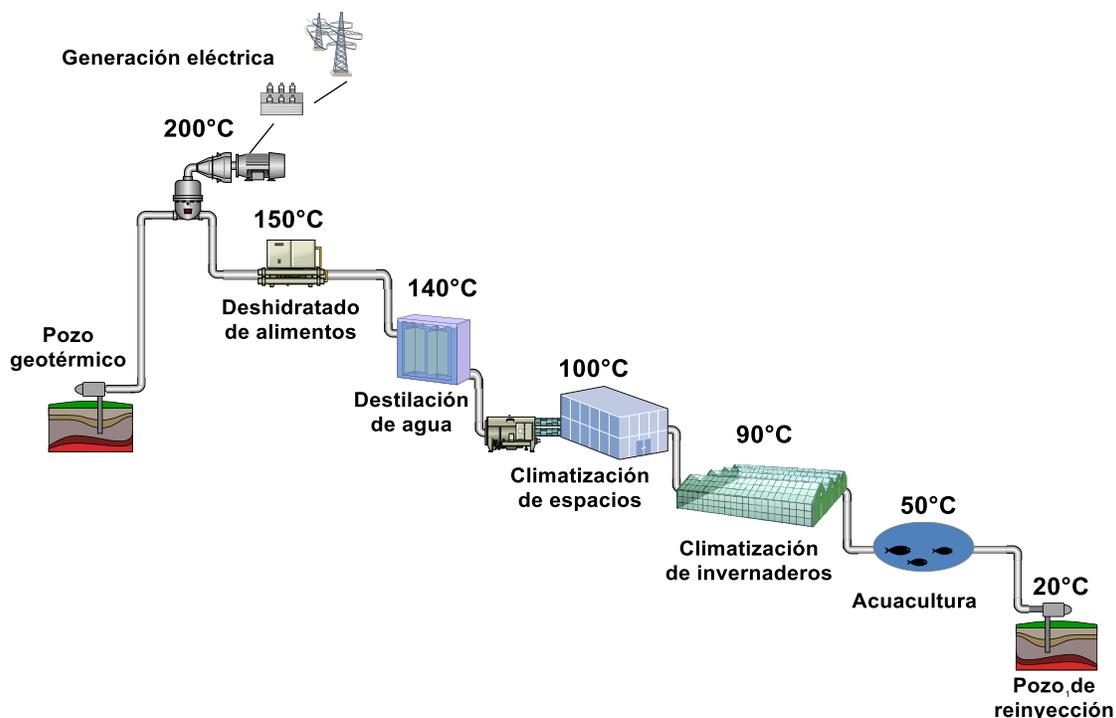


Fig. 1.16 Diagrama de usos en cascada

Otro factor importante es que se puede generar más empleos, mayor ingreso de capital y menor tiempo de recuperación de la inversión al realizar proyectos de usos en cascada. En la **Tabla 1.2** se compara una planta de geo termoelectrica y un proyecto en cascada donde se aprovecha el remanente para la climatización de un invernadero. A pesar de requerir una inversión mayor, se obtienen mayores ganancias y el tiempo de retorno se reduce a un tercio del tiempo original:

Tabla 1.2 Comparación de una planta geo termoelectrica e invernadero geotérmico (CanGEA, 2014)<sup>5</sup>

	Planta de generación	Invernadero
Flujo requerido	44 l/s	44 l/s
Tamaño	250 kWe	24 ha
Capital requerido	\$ 1.00 millón	\$ 30.00 millón
Ingreso bruto anual	\$ 0.14 millón	\$ 18.2 millón
Ingreso neto anual	\$ 0.11 millón	\$ 9.1 millón
Empleados	1	144
Tiempo de retorno	9.1 años	3.4 años

<sup>5</sup> Las unidades se encuentran expresadas en dólares americanos

### 1.5.6 Otras aplicaciones del calor geotérmico

La energía geotérmica no solo se utiliza para la generación eléctrica o la climatización de invernaderos, también se puede aprovechar para diferentes aplicaciones industriales, esto se puede apreciar de manera esquemática con el diagrama de Lindal, ver Fig. 1.17.

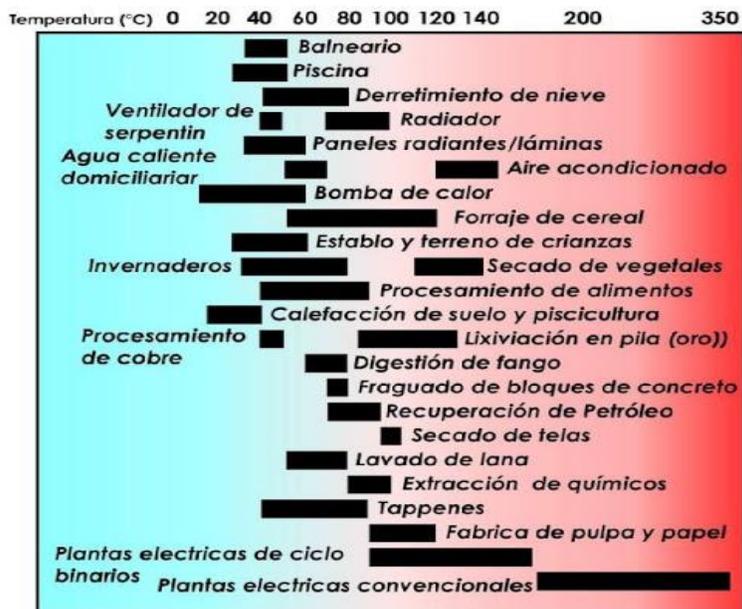


Fig. 1.17 Diagrama de Lindal (CemieGeo, 2016)

Algunos de los usos directos son los siguientes, ver Fig.1.18:

- Natación, baños y balneología  
La climatización de piscinas y balnearios para uso recreativos y deportivos y para las aguas termales con fines recreacionales y medicinales.
- Calefacción de edificios y producción de agua sanitaria  
Mediante el empleo de bombas de calor y sistemas de tuberías que transportan el agua caliente para proporcionar la calefacción y agua sanitaria que se requiera.
- Acuicultura y crianza de animales  
Un factor que influye en el crecimiento de animales, en especial de especies acuáticas, es la temperatura de su entorno. Al mantener temperaturas constantes, los animales aumentarán de tamaño y mejora la propagación de las especies.
- Secado de alimentos y madera  
Ha ido aumentando el uso del calor geotérmico para el secado de productos agrícolas, carnes, pescados y maderas. Se realiza por medio de aire que es calentando por medio del agua geotérmica utilizando un intercambiador calor de placas.

- Otras aplicaciones

Existen una gran cantidad de usos en la industria además de los antes mencionados, entre ellos está la manipulación de la pasta celulosa en la industria del papel, envasado y conservas de alimentos, y la obtención de minerales y disoluciones para la industria química entre otras.



*Fig. 1. 18 Usos directos de la energía geotérmica: a) Climatización de piscinas, b) Climatización de edificios, c) Deshielo de pisos, d) Procesado de madera, e) Crianza de caimanes en California, f) Climatización de invernaderos (Ibid, pp. 132-145)*

## 1.6 Geotermia en México

México es un país que se encuentra en una zona donde interaccionan 5 placas tectónicas: norteamericana, Cocos, Pacífico, Rivera y del Caribe, haciéndola propensa a actividades sísmicas, también es un país con gran potencial geotérmico. Cacho Carranza (2018), menciona que en el país se tiene un potencial 13.4 GWe, pero de este potencial solo se aprovecha menos del uno por ciento.

Para el año 2017, se reportó que en México se produjeron 6,041 Gigawatts por hora (GWh) (Íbid, pp. 36) de energía eléctrica mediante el uso de energía geotérmica, lo cual representa solo un 1.84% de la energía eléctrica total suministrada al país, siendo los 5 principales estados: Baja California con 3,943.26 GWh, Michoacán con 1565.68 GWh, Puebla con 462.1 GWh, Baja California Sur 50.02 GWh y Nayarit con 5.88 GWh. Una ventaja del país es el contar con varias anomalías geotérmicas, especialmente de baja y media entalpia (Santoyo & Barragán Reyes, 2010), **ver Fig. 1.19.**



Fig. 1.19 Recurso geotérmico en México (Santoyo & Barragán Reyes, 2010)

### 1.6.1 Usos directos en México

Gutiérrez Negrín, Maya González y Quijano León (2015), reportan a la balneología como la principal aplicación de la geotermia en México, sin contar a la generación de energía eléctrica. Reportan que la CFE han empezado a aprovechar los usos directos en el campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán con una capacidad total 3.174 MW<sub>T</sub>. Se aprecia que de los cinco campos geotérmicos que cuenta México para la generación de energía eléctrica; Cerro Prieto, Los Azufres, Los Humeros, Las Tres Virgenes y Domo de San Pedro, solo uno se está aprovechando para la aplicación de los usos en cascada, ya que Gutiérrez Negrín et al. reportan que de su capacidad instalada de 194 MW<sub>e</sub> solo se tiene una capacidad instalada de 0.47 MW<sub>T</sub>, una capacidad menor a la máxima que podrían llegar.

En la **Tabla 1.3** reportan las diferentes capacidades instaladas y usos anuales en todo México con diferentes proyectos de usos directos de la geotermia:

*Tabla 1.3 Usos directos en México (Gutiérrez Negrín, Maya González, & Quijano León, 2020)*

Aplicación	Capacidad instalada (MWt)	Uso anual de energía (TJ/año)	Factor de capacidad
Calefacción de espacios individuales	0.115	3.627	1
Secado de alimentos	0.518	13.23	0.810
Balneología y balnearios	155.347	4,166.512	0.850
TOTAL	155.981	4,183.37	0.850

## 1.7 Casos de éxito

Un caso de éxito es de la compañía Oserian, en el gran Valle del Rift en Kenia. En esta zona de potencial geotérmico se tienen 50 hectáreas cubiertas con invernaderos plásticos donde se siembran rosas de tallo largo. Este proyecto inició de manera conjunta por Land O'Lakes International Development y Winrock International, a petición de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional y por la Compañía de Desarrollo Geotérmico de Kenia, USAID y GDC por sus siglas en inglés respectivamente. Land O'Lakes International Development y Winrock International (2013), reportan que el mercado principal para las ventas al mayoreo de este proyecto, son los mercados de Ámsterdam y la exportación de tallos a Japón y Estados Unidos. Mencionan que los invernaderos son calentados de 2 AM a 7 AM, además de contar con dos plantas de generación eléctrica, 1.5 y 2.0 MWe, que suministran electricidad a los invernaderos para su funcionamiento. Se aprovecha el CO<sub>2</sub> del fluido geotérmico para enriquecer a las rosas del invernadero. Gracias a esto, se ha logrado el empaquetamiento y envío de aproximadamente un millón de tallos al día.

Otro ejemplo es el que reporta CanGEA (2014, p.12) en el Monte Amiata, Italia mediante los usos en cascada. En esta región son calentadas 22 hectáreas con el agua geotérmica residual de una planta de generación de 15 MWe. Se tienen 2,000 ton/ha a 86 °C para cosechar flores y vegetales, permitiendo la generación de empleo para 300 personas y 500 para los periodos de mayor demanda.

En el caso de México, no se tienen invernaderos climatizados para la exportación de productos, pero se ha mostrado el interés de aprovechar la energía geotérmica para esta aplicación. Es por ello que la Universidad Politécnica de Baja California, con apoyo por parte de CeMIE-Geo, la Sener y el Conacyt realizaron un invernadero prototipo con el fin de demostrar cómo se puede aprovechar esta energía. Se trata de un invernadero de mil 100 metros cuadrados, siendo 200 metros cuadrados climatizados con energía geotérmica. Se cosecha jitomate y pepino en la región de Ensenada, Baja California, región donde se llegan a tener temperaturas de hasta 50 y cerca de 0 °C en verano e invierno respectivamente. Lograron satisfacer las necesidades del cultivo mediante el empleo de bombas de

calor, incluyendo el mantener 25 °C dentro del invernadero en condiciones de helada, ya que, sin contar con la climatización, solo se tenían las condiciones idóneas en 2 horas del día, poniendo en peligro la cosecha. Las principales ventajas obtenidas con este invernadero prototipo es:

- Reducción de 90 a 45 días en el periodo de desarrollo.
- Elevó la productividad un 40%.
- Las plantas crecieron un metro y medio más.
- Número de frutos fue de 30 a 40% mayor.
- El peso de los frutos fue mayor.
- Las bombas de calor empleadas cuentan con un coeficiente de desempeño de 4, es decir, que por cada kilowatt eléctrico que se suministra al compresor, se producen 4 kilowatts térmicos en el condensador.

## Conclusiones

De la temática que se abordan en este capítulo, se pueden llegar a sintetizar los siguientes puntos:

- Los parámetros que se deben de cuidar en un invernadero dependen de las condiciones ambientales de las zonas donde se instalarán. Debido a esto, se requieren de equipos de calefacción cuando las bajas temperaturas, asociadas a heladas, afectan a los cultivos, como es el caso de las regiones que presentan heladas en invierno.
- Se puede climatizar un invernadero mediante el uso de combustibles fósiles y tener costos de operación menores que otras fuentes de energía, pero como en la actualidad se tiene una mayor preocupación con los efectos al medio ambiente, se deben considerar fuentes alternas de energía más amigables con el ambiente.
- Se muestra un gran interés con el uso de la energía geotérmica, ya que es una fuente natural y, de administrarse de manera correcta, un recurso renovable. Además de tener el beneficio de estar disponible las 24 horas del día, los 7 días de la semana a diferencia de la energía solar que, dependiendo de la estación y la región, será la cantidad de horas de sol disponibles.
- México cuenta con un gran potencial para la aplicación de los usos directos de la energía geotérmica, ya que solo se utiliza menos del 1%. Se puede aprovechar la infraestructura existente de generación eléctrica mediante la geotermia, o considerar en proyectos a futuro los usos en cascada, ya sea de una planta generadora o de manera directa en proyectos de aprovechamiento del calor geotérmico, para una recuperación más rápida de la inversión y mayor generación de empleos.

## Capítulo 2 Selección del sitio y del cultivo

En este capítulo se revisará el papel de la agricultura en México, al igual que la selección del sitio de estudio, el cual deberá ser una zona con potencial geotérmico y estudiar sus características geográficas: clima, recursos naturales, principal actividad económica. Se escogerá un cultivo que tenga alto valor agregado para que el producto sea comercializado en el mercado nacional como en el internacional.

### 2.1 Agricultura en México

La agricultura es una de las actividades de mayor importancia para el sector primario en México. El Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (2019), CEDRSSA por siglas, reportan que para el segundo trimestre del 2019 el sector primario, dedicado a la agricultura ganadería, pesca y aprovechamiento forestal, aportó un 3.7% al producto interno bruto (PIB) nacional, siendo la agricultura la de mayor aporte con un 64.6%, equivalente a 555,717 millones de pesos mexicanos.

Además de ser la principal fuente de empleo para este sector, ya que genera trabajo a más de 6 millones de personas, equivale al 85% de empleos para el sector primario de acuerdo a lo reportado por Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2018)

#### 2.1.1 Agricultura protegida en México

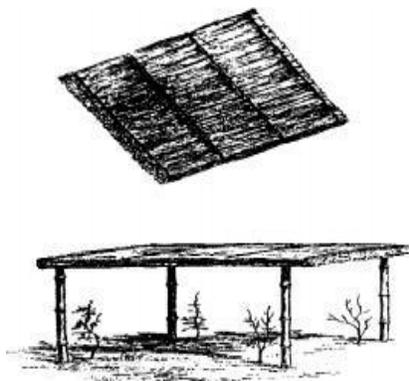
La agricultura protegida siendo toda aquella actividad agrícola que se practica bajo estructuras con el fin de evitar daños al desarrollo de los cultivos debido a las condiciones ambientales se ha practicado en varios países a lo largo de la historia como se ha mencionado anteriormente. Aunque se ha practicado más en los países al norte de Europa, se tienen dos métodos originarios de México reportados por Bastida Tapia (2017):

- Chinampas o *chinamitl* que significa “sobre setos o cerca de cañas”, son balsas fabricadas de troncos y varas en las que se deposita tierra vegetal con materia orgánica y se le sembraba un sauce con el fin de que, por capilaridad, el agua subiera hasta los diferentes cultivos que se sembraran como maíz, frijol, amaranto, calabazas, etc. Ver **Fig. 2.1**.



*Fig. 2.1 Ilustración de una chinampa (Iglesias y Cabrera, 2014)*

- Tochimales: estructuras simples que tenían la finalidad de proteger los cultivos durante las noches y heladas. Eran estructuras simples de 80 centímetros por lado y 10 de espesor, constaban de cuatro trozos de carrizo que servían de pilares y de una tapa hecha de carrizo y tules, o de césped. **Fig. 2.2.**



*Fig. 2.2 Ilustración de un tochimal (Bastida Tapia, 2017)*

En Bastida Tapia (2017) se enlistan 9 factores por los cuales se debe de impulsar la aplicación de la agricultura protegida en México:

1. Diversidad climática que se tiene en el país.
2. Cercanía que se tiene con Estados Unidos y Canadá.
3. Bajos costos de mano de obra
4. Costos de producción son de 20 a 30 % más bajos que en Estados Unidos y Canadá y bajos costos de renta de la tierra.
5. Menor consumo energético de combustibles a diferencia de los países nórdicos.
6. Facilidad de comunicación vial en la frontera con EE.UU.
7. Apoyos gubernamentales para el desarrollo de la agricultura protegida.
8. El cambio climático y calentamiento global afectan a la agricultura convencional.

9. La combinación de agricultura orgánica y estructuras de protección generan alimentos más sanos.

Un ejemplo de que se obtiene un mayor rendimiento con la agricultura protegida a diferencia de la convencional se obtuvo a través de estudio de SAGARPA (2009), en el que se comparó el rendimiento de toneladas por hectárea en la cosecha de jitomate. Para la agricultura convencional se obtuvieron 40 ton/ha, cultivo a cielo abierto con fertirrigación 120 ton/ha, invernadero de tecnología media y fertirrigación 200 ton/ha, invernadero de tecnología media y mejora de sustrato 250 ton/ha y para un invernadero de alta tecnología 600 ton/ha. Se puede observar que se tiene un rendimiento de 5 a 15 veces mayor con invernaderos que a cielo abierto.

En 2016 se contaba con aproximadamente unas 25,000 ha de cultivos protegidos (Bastida Tapia, 2017; SIAP, 2019), habiendo iniciado en los años 70s con solo 100 ha como se muestra en la Tabla 2.1. En la Tabla 2.2 se muestra la superficie cubierta en los diferentes estados del país para el año 2018.

*Tabla 2.1 Superficie dedicada a la agricultura protegida (Íbid, pp.281)*

Año	Superficie (HA)	Fuente
1970	100.00	SAGARPA, 2010
1980	300.00	AMHPAC, 2008; citado por SAGARPA, 2009
1999	721.00	
2005	3,214.00	
2008	9,948.00	
2009	15,000.00	AMHPAC, 2009
2012	20,000.00	SAGARPA, 2012
2013	22,508.53	SAGARPA, citado por AMHPAC, 2013
2015	23,251.00	SIAP/SAGARPA, 2015
2016	25,000.00	SIAP/SAGARPA, 2016
2017	42,515.00	SIAP/SAGARPA, 2017
2018	50,908.70	SIAP/SAGARPA, 2018

*Tabla 2.2 Superficie cubiertas en México (SIAP, 2019)*

	Entidad	Superficie	
		(ha)	
		Sembrada	Cosechada
1	Aguascalientes	212.03	212.03
2	Baja California	2,165.18	2,144.18
3	Baja California Sur	1,414.00	1,414.00
4	Coahuila	5,419.30	3,449.30
5	Colima	166.1	166.1
6	Chiapas	188.4	188.4
7	Chihuahua	67.62	67.62
8	Ciudad de México	148.89	148.89
9	Durango	197.73	197.73
10	Guanajuato	1,883.03	1,840.03
11	Guerrero	121.15	121.15
12	Hidalgo	393.38	393.38
13	Jalisco	8,988.23	8,967.23
14	México	2,328.73	2,155.73
15	Michoacán	6,741.70	6,691.70
16	Morelos	746	746
17	Nayarit	103.5	103.5
18	Nuevo León	161.45	160.2
19	Oaxaca	533.57	533.57
20	Puebla	1,227.87	1,227.87
21	Querétaro	369	368
22	Quintana Roo	100.11	100.11
23	San Luis Potosí	2,356.52	2,327.52
24	Sinaloa	9,745.39	9,745.39
25	Sonora	4,461.60	4,461.60
26	Tamaulipas	131.60	131.60
27	Tlaxcala	27.00	27.00
28	Veracruz	33.00	33.00
29	Yucatán	36.17	35.27
30	Zacatecas	440.45	440.45
	Total	50,908.7	48,598.6

Internacionalmente, en el 2016 México ocupa el séptimo lugar con mayor superficie protegida (Bastida Tapia, 2017; SIAP, 2019) como se muestra en la **Tabla 2.3**.

*Tabla 2.3 Países con mayor superficie dedicada a la agricultura protegida (Íbid, pp.287)*

Lugar	País	Superficie (HA)
1	China	3,300,000
2	Corea del sur	89,541
3	Japón	87,886
4	Turquía	61,776
5	España	45,200
6	Italia	38,910
7	México	25,000
8	Francia	11,190
9	Holanda	9,330
10	Estados Unidos	8,425

## 2.2 Región de estudio

La zona propuesta para la construcción del invernadero es en San Pedro Lagunillas, Nayarit, en la central geotérmica del Domo de San Pedro, ver **Fig. 2.3**. Esto se debe a que en Nayarit ya se ha ido explotando la geotermia para la generación de energía eléctrica por medio de Grupo Dragón, además el grupo iiDEA y el Instituto de Ingeniería de la UNAM tiene convenios con esta empresa, quienes han mostrado interés por proyectos de usos directos de la geotermia, principalmente mediante el aprovechamiento de salmuera de baja y media entalpia, como deshidratadores de alimento y climatización de invernaderos.



Fig. 2.3 Localización del sitio de estudio (Google Maps, 2020)

### 2.2.1 Clima regional

El municipio presenta clima semicálido, subhúmedo y con lluvias en verano. La época con mayor temperatura es durante los meses de abril a junio llegando a tener temperaturas diarias promedio entre 28 y 33 °C y llegando a tener temperaturas máximas absolutas registradas de más de 40 °C. La época más fresca es durante los meses de diciembre a febrero siendo la temperatura promedio diaria menor a los 15 °C, llegando a ser la máxima temperatura 25 °C. El municipio ha tenido registro de heladas, principalmente en enero, llegando a durar de 0 a 20 días (Weather Spark, 2019).

La época de lluvias es variada durante todo el año, tiene una duración de 9 meses, mayo a febrero, teniendo lluvia de por lo menos 13 mm y siendo agosto el mes más lluvioso con 266 mm.

### 2.2.2 Radiación solar

De acuerdo con datos recabados de la NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources, el periodo cuando se recibe mayor radiación solar es en los meses de marzo a mayo que son los meses cuando se tiene el menor registro de lluvias, precipitaciones promedio de 1 mm. También se puede observar en el **Gráfico 2.1** que los meses con menor radiación solar son de julio a septiembre que es cuando empieza la temporada de lluvias y no durante la temporada de frío.

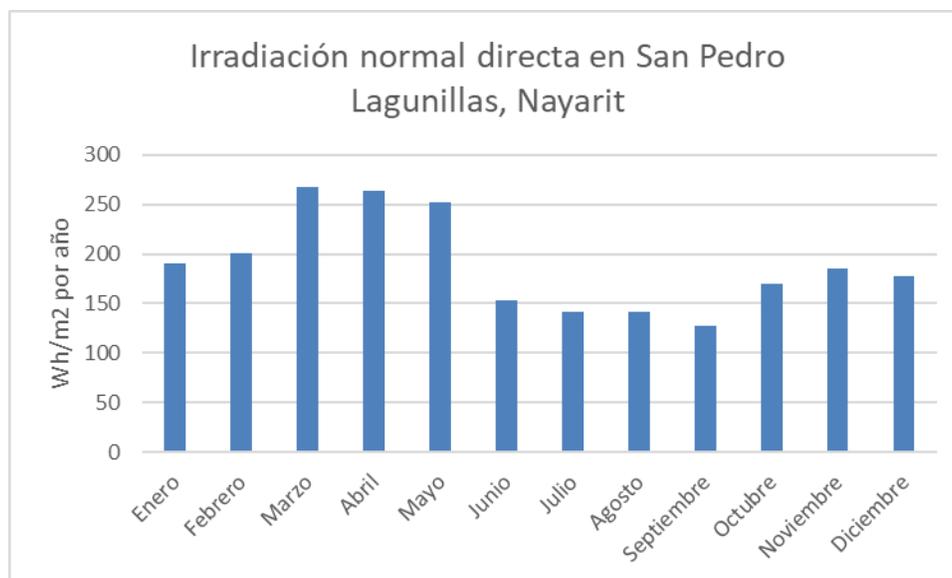


Gráfico 2.1 Irradiación solar directa promedio (World Bank Group, 2020)

## 2.3 Características de Nayarit

Nayarit es un estado de la República Mexicana ubicado en la costa oeste y entre los estados de Sinaloa, Jalisco, Durango y Zacatecas. El Instituto Nacional de Estadística y Geografía, en su sección de Cuénteme (INEGI, 2016), reporta a las actividades terciarias (comercio, turismo, educación, etc.) como la principal fuente de ingreso económico del estado, aportando más del 70% al PIB estatal. Las actividades primarias (agricultura, ganadería, pesca, etc.) son las que menor aporte dan, llegando solo a un 7.3%. En conjunto, todas sus actividades aportan un total del 0.7% al PIB nacional.

La población rural representó en el año 2000 el 33.6% de la población total del estado siendo la agricultura, su principal actividad económica y de mayor generación de empleo. Del total de la producción agrícola, el 89% es destinada al mercado. Los sistemas de producción que se utilizan son el riego mecanizado que genera una mejor rentabilidad y una temporal que es más tradicional, pero genera bajos niveles de producción. Lo principales productos que se siembran son: tabaco, el mango, la caña de azúcar, el frijol, el café, el plátano, el maíz, la sandía, el sorgo, el aguacate y las hortalizas.

### 2.3.1 Recursos naturales

El estado de Nayarit cuenta con ciertas ventajas a diferencia de otros estados del país, los cuales son:

- Localización geográfica: el estado se ubica en la región occidente del país que comprende los estados de Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Querétaro, San Luis Potosí y Zacatecas; lo que permite tener costos menores de transporte a centros de distribución

como es Guadalajara, Jalisco. Además, el estado se ubica en uno de los corredores comerciales del TLCAN, el cual comunica desde la Ciudad de México hasta Alaska, **ver Fig. 2.4.**



*Fig. 2.4 Corredores comerciales en México (El Economista, 2019)*

- **Recurso hídrico y de riego:** la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA, 2010) reportó que el estado cuenta con una disponibilidad media anual de 16 mil millones de metros cúbicos de agua debido a las precipitaciones y aguas superficiales. Además, anualmente se aprovechan aproximadamente 360,806.50 hectáreas, pero se tiene potencial para agregar 80,000 hectáreas, mientras que el total de superficie de riego es de 100,000 hectáreas, un aproximado de 28% de la superficie agrícola, que puede duplicarse por la disponibilidad de agua que se tiene, permitiendo realizar dos cultivos al año.
- **Clima:** en el Anuario estadístico y geográfico de Nayarit 2017 (INEGI, 2017), clasifica a Nayarit como un estado con clima cálido: el 91.5% del estado cuenta con un clima cálido subhúmedo, 6% templado subhúmedo, 2% semiseco y seco y 0.5% cálido húmedo. Su temperatura media anual es de 25 °C, la mínima es de 12 °C y una máxima de 35 °C, con una precipitación media anual de 1,100 mm. Estas condiciones son óptimas para un amplio abanico de oportunidad en el estado.

### 2.3.2 Agricultura en Nayarit

Dentro del sector primario, la agricultura representa un 67% (SAGARPA, 2010), utilizando dos sistemas de producción: el tecnificado equivalente al 28% de la producción que no depende de las

temporadas de lluvia al contar con sistemas de riego, y el método temporal con prácticas tradicionales.

Los principales cultivos que representan el 90% de la superficie sembrada son: los cultivos de pastos, sorgo, frijol, maíz, la caña de azúcar, mango, café, agave, plátano, el tabaco y el arroz.

En el Anuario Estadístico de la Producción Agrícola (SIAP, 2019), reporta a la caña de azúcar como el producto con el mayor valor de producción, llegando a generar más de 1,700,000 pesos mexicanos, le siguen el mango, frijol aguacate y agave como los cinco productos que mayor valor generan. En el caso de cultivos protegidos, solo se tienen registros de cuatro productos: jitomate, tomate verde, pepino y arándano. El jitomate es el que ocupa la mayor superficie sembrada, con solo 81 hectáreas cosechadas y un valor de producción cercano a los 135,000 pesos.

Uno de los mayores problemas que amenaza a las actividades agrícolas son los fenómenos meteorológicos, además de la dependencia de las temporadas de lluvia y la degradación del suelo por el monocultivo de productos como se menciona la SAGARPA (2010) en el Diagnóstico Sectorial en el Estado de Nayarit. Debido a esto, proponen el empleo de la agricultura protegida por su alta rentabilidad y mayor generación de empleos. La Asociación Mexicana de Horticultura Protegida (AMHPAC) menciona que, de aplicarse este método de producción, se pueden generar anualmente diez mil nuevos empleos en el país, (Asociación Mexicana de Horticultura Protegida AC, 2018).

### 2.3.3 Recurso geotérmico

México al encontrarse en las inmediaciones de las placas tectónicas del Caribe, Pacífico, Norteamérica, Rivera y Cocos propicia a que sea uno de los países con mayor potencial geotérmico, principalmente en la región de la costa oeste. El Instituto de Geofísica de la UNAM proporciona un mapa del flujo de calor en el país, **ver Fig. 2.5**.

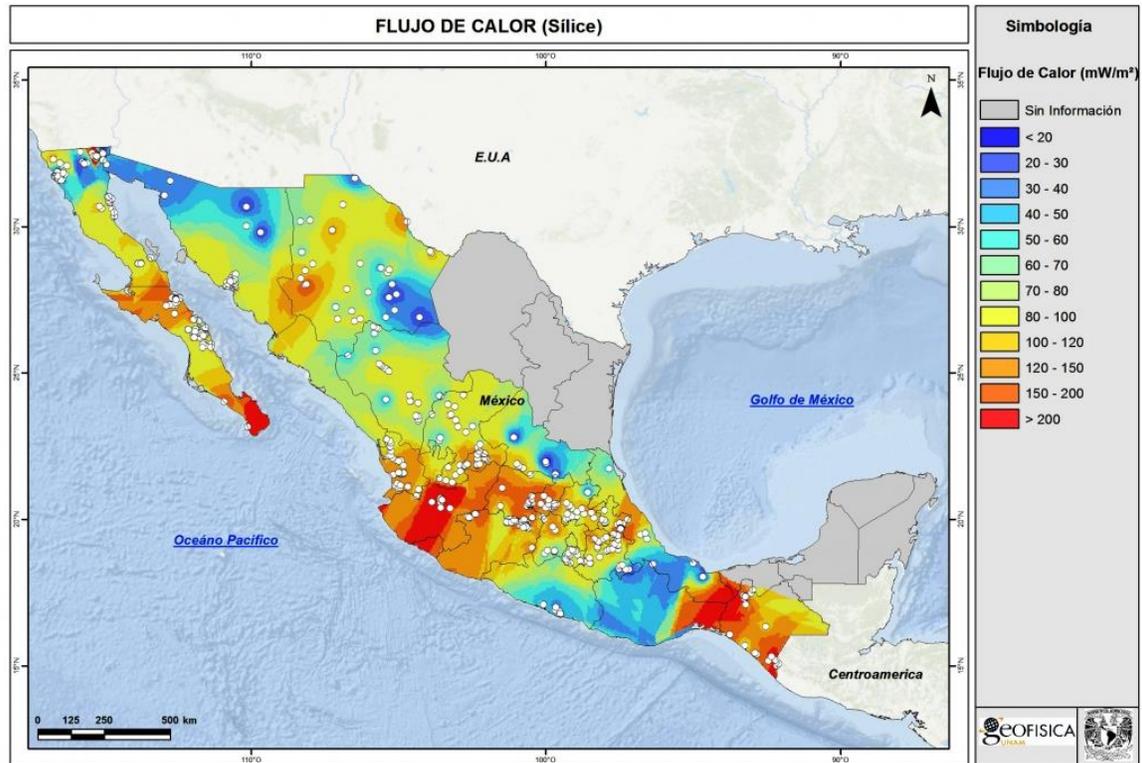


Fig. 2.5 Mapa del gradiente geotérmico y flujo de calor de México (Instituto de geofísica de la UNAM, 2017)

Para el caso de Nayarit, éste presenta 120 a 150 mW/m<sup>2</sup>, el doble al flujo de calor promedio de la Tierra; 60 mW/m<sup>2</sup> (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008), presentando varias anomalías geotérmicas como se aprecia en la figura con los diferentes puntos blancos en el mapa. Debido a esto, el estado cuenta con la única planta geotérmica del sector privado en el país con una capacidad de 25 MW<sub>e</sub> (CEMIEGEO, 2017).

Se aprecia que Nayarit no solo tiene el potencial para desarrollar la agricultura por la cantidad de recursos naturales que tiene, así como el interés de autoridades gubernamentales para mejorar la economía del estado; también cuenta con la presencia de recursos geotérmicos que puede ser aprovechado para la aplicación de diferentes proyectos además de la generación de energía eléctrica.

## 2.4 Selección de cultivo

México cuenta con aproximadamente 22 millones de hectáreas cultivadas anualmente, esto ha permitido un incremento en las exportaciones agropecuarias de 1993 para el 2015. Los principales países a los que exportamos productos son Estados Unidos y Canadá debido al TLCAN y las cortas distancias que se tienen, ya que el comercio que se tiene con Estados Unidos representa un 86% del total de nuestras exportaciones. Aunque también se tiene comercio con la UE, Centroamérica,

Sudamérica y Asia, debido a las distancias que se tiene por ejemplo con la UE, las exportaciones solo representan el 4% del total.

El Atlas Agroalimentario 2012-2018 (SIAP, 2018), menciona de entre los beneficios de la floricultura, se resalta lo siguiente:

De acuerdo con Jesús Antonio Arboleda Peña, asesor del Departamento de Ingeniería de Proyectos de la Universidad de Guadalajara (UdeG), la floricultura es el cultivo más rentable porque “es agricultura protegida bajo invernadero, y porque es agricultura súper intensiva; es decir, con muchas plantas en poco espacio de terreno”.

(Romo, 2018)

Otro punto a destacar es el menor tiempo de producción para las flores ornamentales a diferencia de productos comestibles. Mientras que flores de corte como rosas y crisantemos requieren de solo 3 meses para el corte y venta de éstas (Romo, 2018), para el caso del jitomate, fruto comúnmente sembrado en invernaderos, tarda 5 meses para empezar a cosecharse (Díaz Mora, 2004).

También se destaca un mejor rendimiento al cosechar flores en invernadero, SIAP (2020) reporta en su Cierre de la Producción Agrícola del 2018 la superficie sembrada y cosechada en invernaderos de diferentes cultivos, al igual que su valor de producción y se obtiene el rendimiento de éstos como el valor de la producción por cada hectárea sembrada. Continuando la comparación entre rosas y jitomates, se obtuvieron los siguientes valores enlistados en la **Tabla 2.4**:

*Tabla 2.4 Comparación entre cultivos en invernaderos (SIAP, 2019)*

Cultivo	Superficie		Valor Producción	Rendimiento
	(ha)		(miles de Pesos)	miles de Pesos/ha
	Sembrada	Cosechada		
Tomate rojo (jitomate)	7,737.14	7,727.14	13,172,382.97	1,704.69
Rosa	1,155.10	1,086.10	1,920,298.17	1,768.07

Se aprecia que, aunque el jitomate tiene una mayor superficie cosechada y un mayor valor de producción, se puede tener un mayor rendimiento con las flores de corte a diferencia de productos comestibles.

#### 2.4.1 Floricultura

La floricultura es una rama de las actividades agropecuarias que no sólo se dedica a las flores de corte, también se encarga de la producción de plantas vivas, bulbos, capullos, follaje, musgos entre otros productos. Una manera de simplificar el mercado internacional de flores es el de plantas vivas y productos de la floricultura. Se practica esta actividad en más de 150 países siendo Holanda el

principal exportador de flores en el mundo, principalmente rosas, tulipanes y crisantemos; como se muestra en la **Gráfico 2.2**.

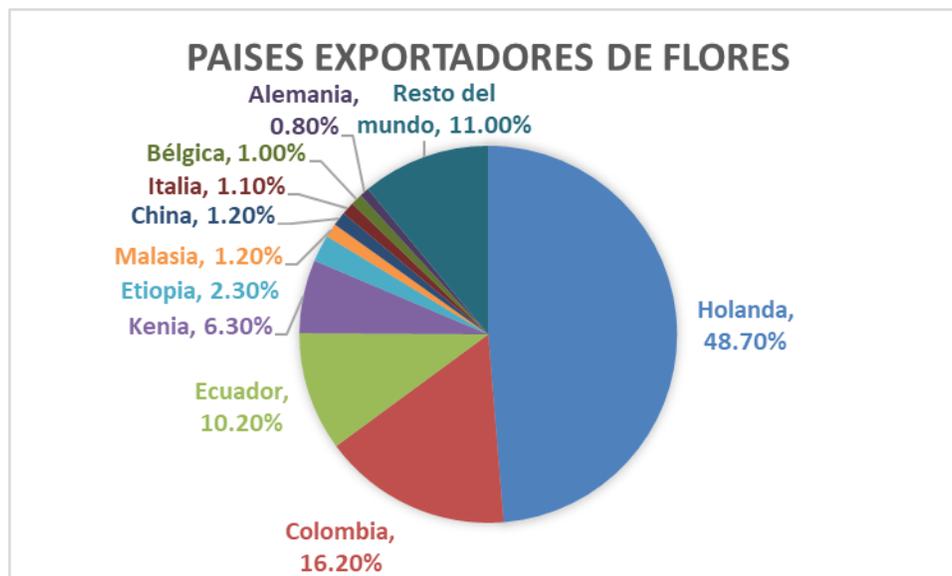


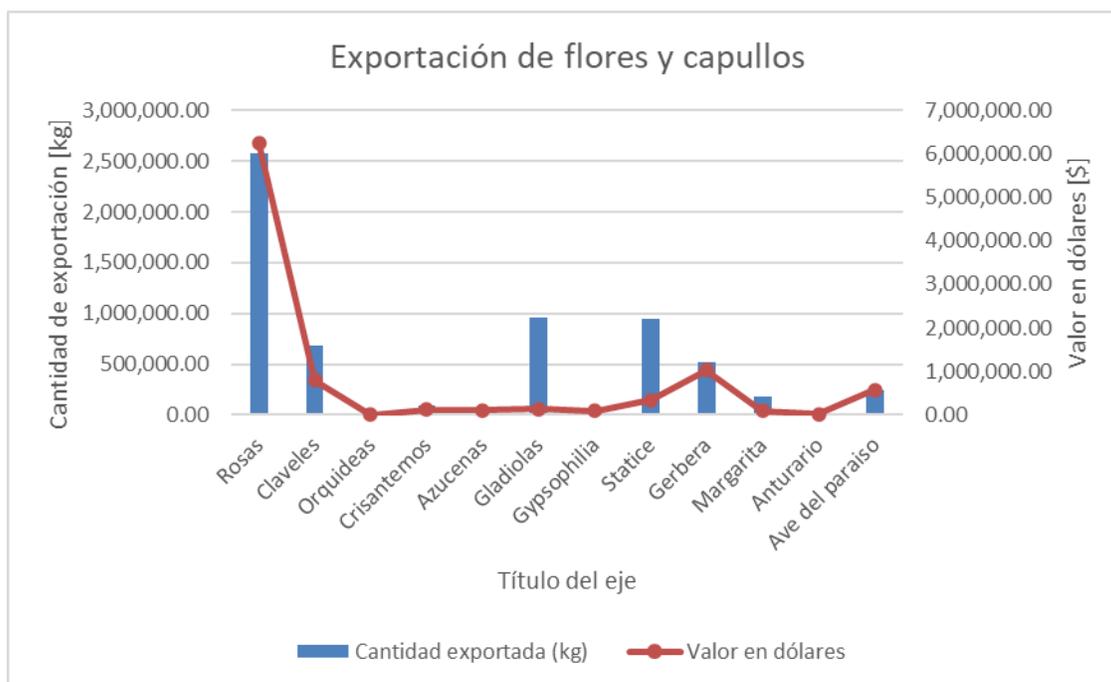
Gráfico 2.2 Principales exportadores de flores (Ekos, 2019)

Algunos países, como Kenia, son una fuente importante de ingresos ya que han logrado representar hasta más del 10% de exportaciones. Ramírez J. & Avitia, J. (2017, p. 103), menciona que se puede llegar a tener negocios más rentables en países como China, México, Perú, Chile, Bolivia, India, Uganda, Etiopía y Tanzania donde la gente puede recibir un mejor salario y tener buenos dividendos. Para el caso de México, se empezó a realizar con una mayor importancia esta actividad a finales del siglo XX con el propósito de generar actividades económicas más rentables debido a que se tienen principalmente cultivos tradicionales y de baja productividad.

Los principales estados del país donde se realiza esta actividad son el Estado de México, Morelos, Puebla, Ciudad de México y Jalisco. Para el año 2013, la floricultura junto con los cultivos en invernaderos y viveros tuvieron una participación del 0.1% en el PIB nacional, lo cual corresponde a un valor de 12,465 millones de pesos.

En la **Tabla 2.5** se muestran las principales “flores y capullos, cortados para ramos o adornos, frescos, secos, blanqueados, teñidos, impregnados o preparados de otra forma” exportados por México, siendo el principal mercado los Estados Unidos (INEGI, 2015).

Tabla 2.5 Principales flores de exportación en México (INEGI, 2015)



## 2.4.2 Selección

Para la selección del cultivo, se revisan datos del Anuario Estadístico de la Producción Agrícola (SIAP, 2019) de las seis principales flores con el mayor valor de producción, la Noche Buena no se toma en cuenta debido a que en el anuario se utilizan otras unidades de medida, esto con el fin de analizar mismas unidades de producción, ver **Tabla 2.6**. En la tabla se muestran diferentes parámetros, los cuales son:

- Unidad de medida (udm): cantidad estandarizada para la producción de las flores.
- Producción: cantidad total producida anualmente. Se considera la producción a cielo abierto y agricultura protegida, cultivo cíclicos y perennes y modalidad de riego y temporal.
- Rendimiento: cuantas udm se producen por hectárea.
- Precio medio rural: es el precio que se le paga al productor de primera mano su predio, parcela y/o zona de producción.
- Valor de la producción: cantidad en miles de pesos mexicanos generada al año.

Tabla 2.6 Producción agrícola (Ibid, 2019)

Cultivo	Producción	Rendimiento (udm/ha)	PMR (\$/udm)	Valor Producción (miles de Pesos)
Clavel	4,210,560.00	7,669.51	132.3	557,074.09
Crisantemo	10,938,041.63	4,078.70	177.05	1,936,555.58
Gerbera	1,375,830.35	12,015.99	279.74	384,877.18
Gladiola	5,425,054.55	1,162.23	250.91	1,361,205.61
Lilium	390,010.94	2,417.17	450.77	175,806.61
Rosa	9,043,570.57	5,625.86	239.16	2,162,865.05

Se puede observar que la flor que tiene el mayor rendimiento es la gerbera y pero la quinta con una mayor producción y valor de producción. Para este estudio se centrará en las rosas por ser la que tiene un mayor valor de producción y contar con mayores estudios para su desarrollo en invernadero y mejorar la producción que cuenta.

Con datos de la balanza comercial del INEGI del 2014, las exportaciones, principalmente a Estados Unidos, de estas dos últimas flores son de 2,574,954 kg con un valor de 6,237,497 dólares para las rosas y de 519,480 kg con un valor de 1,030,285 dólares para la gerbera.

## 2.5 La Rosa

Es una de las plantas ornamentales más conocidas en el mundo, esta planta pertenece a la familia de las Rosáceas. Esta familia incluye plantas de menos de 15 centímetros hasta trepadoras de más de 12 metros de altura, siendo una de las flores ornamentales más cultivadas debido a su gran variedad de colores, tonos y combinaciones que presenta, siendo utilizada como adorno por fabricantes de moda, adornos o incluso platillos de comida como condimento para los postres, regalos ya sea en un arreglo floral o únicamente la flor, para diferentes industrias como la de cosméticos en la fabricación de perfumes y cremas, además de ser utilizada en la industria farmacéutica por ser un laxante natural.

### 2.5.1 Antecedentes

Originaria de China, esta flor tiene más de 4,000 años de antigüedad y se fue expandiendo desde India hasta España a lo largo de los años. No fue hasta el siglo XIX, por instrucciones de la emperatriz Josefina de Francia, mandó a recolectar todas las variedades de rosas existentes en Europa para formar el jardín de rosas del palacio Malmaison, **Fig. 2.7**, siendo para el año 1825, Francia conocía más de 5,000 variedades. Las rosas empezaron a llegar a América por medio de hispanos y sajones siendo uno de los cultivos más comerciales. (Yong, 2004, pp. 54-55)



Fig. 2.6 Ilustración del Palacio Malmaison (Urquijo, 2014)

### 2.5.2 Rosas en México

Para el mercado ornamental mexicano, se generan más 188 mil empleos permanentes, 50 mil eventuales y más de un millón de indirectos. Las rosas junto con las lilis y gerberas son de las que más se producen siendo las rosas la principal flor de exportación.

La floricultura de la rosa en el país se realiza principalmente en 11 estados de la república como se muestra en la **Fig. 2.8**, siendo el Estado de México el principal estado productor con ventas de más de mil 470 millones de pesos para el 2017 (SIAP, 2018). En el caso de Nayarit, el SIAP no reporta al estado como productor de flores ornamentales y solo se encuentra la empresa Florinay en Tepic como proveedores mayoristas de flores ornamentales.



Fig. 2.7 Principales estados de cultivo de la rosa (Ibid, pp. 134)

La principal aplicación de las rosas es como ornamento ya que ha sido reproducida en varias pinturas y obras de arte, parte de decoraciones como en bodas o accesorios para la moda además de regalos para las personas. También se utiliza para la industria culinaria para la fabricación de mermeladas, jaleas, bebidas, dulces entre otros. En la medicina tradicional se ha utilizado la rosa como suplemento alimenticio para tratar problemas estomacales además de tratar problemas de salud respiratorios por su contenido de vitamina C y de ayudar a combatir la gastritis, cálculos urinarios entre otros. Pero donde la rosa tiene un mayor uso, además, del ornamental, es en la industria de cosméticos y perfumería, el aceite de las rosas se utiliza para la fabricación de cremas y productos dermatológicos ya que contiene agentes antirreumáticos, retrasa la aparición de verrugas, ayuda al tratamiento de quemaduras, además de ser utilizada en perfumes y fragancias por su aroma ya que en nuestros días un 96 y 46% de perfumes de mujeres y hombres respectivamente, se utiliza el aceite de rosas. En la **Fig. 2.9** se muestran algunos productos cosméticos y culinarios fabricados con las rosas (Francisco Tellez, 2010).



*Fig. 2.8 Usos industriales de la rosa (Balansiya, 2018)*

## 2.6 Requerimientos edafoclimáticos de la rosa

Es un cultivo que se crece en climas templados, floreciendo en verano, pero algunas de sus variedades crecen en climas tropicales y fríos. Su ciclo vegetativo llega a ser de 30 a 60 días entre cortes: Dependerá del tipo de rosa a cultivar, clima e iluminación.

### 2.6.1 Parámetros climáticos

La rosa requiere de las siguientes características para un desarrollo óptimo (Fundación PRODUCE Chiapas,a.c., 2009; Yong, 2004):

- **Temperatura:** las temperatura óptimas, diurnas y nocturnas, para su desarrollo son de 21 – 24 °C y de 15 – 16 °C respectivamente. Las mínimas y máximas biológicas son de 15 y 30 °C, y las mínimas y máximas letales son de -1 y 45 °C.
- **Humedad relativa:** requieren de ambientes húmedos, siendo los óptimos de 70 - 75%.
- **Suelo:** es de suelos medianamente compactos, siendo los más favorables los franco-arcillosos, migajón-arcillo-limosa, limo o arcilloso siempre que se tenga un buen drenaje en los suelos.

Se desarrolla de manera óptima en suelos con pH de 6.0 - 7.5 y temperaturas de 17.5 - 22.5 °C ya que se logra que la longitud del tallo sea mayor y disminuye el crecimiento de las raíces.

- **Riego:** el consumo de una planta es de 2 a 3 litros por día, siendo el método más utilizado el riego por goteo.
- **Luminosidad:** requiere de 4 a 6 horas de exposición directa al sol o de 20,000 a 30,000 luxes.
- **Enriquecimiento carbónico:** se encuentre entre valores de 800 y 1200 ppm, se recomienda realizar el enriquecimiento desde que inicia el día hasta un tiempo después del mediodía.

## 2.6.2 Nutrición

Para un óptimo desarrollo, las rosas requieren de los siguientes nutrientes que se enlistan en la **Tabla 2.7** (Íbid, pp. 58):

*Tabla 2.7 Nutrientes para la rosa (Yong, 2004)*

Nutrientes		
Clasificación	Tipos	Características
Macronutrientes	Nitrógeno (N)	El nitrógeno estimula el crecimiento de las hojas y los tallos y aumenta el tamaño de las hojas.
	Fosfatos (P2O5)	Los fosfatos estimulan el crecimiento de raíces y de los tallos y aceleran la floración
	Potasa (K2O)	La potasa estimula la producción de flores de gran calidad. También aumenta la resistencia a la sequía y a las enfermedades
Secundarios	Calcio (Ca)	El calcio, magnesio, hierro, boro y manganeso mantienen el color verde normal del follaje, de tal modo que ni el crecimiento ni el aspecto de la planta se estropean por la decoloración y la caída prematura de las hojas. El boro evita la deformación de los folíolos y el calcio reduce la extensión de la podredumbre de los tallos. Los micronutrientes también ayudan a la prevención de enfermedades y a la salud general de la planta.
	Magnesio (Mg)	
Micronutrientes	Hierro (Fe)	
	Boro (B)	
	Manganeso (Mn)	

## 2.6.3 Plagas y enfermedades

Aunque se cultiven en invernaderos las rosas o cualquier otra planta, se debe tener cuidado con las plagas y enfermedades, debido a que afectan tanto al crecimiento, como a la calidad de las rosas.

Las principales plagas que afectan a las rosas son arañas rojas, ácaros, orugas, pulgones, moscas blancas, trips y nematodos. Mientras que la mayoría de enfermedades son de origen fungoso, degradación de la tierra o debido a una de las plagas mencionadas anteriormente.

La gran mayoría de estas afecciones se pueden evitar o inhibir manteniendo las condiciones del medio ambiente apropiadas, por lo que al cosechar en invernaderos se debe tener las siguientes consideraciones (Fundación PRODUCE Chiapas,a.c., 2009; Yong, 2004):

- Evitar ambientes húmedos, mayores a 85% de humedad relativa.
- Temperaturas mayores a los 27 °C.
- Plantas no tengan exceso de humedad en la noche.
- Mantener una buena ventilación.
- Uso de nutrientes y plaguicidas.

Es por ello, que se deben de estar monitoreando las condiciones internas del invernadero para no perder cosechas completas.

## 2.7 Producción de rosas

Gómez (2014) menciona que los principales países productores de rosas en invernaderos son Italia con 1000 hectáreas, Holanda con 920 hectáreas, Francia con 540 hectáreas, España con 250 hectáreas e Israel y Alemania con 220 y 200 hectáreas respectivamente, mientras que en países de América; México, Colombia y Ecuador, han incrementado su producción en 1000 hectáreas. Además de países africanos como Zimbabue y Kenia, cuentan con una producción de 200 y 175 hectáreas.

México clasifica a la producción de rosa como: rosa, rosa planta, rosa gruesa, rosa planta en invernadero y rosa gruesa en invernadero. En la **Fig. 2.10**, el SIAP reporta como ha sido las exportaciones e importaciones de las rosas en los años 2012-2018



Fig. 2.9 Evolución del comercio exterior de rosas en México<sup>6</sup> (SIAP, 2018)

<sup>6</sup> Se representa en millones de dólares americanos

### 2.7.1 Rosa planta

En las **Tablas 2.8 y 2.9** se aprecia el comportamiento de la producción de rosas vendidas por plantas individuales en los años 2012 a 2018 en México.

*Tabla 2.8 Producción de rosas (planta) en cielo abierto (SIAP, 2019)*

Año	Superficie sembrada (ha)	Producción (Planta)	Rendimiento (Planta/ha)	PMR (\$/Planta)	Valor Producción (miles de pesos)
2012	18	1,800,000.00	100,000.00	6.8	12,240.00
2013	18	1,720,494.00	95,583.00	7.2	12,387.56
2014	18	1,344,000.00	112,000.00	5.5	7,392.00
2015	10	1,100,000.00	110,000.00	3	3,300.00
2016	12	1,200,000.00	100,000.00	8.54	10,248.00
2017	12	1,200,000.00	100,000.00	8.54	10,248.00
2018	5	517,400.00	103,480.00	5.77	2,985.40

Rosa (Planta) en Invernadero:

*Tabla 2.9 Producción de rosas (planta) en invernadero (SIAP, 2019)*

Año	Superficie Sembrada (ha)	Producción (Planta)	Rendimiento (Planta/ha)	PMR (\$/Planta)	Valor Producción (miles de Pesos)
2012	22	3,383,749.68	153,806.80	10.33	34,963.35
2013	22.2	3,383,530.00	152,411.26	8.99	30,422.74
2014	18.7	2,686,291.40	143,651.95	10.85	29,147.25
2015	21.6	3,332,130.00	154,265.28	11.47	38,209.92
2016	19.7	2,658,798.00	134,964.37	12.07	32,094.63
2017	31.7	4,411,814.00	139,173.94	11.52	50,814.50
2018	22.95	3,523,207.80	153,516.68	12.53	44,145.32

Se aprecia que la producción en invernadero aumentó en 104.32% del 2017 al 2018 a diferencia de las rosas que para el mismo periodo tuvo una disminución en la producción de más del 50%. Se observa que se tienen mayores rendimientos y PMR con la producción de invernadero debido a que en las rosas en cielo abierto, el mayor precio obtenido es de \$8.54 para el 2016 y 2017 mientras que las de invernadero, su mayor precio es en el 2018 de \$12.53.

El principal productor que menciona el SIAP (2019) para la rosa (planta) es el estado de Guanajuato, destinando para el 2018 solamente 5 hectáreas. Y para la rosa (planta) en invernadero para el mismo año solo se tiene registro de la Ciudad de México y el Estado de México. Siendo el Estado de México el mayor productor, con una producción de 2,300,528 plantas y un valor de producción de \$28.3 millones de pesos con una superficie 10.65 hectáreas.

## 2.7.2 Rosa Gruesa

En las **Tablas 2.10** y **2.11** se aprecia el comportamiento de la producción de rosas (gruesa) en los años 2012 a 2018.

Rosa Gruesa a cielo abierto:

*Tabla 2.10 Producción de rosas (gruesas) en cielo abierto (SIAP, 2019)*

Año	Superficie sembrada (ha)	Producción (Gruesa)	Rendimiento (Gruesa/ha)	PMR (\$/Gruesa)	Valor Producción (miles de pesos)
2012	708.5	999,745.90	1,456.51	207.79	207,732.65
2013	662.05	1,231,332.25	2,028.39	208.19	256,349.24
2014	635.05	1,236,999.10	1,983.80	246.07	304,388.47
2015	616.35	1,119,910.73	1,825.00	186.23	208,560.31
2016	610	1,137,484.04	1,868.71	183.8	209,070.79
2017	618.65	1,246,069.91	2,017.76	204.05	254,256.02
2018	549.85	1,197,982.40	2,200.76	239.33	286,712.21

Rosa Gruesa en Invernadero:

*Tabla 2.11 Producción de rosas (gruesas) en invernadero (SIAP, 2019)*

Año	Superficie Sembrada (ha)	Producción (Gruesa)	Rendimiento (Gruesa/ha)	PMR (\$/Gruesa)	Valor Producción (miles de Pesos)
2012	712.25	5,559,218.51	8,053.92	220.44	1,225,457.39
2013	798.25	5,749,328.00	7,522.84	210.68	1,211,265.19
2014	794.25	5,904,603.61	7,567.58	190.93	1,127,368.53
2015	769.15	5,694,018.00	7,458.27	234.25	1,333,809.91
2016	1,121.02	7,409,620.68	6,613.84	192.96	1,429,779.84
2017	1,127.10	7,765,613.35	6,985.98	221.88	1,723,056.86
2018	1,132.15	7,845,588.17	7,379.57	239.13	1,876,152.84

Se aprecia que para la superficie sembrada de rosa gruesa en invernadero aumento un 158.95% desde el 2012 hasta 2018 y del 2017 al 2018 aumento en un 0.44%, mientras que la superficie sembrada para la rosa (gruesa) en cielo abierto disminuyó un 22% del 2017 al 2018. Aunque el Precio Medio Rural (PMR) de la rosa (gruesas) a cielo abierto es mayor por \$0.20, se tiene un rendimiento tres veces mayor con las rosas en invernadero al igual que un mayor valor en la producción seis veces mayor con esta técnica.

Los principales productores de rosas (gruesas) a cielo abierto en el 2018 son la Ciudad de México, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Morelos, Oaxaca, Puebla, Querétaro y Tlaxcala, siendo Morelos el de mayor producción de rosas, con un total de 667,626 gruesas, para un valor de producción de \$122,826 millones de pesos y en una superficie de 305 ha. Mientras que, para las rosas (gruesas) en invernadero, los estados productores son Guerrero, Jalisco, Estado de México, Puebla y Querétaro. Siendo el Estado de México el mayor de éstos, con una producción de 7,022,706 gruesas, un valor de producción de \$1,643 millones de pesos y con una superficie de 849 hectáreas.

## Conclusiones

De la temática que se abordan en este capítulo, se pueden llegar a sintetizar los siguientes puntos:

- El estado de Nayarit cuenta tanto con los recursos naturales para ser explotados para la agricultura, además del interés del gobierno por aprovecharlos para mejorar su sector agrario.
- Debido a las manifestaciones termales que cuenta el estado, es idóneo para la aplicación de proyectos geotérmicos que se mencionaron en el capítulo anterior. En el presente caso de estudio, será para el uso en invernaderos.
- Las flores ornamentales, enfocándose en las rosas, no son muy explotadas en Nayarit, como lo son en el Estado de México. Aunque el clima idóneo es templado, se pueden dar en climas cálidos por las variedades que tiene.
- La floricultura es perfecta para la micro y pequeñas empresas, ya que se pueden tener altos valores de producción en menos terreno a diferencia de productos comestibles y en menor tiempo.
- Debido al potencial que se tiene en la floricultura, se podrán generar más empleos para el sector primario, y poder generar cultivos todo el año, además de mostrar los beneficios de proyectos geotérmicos.

## Capítulo 3 Propuesta de diseño

En este capítulo se propondrá el diseño de un invernadero para el cultivo de rosas; se establecerán las condiciones de operación de acuerdo con las condiciones climáticas del sitio propuesto para la instalación y pruebas del prototipo obtenido mediante un balance de masa y energía; considerando el uso de recursos hidrotermales de baja entalpia de hasta 90 °C que se encuentra presente en el sitio; se establecerá una lista de materiales que se debe de cubrir para el invernadero. Como alcances del diseño del invernadero, se generarán, planos constructivos, listado de materiales para el ensamble y diagramas de proceso.

### 3.1 Antecedentes

Dentro de los diferentes proyectos de aprovechamiento de energía geotérmica para aplicaciones en usos directos del calor que ha realizado el Grupo iiDEA del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se encuentra una propuesta de climatización de invernaderos para cultivo de jitomate en la región de Mexicali, Baja California. Con base en estos antecedentes, se sustenta el presente trabajo que pretende continuar con el objetivo de fomentar la utilización de la energía geotérmica del país en diversas áreas como en el sector agroindustrial. Se describirá a continuación de manera breve el diseño del invernadero y como se cubren las necesidades térmicas mediante el uso de la energía geotérmica.

#### 3.1.1 Contexto

La región de Mexicali predomina el clima seco, haciendo que en los meses de mayo a septiembre se tengan temperaturas por encima de los 30 hasta 55 °C mientras que invierno se alcanzan temperaturas menores a los 5 °C. La agricultura local; especializándose en algodón, trigo, aceituna, vid, jitomate y ajonjolí, depende de la extracción de agua de mantos acuíferos debido a que, en temporadas calientes, 45 °C máximo en julio y agosto, se tienen precipitaciones menores a 50 mm, y anualmente su promedio es de 200 mm, siendo 300 mm el recomendado (FAO, 2002).

Jasso Rivera (2016), reporta a Baja California como el segundo estado exportador de jitomate, llegando a producir el 15.8% de la producción total, haciendo de México como el 10° productor a nivel mundial de jitomate. Propone el uso de invernaderos para optimizar la producción de jitomate debido a que su cultivo es en los periodos de Primavera-Verano y Otoño-Invierno, teniendo una fuerte dependencia de las épocas de lluvia a lo largo del año.

#### 3.1.2 Selección del invernadero para cultivo de jitomate

Se propuso un invernadero asimétrico, debido a como se había mencionado anteriormente, se utiliza para regiones con climas cálidos.

En la propuesta, Jasso menciona que para cubrir las necesidades de calefacción y refrigeración el uso de un intercambiador de calor agua-aire para calentar el aire que viene del exterior cuando las

temperaturas son menores para el desarrollo del jitomate, siendo la óptima en la noche de 16 °C y la mínima letal de 10 °C. Mientras que, para la refrigeración, cuando se tienen temperaturas mayores a los 26 y 30 °C; temperaturas óptima diurna y máxima letal respectivamente, se empleará el uso de bombas de calor para enfriar el recurso geotérmico que será posteriormente utilizada por nebulizadores para disminuir la temperatura del invernadero.

### 3.1.3 Consideraciones técnicas y climáticas

Los parámetros de diseño del invernadero y las condiciones climatológicas se enlistan en las **Tabla 3.1 y 3.2:**

Tabla 3.1 Consideraciones de diseño (Jasso Rivera, 2016)

<b>Consideraciones técnicas del invernadero para cultivo de jitomate</b>	
Ancho [m]	9.6
Largo [m]	20
Altura al Zenit [m]	6.4
Distancia entre pilares [m]	4
Área total del piso del invernadero [m <sup>2</sup> ]	186
Área de siembra [m <sup>2</sup> ]	144
Superficie captadora de energía solar [m <sup>2</sup> ]	186
Superficie desarrollada de la cubierta del invernadero [m <sup>2</sup> ]	223
Superficie desarrollada de los laterales del invernadero [m <sup>2</sup> ]	245
Volumen del invernadero [m <sup>3</sup> ]	1100
Longitud de las ventanas [m]	3.5
Diferencia de altura entre ventanas [m]	1.3
Cantidad de ventanas	10
Diferencia de altura entre la ventilación lateral y cenital [m]	2
Superficie efectiva de ventilación lateral [m <sup>2</sup> ]	114.5
Superficie efectiva de ventilación cenital [m <sup>2</sup> ]	1.36
Cubierta plástica	Polietileno de baja densidad
Longitud de la tubería [m]	100
Diámetro de tubería [m]	0.06

Tabla 3.2 Consideraciones climáticas en Baja California (Íbid, 117-121)

<b>Consideraciones climáticas</b>	
Temperatura óptima nocturna del invernadero en diciembre [°C]	16
Temperatura óptima diurna del invernadero en agosto [°C]	26
Temperatura mínima letal del invernadero [°C]	10
Temperatura máxima letal del invernadero [°C]	30
Temperatura mínima absoluta del exterior del mes más frío [°C]	-5
Temperatura media del exterior de las mínimas diarias del mes más frío [°C]	1.74
Temperatura media del exterior de las mínimas mensuales del mes más frío [°C]	5.34
Temperatura media del exterior de la media mensual del mes más cálido [°C]	42
Temperatura media del exterior de las máximas diarias del mes más caluroso [°C]	50
Temperatura máxima absoluta [°C]	52
Temperatura de la superficie del suelo del invernadero [°C]	40.3
Profundidad a la que se estima la diferencia de temperatura [m]	0.5
Temperatura del suelo a la profundidad propuesta [°C]	20
Radiación solar incidente (diciembre) [ $\frac{kW}{m^2}$ ]	92.4
Radiación solar incidente (medio día del mes más caluroso) [ $\frac{kW}{m^2}$ ]	218
Humedad relativa interna [%]	60
Humedad relativa externa [días de verano al medio día]	28.4
Tasa de renovación del aire en el invernadero [ $\frac{1}{h}$ ]	0.75-1
Altura sobre el nivel del mar [m]	29

### 3.1.4 Resultados

Para cubrir las necesidades térmicas debido a las temperaturas extremas reportadas anteriormente, se propuso el empleo de energía geotérmica. En la **Tabla 3.3** se reportan los requerimientos necesarios para cubrir la demanda térmica (Ibid. PP 121,136):

*Tabla 3.3 Requerimientos del proyecto (Íbid, pp. 121,136)*

<b>Resultados</b>	
Flujo de calor mínimo a suministrar $\left[\frac{kW}{m^2}\right]$	3.4
Flujo de calor máximo a suministrar $\left[\frac{kW}{m^2}\right]$	4
Flujo de calor mínimo a disipar $\left[\frac{kW}{m^2}\right]$	3.7
Flujo de calor máximo a disipar $\left[\frac{kW}{m^2}\right]$	5.4
Temperatura mínima del recurso geotérmico [°C]	70
Temperatura máxima del recurso geotérmico [°C]	120
Flujo másico promedio de agua de calefacción $\left[\frac{kg}{s}\right]$	1.67
Flujo másico aportado por las boquillas de nebulización $\left[\frac{kg}{s}\right]$	0.002

## 3.2 Propuesta de diseño de invernadero para cultivo de flores en Nayarit

La región propuesta para el estudio es considerada una zona cálida subhúmeda, de acuerdo con el INEGI, además de contar con heladas en invierno y ser una región con humedad relativa mayor al 80% de acuerdo con el Sistema Meteorológico Nacional y a la NASA POWER. Es por ello que el modelo del invernadero será asimétrico, ya que su uso es normalmente empleado para regiones cálidas y húmedas, aprovecha la mayor cantidad de radiación solar y su uso se recomienda para cultivos de flores ornamentales (NOVAGRIC, 2016).

### 3.2.1 Parámetros climáticos

La información climatológica del sitio, llevada a cabo por personal del Grupo idea y PI-Ingenera en el Campo Geotermoeléctrico Domo de San Pedro y complementada por datos del World Bank (World Bank Group, 2020) y de la NASA Power Data Access Viewer (NASA, 2019), se presentan en las **Figuras 3.1-3.3**:

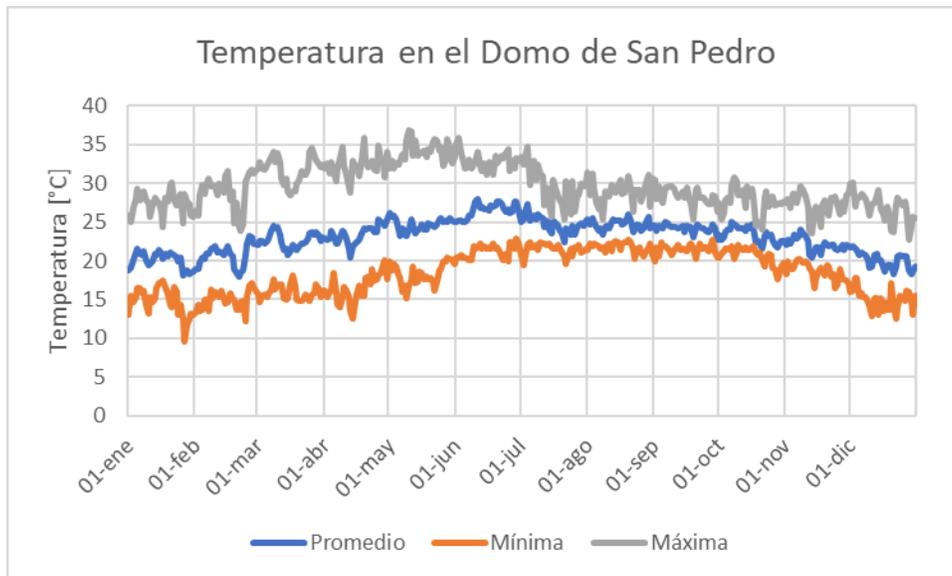


Fig. 3.1 Temperatura promedio (PI INGENERA - GRUPO IIDEA, 2019)

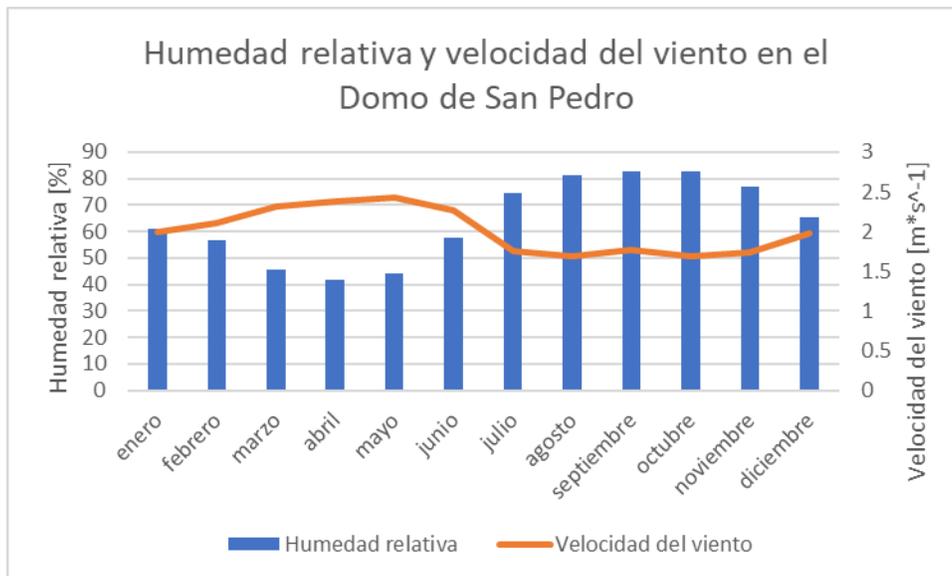


Fig. 3.2 Velocidad del viento promedio (Ibid, pp. 9)

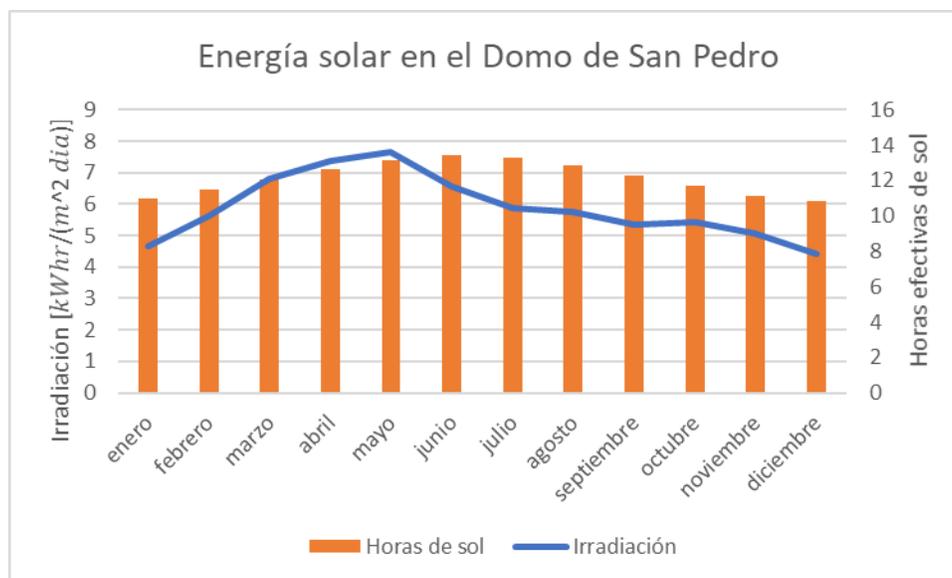


Fig. 3.3 Radiación solar normal directa (World Bank Group, 2020)

Se aprecia que la época de menor temperatura es en enero, que son las fechas en que coinciden cuando se presentan las heladas (Weather Spark, 2019), y el mes de mayor temperatura es en mayo, temporada cuando se tiene la mayor velocidad del viento. En cuanto a la radiación solar, se aprecia que, en verano, junio a agosto, se tiene mayor cantidad de horas de sol a diferencia del invierno, pero es en marzo cuando se tiene la mayor cantidad de radiación solar.

Para conocer los meses más críticos cuando se tendría que ocupar los equipos auxiliares, se comparan las temperaturas de confort en el día y noche y las temperaturas máxima y mínima biológica de la rosa, 16, 25, 30 y 12 °C respectivamente (Fundación PRODUCE Chiapa, A.C., 2016).

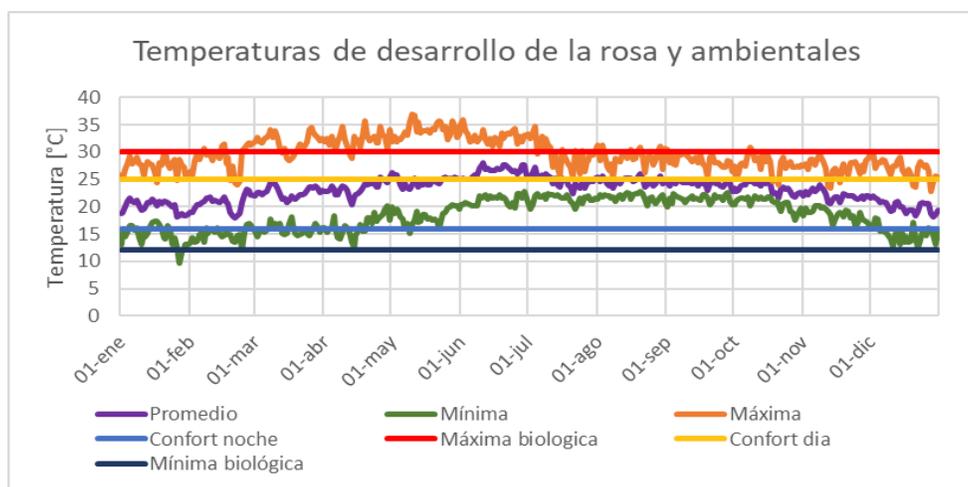


Gráfico 3.1 Comparación entre las temperaturas del invernadero y ambientales (PI INGENERA - GRUPO IIDEA, 2019)

Se observa lo siguiente:

- Solamente en enero se tiene registro de una menor temperatura a la mínima biológica.
- Los meses donde se tiene temperatura ambiente menor a la de confort en la noche son de diciembre a febrero; los meses de invierno.
- Solamente en junio se tiene temperaturas mayores a la de confort durante el día.
- De marzo a julio es cuando la temperatura máxima exterior es mayor a la máxima biológica.

Se concluye que para diciembre a enero se usara el equipo de calefacción, principalmente para la noche, debido a que las temperaturas mínimas registradas son menores a la temperatura de confort, afectando a la calidad de las rosas. Mientras que, para los meses de marzo a mitad de julio, se usará principalmente los equipos de refrigeración por tener las mayores temperaturas registradas para el desarrollo de las plantas. Para dimensionar los equipos necesarios, se tomará como referencia el mes de enero para la calefacción, y el mes de mayo para la refrigeración, por ser los meses con las temperaturas mínimas y máximas registradas.

### 3.2.2 Cubierta para el invernadero

Las cubiertas para los invernaderos se seleccionarán de acuerdo con el costo y también por el clima de la región, ya que para regiones con clima frío se prefiere el uso de cubiertas de cristal o de policarbonato mientras que regiones cálidas se utiliza películas de plástico.

Debido a que Nayarit es un estado con clima cálido, se utilizará película de plástico, los cuales tienen las siguientes características:

- Propiedades físicas: las películas plásticas son livianas y requiere de menos estructura que el vidrio, la densidad que afecta la flexibilidad, permeabilidad y propiedades térmicas, el espesor recomendado es de 200 a 800 galgas, resistentes a la rotura para regiones de granizo y viento además de resistencia a la deformación térmica, y a la rotura por bajas temperaturas y su envejecimiento que es la cantidad de tiempo para que las propiedades del material se degraden.
- Transmitancia: capacidad del material de cuanta radiación solar deja pasar. Es la relación entre la radiación interna del invernadero y la medida de manera simultánea con el exterior.
- Transmisión selectiva: algunas películas solo dejan pasar cierto rango de luz para el desarrollo óptimo de las plantas, además de evitar la entrada de luz necesaria para el desarrollo de plagas, enfermedades y virus.
- Propiedades térmicas: depende de la transmitancia para la radiación infrarroja larga y por las pérdidas de calor del material, las cuales se calculan en laboratorio como un coeficiente global de pérdidas de calor. Algunas de estas propiedades son resistencia al frío y calor, porcentaje de dilatación antes de la ruptura, capacidad calorífica.
- Propiedad anti-goteo: debido a que las gotas de agua que se forman tanto por la alta humedad del invernadero y la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior reducen desde

un 15% o más la transmisión de la luz, se les ponen a las cubiertas ciertos aditivos para evitar la generación de las gotas en las cubiertas.

Se escogerá una película de polietileno pentacapa por ser del tipo de plástico más vendido en el mercado para el uso de invernaderos, las principales ventajas de este tipo de cubierta son (Abglo, 2020):

- Los aditivos que tiene permiten generar un porcentaje de sombra.
- Asegura una buena transmisión de la luz solar, previniendo la abrasión de las plantas en días soleados.
- Efecto anti goteo, previniendo la formación de gotas que afecten la transmisión de luz solar al invernadero.
- Presenta una duración de hasta dos años antes de ser remplazada.
- Buena adaptabilidad para su uso en diferentes estructuras y resistencia al rasgado.

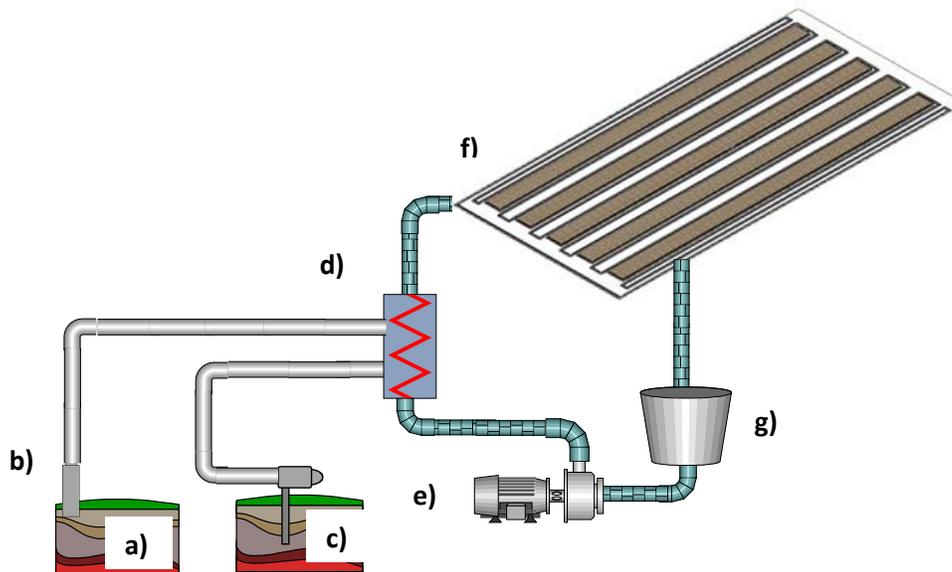
### 3.2.3 Modelo del invernadero

Se tomará como referencia las medidas del invernadero mencionadas anteriormente, por ser los valores comerciales más comunes, **Tabla 3.4**. En el capítulo 4 se realizará una evaluación tecno-económica cambiando el cultivo a flores.

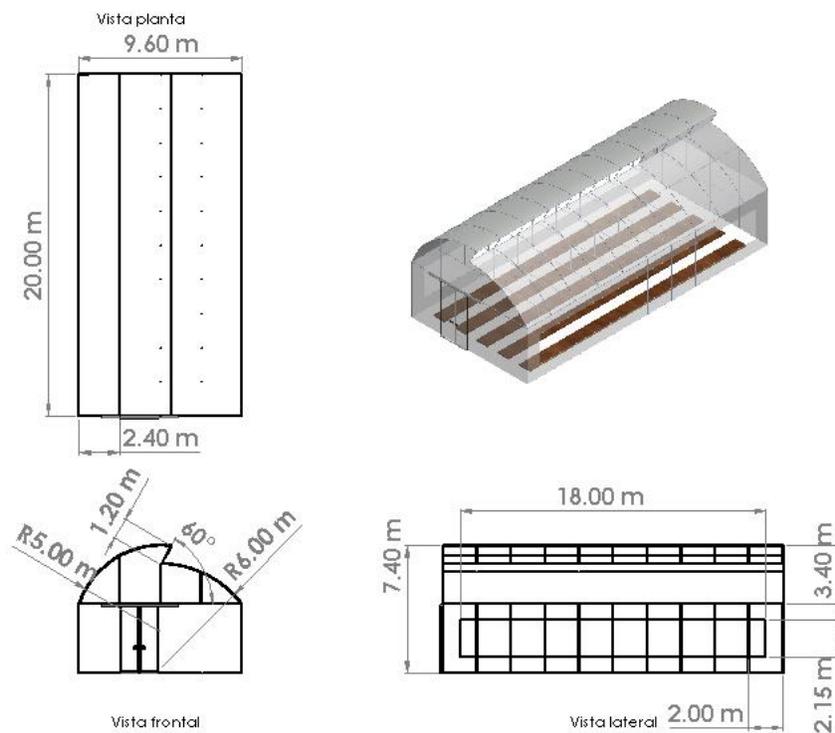
*Tabla 3.4 Parámetro de diseño (Jasso Rivera, 2016)*

Parámetro de diseño	
Ancho [m]	9.6
Largo [m]	20
Altura al Zenit [m]	6.4
Altura debajo del canal [m]	4
Distancia entre pilares [m]	2
Área total del piso del invernadero [m <sup>2</sup> ]	192
Área de siembra [m <sup>2</sup> ]	144.36

El modelo del invernadero se aprecia en la **Fig. 3.4** y **3.5**:



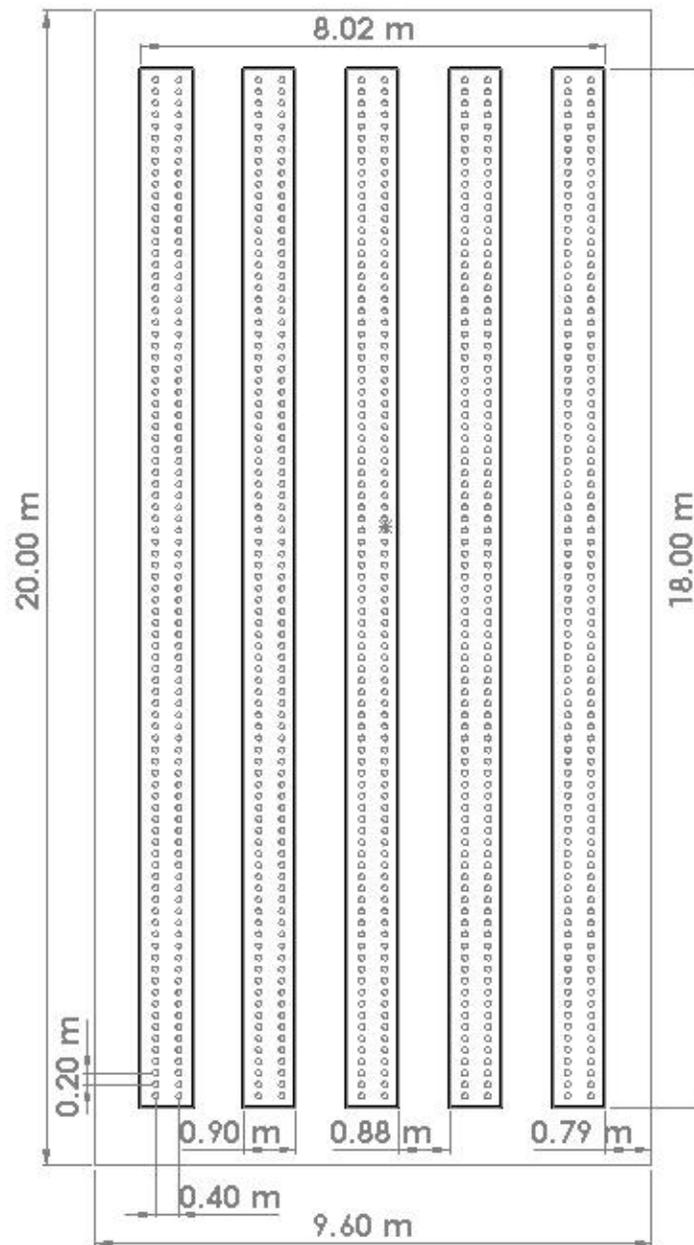
*Fig. 3.4 Esquema del invernadero geotérmico; donde: a) pozo de producción, b) bomba de salmuera, c) pozo de reinyección, d) intercambiador de calor, e) bomba de circulación de agua dulce, f) tubería de calefacción e invernadero, g) tanque de agua*



*Fig. 3.5 Modelo del invernadero propuesto*

El espacio de sembrado recomendado por varios autores, principalmente para aprovechar el mayor espacio sin afectar el desarrollo de las plantas y menores costos de mantenimiento; será el siguiente (Reid, 2008), para más detalles, ver la **Fig. 3.6**:

- Pasillos de 0.9 metros de ancho
- Doble fila
- 20 centímetros de separación a lo largo y 40 centímetros a lo ancho



*Fig. 3.6 Esquema de la forma óptima de plantación (Reid, 2008)*

### 3.3 Análisis energético del invernadero

El modelo utilizado es el propuesto por IDAE (2008), su modelo matemático se utiliza para cualquier tipo de invernadero sin importar la cubierta que utilice, o el tipo de cosecha que se tenga. En la **Fig. 3.6** se aprecian los flujos de calor del invernadero

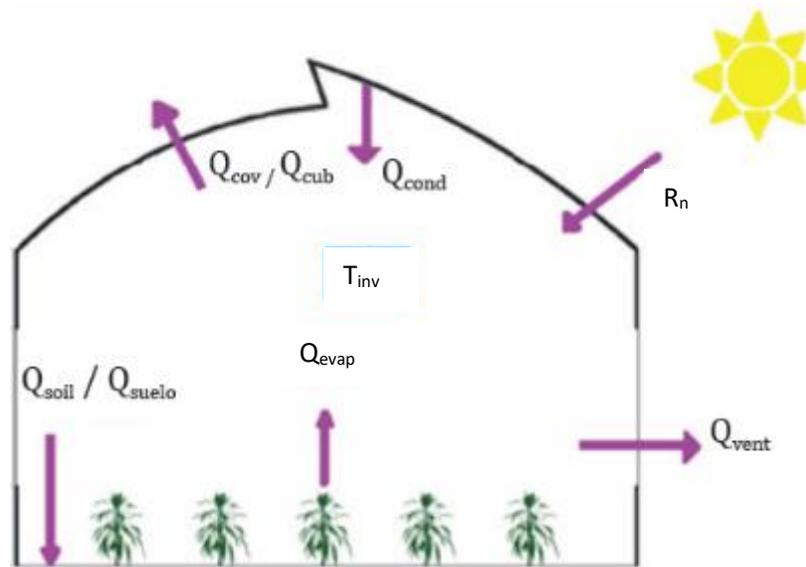


Fig. 3.7 Flujos de calor en el invernadero (Salazar Moreno, López Cruz, & Sánchez Cruz, 2018)

La ecuación que utilizan es la siguiente:

$$R_n + Q_{cli} + Q_{cond} = Q_{cub} + Q_{evap} + Q_{suelo} + Q_{vent} \quad \text{Ec. 1}$$

El objetivo de la ecuación es el calcular la carga térmica que se debe suministrar; mediante tuberías de calefacción o el uso de quemadores, o disipar; ventilación o nebulizadores, por medio de equipos auxiliares ( $Q_{cli}$ ) para mantener las condiciones idóneas dentro del invernadero. Un punto importante al usar esta ecuación es que se considera la temperatura interna del invernadero ( $T_{inv}$ ) como constante.

La ecuación se divide en dos, ganancias y pérdidas:

- **Ganancias:** son aquellos elementos que fomentan al aumento de la carga térmica del invernadero, estas se deben por la radiación neta ( $R_n$ ) y por la condensación ( $Q_{cond}$ ) en la cara interna del invernadero.
- **Pérdidas:** son aquellos elementos por los que se pierde calor dentro del invernadero, estas son en la cubierta ( $Q_{cub}$ ), la evapotranspiración ( $Q_{evap}$ ), calor cedido al suelo ( $Q_{suelo}$ ), la ventilación o renovación del aire ( $Q_{vent}$ ).

- Para saber si se debe suministrar o disipar energía, se debe observar el signo que se obtiene de la ecuación. En caso de tener signo positivo, significa que se debe suministrar energía. En caso contrario, es energía que se debe de disipar.

Todos los términos de la ecuación 1 será explicado posteriormente.

### 3.3.1 Calor generado por la radiación neta

IDAE (2008) menciona a la ganancia de calor debido a radiación neta como la suma de la energía absorbida por la cubierta, suelo y plantas menos la radiación emitida por la cubierta:

$$R_n = A_{sol} * [I_{rad} * (\alpha + \tau * \alpha_s)] + A_{suelo} * \sigma * \tau_{ter} * (\epsilon_{atm} * T_{atm}^4 - \epsilon_{ter} * T_c^4) \quad \text{Ec. 2}$$

El primer término de la ecuación hace referencia a la energía absorbida por radiación, siendo el área captadora de energía solar ( $A_{sol}$ ) hace referencia al área total del suelo del invernadero que será de 192 m<sup>2</sup> para efectos de este estudio, el área de siembra en el invernadero ( $A_{suelo}$ ) considera la superficie donde se siembran los cultivos, los pasillos donde trabajan los operadores y donde se encontrarán las tuberías de calefacción, para efectos de este estudio, se considera de 144 m<sup>2</sup>. La radiación solar ( $I_{rad}$ ) es el factor más importante para el desarrollo de las plantas como se había mencionado anteriormente y se obtiene de datos meteorológicos, el coeficiente de absorción y transmisión de la cubierta son características ópticas de la cubierta ( $\alpha$  y  $\tau$ , respectivamente) ya que están diseñadas para permitir el paso de longitud de onda de 400 a 700 nanómetros para el desarrollo de las plantas, en la **Anexo 1** se muestran diferentes valores de estos parámetros para diferentes tipos de cubiertas.

El coeficiente de absorción de energía solar de las plantas y suelos ( $\alpha_s$ ) se obtiene mediante la **Ec. 3**:

$$\alpha_s = \alpha_{pla} * f_p + \alpha_{sue} * (1 - f_p) \quad \text{Ec. 3}$$

El coeficiente de absorción de la planta ( $\alpha_{pla}$ ) depende del índice de área foliar (LAI), el cual es una cantidad adimensional que hace referencia a la capacidad fotosintética de las plantas, este valor depende del tipo de cultivo que se tenga. Para este estudio el índice de área foliar de la rosa es de 2.6 (Van Beveren, Bontsema, Van Straten, & Van Henten, 2014), mientras que en la **Tabla 3.5** se enlistan los valores que puede tomar  $\alpha_{pla}$ . La fracción de suelo cubierto ( $f_p$ ) se refiere al porcentaje del suelo del invernadero cubierto por plantas con respecto al área del suelo total del invernadero, siendo para este estudio un valor de 0.75 ya que el área de siembra es de 144.36 m<sup>2</sup> mientras que el área total es de 192 m<sup>2</sup>.

Tabla 3.5 Coeficiente de absorción de una cubierta vegetal para la radiación solar (Íbid, pp.50)

LAI	$\alpha_{pla}$ (400-2,800 nm)
2.0	0.62
2.5	0.71
3.0	0.75
3.5	0.78
4.0	0.81

El coeficiente de absorción del suelo debido a la radiación solar se obtiene del albedo o el porcentaje de radiación que se refleja dependiendo del tipo de suelo que se tenga en el invernadero, se calcula mediante la **Ec. 4** con apoyo de la **Tabla 3.6**:

$$\alpha_{sue} = 1 - \rho_{suelo} \quad \text{Ec. 4}$$

Tabla 3.6 Valores de albedo para diferentes tipos de suelo (Ibid, pp. 50)

Tipo de superficie	Albedo ( $\rho_{suelo}$ )
Arcilla húmeda	0.02-0.08
Arcilla seca	0.16
Arena húmeda	0.09
Arena seca	0.18
Césped	0.14-0.28
Rastrojo	0.15-0.17
Tela blanca	0.30

El segundo término de la ecuación se refiere a la radiación emitida por la cubierta, siendo la temperatura de emisión de energía de la atmósfera ( $T_{atm}$ ) la temperatura a la que se devuelve parte de la radiación solar como parte del balance energético de la Tierra, se obtiene mediante la **Ec. 5**:

$$T_{atm} = f_n * T_{ext} + 0.0552 * (1 - f_n) * T_{ext}^{1.5} \quad \text{Ec. 5}$$

Siendo el factor de nubosidad ( $f_n$ ) que representa la cantidad de nubes en un lugar y región determinado, se puede obtener de valores meteorológicos o puede tomar el valor de 1 para cielo totalmente cubierto y 0 para cielos claros. Para efectos de estudio se toma el valor de 0, debido a que

el cielo se encuentra en su mayoría de tiempo despejado para los meses de octubre a junio (Weather Spark, 2019). La temperatura exterior ( $T_{ext}$ ) debe ser la absoluta.

La emisividad de la atmósfera ( $\epsilon_{atm}$ ) se obtiene mediante la **Ec. 6**

$$\epsilon_{atm} = 1 - 0.35e^{\frac{e_{ext}}{T_{ext}}} \quad \text{Ec. 6}$$

La temperatura exterior es la absoluta, mientras que la presión parcial del vapor de agua en el aire exterior se obtiene de la relación entre la humedad relativa exterior ( $HR_{ext}$ ), obtenida de datos meteorológicos, y la presión parcial de saturación del aire a la temperatura exterior ( $e_{s(ext)}$ ):

$$e_e = e_{s(ext)} * HR_{ext} \quad \text{Ec. 7}$$

La presión parcial de saturación se obtiene mediante la **Ec. 8**:

$$e_{s(ext)} = 0.6108e^{\frac{17.269 * T_{ext}}{T_{ext} + 237.3}} \quad \text{Ec. 8}$$

Para esta ecuación, la temperatura se expresa en grados centígrados.

La emisividad de la cubierta ( $\epsilon_{ter}$ ) se obtiene de la tabla de las características de diferentes cubiertas de invernaderos provistas por IDAE mencionadas en el **Anexo 1**, mientras que la temperatura a la que se encuentra la cubierta ( $T_c$ ) se obtiene de la **Ec. 9** propuesta por Emeish, M. (1999), recordando que, para esta ecuación, se considera la temperatura absoluta:

$$T_c = T_{aire} - (0.0291 * 3.6 * U * (T_{aire} - T_{ext})) \quad \text{Ec. 9}$$

Donde U representa el coeficiente de transferencia de calor que depende de la velocidad del viento exterior (v).

$$U = 3.351 \times 10^{-5} * v^5 - 1.269 \times 10^{-3} * v^4 + 0.019 * v^3 - 0.14 * v^2 + 0.707 * v + 4.34 \quad \text{Ec. 10}$$

### 3.3.2 Calor cedido por la cubierta

Para el calor cedido por la cubierta, se utiliza la **Ec. 11** que considera la disipación de energía entre el aire interno del invernadero y la cubierta de éste con respecto al aire externo (Ibíd, pp. 52):

$$Q_{cub} = \alpha_{cc} * A_c * (T_{inv} - T_{ext}) \quad \text{Ec. 11}$$

El primer término del lado derecho hace referencia al coeficiente convectivo global de transferencia de calor entre el aire dentro del invernadero y el aire ambiente.

El segundo término hace referencia a la superficie total de la cubierta del invernadero que en este estudio toma el valor de 448.79 m<sup>2</sup> por ser el área total de la cubierta plástica del invernadero, le sigue la diferencia de temperaturas entre el aire dentro del invernadero y el aire ambiente.

Para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor, se emplea la ecuación **Ec. 12** (Íbid. pp 52):

$$\alpha_{cov} = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{e_c}{\lambda_c} + \frac{1}{h_i}} \quad \text{Ec. 12}$$

El coeficiente de convección exterior ( $h_e$ ) se calcula mediante la **Ec. 13**:

$$h_e = 0.95 + 6.76 * v^{0.49} \quad \text{Ec. 13}$$

Siendo válida cuando la temperatura de la cubierta es mayor a la temperatura exterior y cuando se tienen velocidades de viento menores a  $6.3 \frac{m}{s}$  y para invernadero con cubierta de (Íbid, pp. 52). Esta

ecuación cumple ya que la máxima velocidad registrada en la zona de estudio es de  $5.45 \frac{m}{s}$  (NASA, 2020)

La conducción se obtiene conociendo el espesor de la cubierta ( $e_c$ ) y la conductividad de la cubierta ( $\lambda_c$ ). IDAE (2008) enlista en la **Tabla 3.7** Diferentes conductividades térmicas para diferentes cubiertas:

*Tabla 3.7 Conductividad térmica de cubiertas de invernaderos (Íbid, pp. 52)*

Material	$\lambda_c$ (W/m·K)
Polietileno de baja densidad (PEbd)	0,45
Copolímero etileno y acetato de vinilo (EVA)	0,45
Polietileno alta densidad (PE)	0,33
Polipropileno (PP)	0,17-0,22
Vidrio celular	0,054-0,067
Policarbonato ondulado (PC)	0,19
Polimetacrilato (PMMA)	0,19

El coeficiente de convección interno ( $h_i$ ) del invernadero se calcula mediante la **Ec.14**:

$$h_i = 1.95 * (T_c - T_{inv})^{0.3} \quad \text{Ec. 14}$$

Esta ecuación aplica cuando se cumple la relación  $(T_c - T_{inv}) \leq 11.1$ , en caso contrario,  $h_i = 7.2 \frac{W}{m^2 K}$ .

### 3.3.3 Calor cedido por evapotranspiración

La evapotranspiración se define como la pérdida de humedad debido a la evaporación del agua en el suelo y plantas y a la transpiración desde las hojas. El modelo más utilizado es el conocido como método FAO Penman-Monteith debido a que utiliza parámetros climáticos para los cálculos, los cuales son más fáciles de obtener que otros métodos que utilizan parámetros característicos de las plantas:

$$Q_{evap} = \lambda * ET_c \quad \text{Ec. 15}$$

Donde el calor latente de vaporización ( $\lambda$ ) es la cantidad de energía que se requiere para evaporar el agua, se obtiene mediante la **Ec. 16**:

$$\lambda = 2.501 - 0.002361 * T_{inv} \quad \text{Ec. 16}$$

La transpiración del cultivo ( $ET_c$ ) se obtiene de la transpiración del pasto, el cual es la base del método FAO Penman-Monteith, multiplicado por el coeficiente de crecimiento del cultivo ( $k_c$ ) en estudio:

$$ET_c = ET_0 * k_c \quad \text{Ec. 17}$$

La evapotranspiración de referencia se obtiene mediante la **Ec. 18**

$$ET_0 = \frac{A_{sol} * (\Delta * (q_n - q_{suelo}) + \frac{37 * \gamma}{T_{inv}} * u * DPV)}{(\Delta + \gamma * (1 + c * u)) * \lambda} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde  $q_n$  y  $q_{suelo}$  son los flujos de calor por radiación neta y suelo por metro cuadrado. La pendiente de la curva de presión de vapor ( $\Delta$ ) hace referencia a la relación entre la presión de saturación del vapor con la temperatura para realizar el cambio de fase, está se obtiene de la **Ec. 19**:

$$\Delta = 4098 \frac{0.61078 e^{\frac{17.269 * T_{inv}}{T_{inv} + 237.3}}}{(T_{inv} + 237.3)^2} \quad \text{Ec. 19}$$

La constante psicométrica ( $\gamma$ ) es la relación entre la presión parcial del agua en el aire con la temperatura del aire, permitiendo interpolar la presión real de las lecturas de temperatura de bulbo seco y húmedo juntas, esta se calcula mediante **Ec. 20**:

$$\gamma = \frac{C_{p_{aire}} * P}{0.6219 * \lambda} \quad \text{Ec. 20}$$

La velocidad del viento a una altura de 2 metros ( $u$ ) se obtiene mediante la velocidad del viento promedio y de la diferencia de los puntos medios entre la ventana lateral y cenital:

$$u = v * \frac{4.87}{\ln(67.8 * h - 5.42)} \quad \text{Ec. 21}$$

El déficit de presión parcial de vapor (DPV) es la cantidad de vapor de agua que se puede retener en el ambiente, la cual depende de la temperatura a la que se encuentre el invernadero, se obtiene de la **Ec. 22**:

$$DPV = e_s - e_a \quad \text{Ec. 22}$$

La presión de saturación ( $e_s$ ) y actual ( $e_a$ ) se calculan con las ecuaciones 8 y 9 tomando como referencia la temperatura interna del invernadero.

La constante ( $c$ ) depende solamente del momento del día y es aplicable para cualquier región de estudio, cuando se calcula la evapotranspiración en la noche toma el valor de 0.96, mientras que para el día toma el valor de 0.24 (Subedi & Chávez, 2015).

El coeficiente del cultivo ( $k_c$ ) hace referencia a la etapa de desarrollo del cultivo, se obtiene mediante la **Ec. 23**:

$$k_c = k_{c,ini} + \left[ \frac{k_{c,mid} - k_{c,ini}}{2} \right] * LAI \quad \text{Ec. 23}$$

Los valores de los coeficientes del cultivo en estado de crecimiento iniciales ( $k_{c,ini}$ ) y a la mitad de desarrollo ( $k_{c,mid}$ ) dependen solo del tipo de cultivo sin importar la región o del clima de la zona de estudio. Para el caso de la rosa,  $k_{c,ini}$  toma el valor de 0.58 y  $k_{c,mid}$  de 1.13 (Arévalo, Vélez, & Camacho Tamayo, 2013)

### 3.3.4 Calor cedido por el suelo

El calor cedido hacia el suelo se calcula mediante la **Ec. 24** propuesta por Salazar et al. (2018) e IDAE (2008)

$$Q_{suelo} = \frac{k_s * (T_{suelo} - T_{inv}) * A_{suelo}}{ps} \quad \text{Ec. 24}$$

El coeficiente de intercambio térmico del suelo es la capacidad del suelo de transferir el calor, los valores varían y se muestran en la **Tabla 3.8**. Para este estudio se toma en consideración la tierra seca.

Tabla 3.8 Conductividad térmica de algunos tipos de suelo (Íbid, pp. 55)

Material	$k_s \left[ \frac{W}{mK} \right]$
Arena de cuarzo	7.7
Arena de río	4.4
Arena de granito	2.7
Grava	2.3-2.8
Tierra húmeda	2.0
Tierra seca	1.0
Lana de roca	0.038-0.048
Cemento	1.16
Hormigón	0.88
Hormigón celular	0.11
Hormigón armado	0.39-1.6
Turba seca	0.08
Arcilla seca	1.0-1.2

La temperatura del suelo ( $T_s$ ) es la temperatura recomendada para el desarrollo óptimo de las plantas, en específico las raíces las cuales son las que absorben el agua necesaria para las plantas, la profundidad a la que se estima la diferencia de temperatura ( $p_s$ ) es la distancia entre la parte superficial del suelo y la región donde se desea tener la temperatura del suelo deseada, puede tomar los valores de 0.1 a 0.2 metros (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).

### 3.3.5 Calor cedido por la renovación de aire

El calor cedido por la ventilación se debe por las renovaciones de aire entre el aire externo y el del invernadero, IDAE (2008) propone la **Ec. 25** para obtener este valor:

$$Q_{vent} = V_{inv} \cdot R/3600 \cdot \rho \cdot [C_{p_{aire}} \cdot (T_{inv} - T_{ext}) + \lambda \cdot (x_i - x_e)] \quad \text{Ec. 25}$$

Depende de la cantidad de aire renovado ( $R$ ) del invernadero que puede tomar valores de la **Tabla 3.9** la cual varía del tipo de cubierta del invernadero, del volumen de éste ( $V_{inv}$ ) y de la densidad del aire ( $\rho$ ).

Tabla 3.9 Cambios de aire (Íbid, pp 53)

Tipo de cubierta	$R \text{ (h}^{-1}\text{)}$
Láminas de plástico	0,75-1,0
Vidrio o fibra de vidrio	0,5-1,0

Análisis tecno-económico de un sistema de invernadero para cultivo de plantas ornamentales mediante el aprovechamiento de recurso geotérmico de baja entalpia

El calor específico del aire ( $C_{p_{aire}}$ ) y del vapor recalentado ( $C_{p_v}$ ) dependen de la temperatura exterior del invernadero ( $T_{ext}$ ). Las humedades específicas del invernadero y del exterior ( $x_i$  y  $x_e$ ; respectivamente) se calculan mediante la **Ec 26**:

$$x = \frac{0.6219 * HR * e_s}{P - HR * e_s} \quad \text{Ec. 26}$$

La humedad específica depende de las humedades relativas (HR) del invernadero (inv) y del exterior (ext), de la presión atmosférica (P) y la presión parcial del vapor de saturación ( $e_s$ ); que dependen las temperaturas internas y externas del invernadero.

En caso de que se cuente con las ventanas del invernadero abiertas, la tasa de renovación de aire se calcula mediante la **Ec. 27**:

$$R = 3600 * \frac{G}{V_{inv}} \quad \text{Ec. 27}$$

Donde el caudal de aire que entra al invernadero (G) depende de los efectos del viento y térmicos, se calcula mediante la **Ec. 28**:

$$G = \frac{A_{vent}}{2} * C_d \sqrt{\frac{g * h * \Delta T}{2T} + (C_w * v^2)} \quad \text{Ec. 28}$$

Donde se considera el área total de las ventanas ( $A_{vent}$ ), el coeficiente de descarga ( $C_d$ ) se puede obtener de la **Tabla 3.10**, al igual que el coeficiente de efecto de viento ( $C_w$ ) de la **Tabla 3.11**, la diferencia de altura (h) se considera la distancia entre los puntos medios de las ventanas laterales y cenitales, y las temperaturas deben de ser las absolutas (Kelvin).

Tabla 3.10 Coeficientes de descarga para diferentes tipos de ventanas (Íbid, pp. 54)

Tipo de ventana	Cd
V. rectangular vertical a	0.6-0.8
V. cenitales b	0.6-0.7
Ventana rectangular c	0.6
V. cenitales d	$0.64+0.001 \cdot \alpha$
V. cenitales d	$\{1.75+0.7 \cdot \exp(-L/(32 \cdot H \cdot \text{sen} \alpha))\}-0.5$
V. rectangular vertical e	0.63
V. rectangular vertical f	0.6-0.7
V. rectangular vertical g	0.73
V. rectangular vertical h	0.61
V. rectangular vertical i	0.74
V. cenitales j	$\{1.9+0.7 \cdot \exp(-L/(32.5 \cdot H \cdot \text{sen} \alpha))\}-0.5$

Tabla 3.11 Coeficientes de efecto de viento en invernaderos (Íbid, pp. 53)

Superficie del invernadero [m <sup>2</sup> ]	Cw
416 (2 módulos)	0,10
179 (1 módulo)	0,14
900 (túnel)	0,071
416 (2 módulos)	0,13
204 (4 módulos)	0,09
38.700 (60 módulos)	0,11

Se toma en consideración para la diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) y temperatura (T) lo que se menciona en ASHRAE Handbook Fundamentals (2017):

$$\Delta T = T_{inv} - T_{ext}, \text{ denominador } T = T_{inv}; \text{ cuando } T_{inv} > T_{ext}$$

$$\Delta T = T_{ext} - T_{inv}, \text{ denominador } T = T_{ext}; \text{ cuando } T_{inv} < T_{ext}$$

### 3.3.6 Calor absorbido por condensación

La condensación de la cubierta es el proceso exotérmico donde el agua en el aire se condensa debido a la menor temperatura del exterior con la temperatura interna del invernadero. Se utiliza el modelo propuesto por Garzoli (1987) se obtiene mediante la **Ec. 29**:

$$Q_{cond} = \frac{A_c * h_i * \lambda}{Cp_{aire}} (w_{ai} - w_c) \quad \text{Ec. 29}$$

Debido a que se analiza la cubierta en la cara interna del invernadero, se utiliza el coeficiente de convección interna entre el aire del invernadero y la cubierta mediante la ecuación 15.

La humedad específica ( $w$ ) hace referencia a la cantidad de agua contenida en el aire, para que ocurra la condensación, la humedad específica del aire ( $w_{ai}$ ) debe ser mayor a la humedad específica de la cubierta en saturación ( $w_c$ ). Éstas se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

$$w_{ai} = \frac{RH}{100} * (0.004055 + 0.0001152T_{inv} + 0.00002167T_{inv}^2) \quad \text{Ec. 30}$$

$$w_c = 0.004055 + 0.0001152T_c + 0.00002167T_c^2 \quad \text{Ec. 31}$$

La temperatura de la cubierta se obtiene mediante la ecuación 10.

### 3.3.7 Calor de equipos auxiliares

Como se mencionó anteriormente, se debe conocer el signo o sentido que toma la energía.

Cuando se tiene signo positivo o que las ganancias son menores a las disipaciones de energía, se debe suministrar energía. Para este estudio se utilizarán tuberías colocadas al ras del piso. La potencia térmica se obtiene mediante la ecuación de transferencia de calor entre el agua de calefacción a la entrada y salida del invernadero:

$$Q_{tub} = m * Cp_{agua} * (T_{entrada} - T_{salida}) \quad \text{Ec. 32}$$

Para poder utilizar la ecuación anterior, los únicos parámetros en los que se tiene control son el calor específico ya que se puede considerar constante u obtener de tablas y la temperatura de entrada porque depende del recurso geotérmico y del acercamiento del intercambiador de calor en caso de utilizarse. Para conocer la temperatura de salida o el flujo másico, uno de estos dos términos se deberá suponer. Una manera mediante el cálculo de la temperatura promedio que circulará en la tubería, siendo los parámetros necesarios la temperatura a la entrada y a la salida, como se muestra en la **Ec. 33**

$$T_{promedio} = \frac{T_{entrada} + T_{salida}}{2} \quad \text{Ec. 33}$$

Para calcular la temperatura promedio en la tubería se utiliza la ecuación propuesta por Cengel & Ghajar (2011), para la transferencia de calor en un cilindro, siendo necesario conocer las características de la tubería como el material, diámetros interno y externo y longitud de la tubería:

$$Q = \frac{T_{promedio} - T_{inv}}{\frac{1}{2\pi L r_{in} h_{in}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{in}}\right)}{2\pi L k_{tub}} + \frac{1}{2\pi L r_{out}(h_{out} + \epsilon\sigma(T_s^2 + T_{inv}^2)(T_s + T_{inv}))}} \quad \text{Ec. 34}$$

El primer término del denominador de la ecuación 34 hace referencia a la convección en el interior de la tubería, el segundo es la conducción entre el interior y exterior de la tubería y el último término es la combinación entre la convección y radiación en el exterior de la tubería.

El coeficiente de convección interna depende del valor de Reynolds para saber si se tiene flujo laminar o turbulento:

$$Re = \frac{v_m L_c}{\nu} \quad \text{Ec. 35}$$

Donde se toma en consideración la velocidad del agua en el interior de la tubería ( $v_m$ ), la longitud característica, que en este caso es el diámetro interno, y la viscosidad cinemática del agua ( $\nu$ ) a la temperatura del recurso geotérmico ( $T_{geo}$ ). Se considera flujo laminar si el número de Reynolds es menor a 10,000.

Dependiendo del valor obtenido, se obtienen diferentes valores para el número de Nusselt (Ibid, pp. 488-489), en caso de tener flujo laminar, Nusselt será igual a 4.36, pero en caso de tener flujo turbulento, se utiliza la siguiente ecuación para flujo interno en tubos:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad \text{Ec. 36}$$

Donde n toma el valor de 0.4 y 0.3 para el calentamiento y enfriamiento del fluido dentro del tubo, respectivamente.

Dependiendo del valor obtenido de Nusselt, se procede a calcular el coeficiente convectivo mediante la **Ec. 37**:

$$h = \frac{Nu * k}{D} \quad \text{Ec. 37}$$

Depende del diámetro de la tubería, de la temperatura y la conductividad del fluido a la temperatura del agua a la entrada.

Para la conducción, depende de la relación entre radios externo e interno de la conductividad térmica del material ( $k_{tub}$ ).

Para la convección natural sobre superficies, se debe calcular el número de Rayleigh el cual depende del número de Grashof y Prandlt (Ibid., pp. 527). Dependiendo de la configuración geométrica y del valor del Número de Rayleigh, dependerá la ecuación para conocer el Número de Nusselt.

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_{inv})L_c^3}{\nu^2} Pr \quad \text{Ec. 38}$$

Donde la aceleración de la gravedad ( $g$ ) toma el valor constante de  $9.81 \frac{m}{s^2}$ , el coeficiente de expansión volumétrica se considera para gases ideales por lo que su valor se obtiene mediante:

$$\beta = \frac{1}{T} \quad \text{Ec. 39}$$

Donde la temperatura es la absoluta del promedio entre la temperatura superficial y la del invernadero. Al igual que la convección interna, la longitud característica es el diámetro externo y la viscosidad es la del aire a la temperatura del aire del invernadero.

En el caso de que el número de Rayleigh sea menor o igual a  $10^2$ , el número de Nusselt para cilindros horizontales se obtiene mediante la siguiente ecuación (Ibid, pp. 528):

$$Nu = \left(0.6 + \frac{0.387 * Ra^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0.559}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{8/27}}\right)^2 \quad \text{Ec. 40}$$

El coeficiente convectivo se obtiene mediante la ecuación 37, pero con el diámetro externo y la conductividad del aire.

Para el cálculo de la radiación, se utiliza la emisividad de la tubería que depende del material de fabricación. En la **Tabla 3.12** se muestran algunas emisividades de diferentes tipos de tubería

Tabla 3.12 Emisividad de algunos materiales (IDAE, 2008)

Material	$\epsilon_{tb}$
Acero inoxidable	0,26-0,42
Aluminio	0,03-0,05
Asfalto	0,88
Hierro oxidado	0,30-0,57
Pintura negra	0,80-0,92
Pintura blanca	0,85-0,90

Para la convección exterior y radiación se requiere conocer la temperatura superficial de la tubería, por lo que primero se deberá asumir una para después realizar un proceso iterativo y tener la longitud y temperatura superficial reales. Se tomará como referencia la temperatura obtenida en el trabajo de Jasso Rivera (2016), donde consideró a la temperatura superficial de la tubería igual a la temperatura del recurso geotérmico.

En caso de tener mayores pérdidas o disipación de energía térmica en la ecuación 1, se debe utilizar equipos alternos ya que la ventilación no será suficiente para disipar toda la energía. Un método de enfriamiento es la nebulización, que consiste en la formación de neblina mediante el uso de atomizadores que generan gotas de agua de 0.5 a 50 micrómetros de diámetro. Un factor importante es que el agua de trabajo debe de estar libre de sales y minerales para evitar daños a los equipos.

Para conocer la carga térmica que logra disipar, se utiliza la **Ec. 41**:

$$Q_{neb} = qu_{evp} * \lambda \quad \text{Ec. 41}$$

Donde el calor latente de vaporización ( $\lambda$ ) se obtiene mediante la ecuación 16, y el flujo de másico de agua que pasa por los nebulizadores ( $qu_{evp}$ ) depende de las necesidades térmicas del invernadero.

### 3.4 Sistema de enfriamiento

Los principales métodos de refrigeración son mediante el uso del aire exterior (natural o mecánica) o mediante el uso de nebulizadores para crear una neblina de agua que enfría el invernadero.

#### 3.4.1 Ventilación natural

Es el método más común de enfriamiento debido a que no se requieren de equipos adicionales, solamente de la instalación de ventanas. De acuerdo con la ASAE EP406.4, al utilizar ventilación natural en los invernaderos, se suelen colocar las ventilas en la parte superior de los arcos y en las paredes laterales. El área total de cada una de las ventanas debe ser entre un 15% y 20% el área del piso y colocarse en la misma dirección de las paredes donde se colocarán. Las ventanas en los arcos deben de formar un ángulo de 60° con respecto al techo cuando se encuentren completamente abiertas. También se puede colocar techos retractiles para evitar el uso de ventanas laterales, siempre y cuando se tenga más del 50% del techo abierto.

La ventilación natural ocurre por dos efectos; efectos de viento y de temperatura. Para tener una refrigeración efectiva, se debe renovar el aire caliente del invernadero por un aire más frío del exterior.

Para este estudio, se considera el uso de ventilación natural como el principal sistema de refrigeración cambiando el grado de apertura de las ventanas. Para conocer la carga térmica disipada mediante esta técnica, la ecuación general de Calor cedido por la renovación de aire, ecuación 25, se deberá calcular considerando la tasa de renovación de aire se debe a la entrada de aire por las ventanas y no por la infiltración en la estructura.

### 3.4.2 Nebulización

Se menciona anteriormente que el enfriamiento por medio de la ventilación, tanto natural y mecánica, se da cuando la temperatura del exterior es menor a la del invernadero, pero en caso de que el área total de las ventanas no sea suficiente para cubrir la demanda de flujo de aire o en el caso de que se tenga una temperatura exterior sea mayor y genere una ganancia de calor debido a la entrada de aire caliente, se debe utilizar equipos alternos para controlar la temperatura interna del invernadero. Se propone la utilización de nebulizadores, para los casos donde las ganancias de calor sean mayores a las pérdidas de calor explicadas en la ecuación 1.

### 3.5 Memoria de cálculo

Para el caso de la calefacción, se realizará principalmente cuando la temperatura exterior sea menor a la temperatura interna del invernadero, mientras que, para la refrigeración, se toma en consideración la máxima temperatura biológica para el desarrollo de las rosas.

#### 3.5.1 Condiciones internas y externas del invernadero

Para el desarrollo de óptimo de las rosas, se enlistan los parámetros que se deben de cumplir para el desarrollo óptimo de la rosa en la **Tabla 3.13**:

*Tabla 3.13 Parámetros de desarrollo (Van Beveren, Bontsema, Van Straten, & Van Henten, 2014; Rosa, 2015; Fundación PRODUCE Chiapas, a.c., 2009)*

Parámetros de cultivo	
<b>Temperatura máxima de desarrollo diurna [°C]</b>	30
<b>Temperatura nocturna óptima de desarrollo [°C]</b>	16
<b>Temperatura óptima del suelo [°C]</b>	21
<b>Humedad relativa en el invernadero [%]</b>	70

Las condiciones externas se toman la información con la que se realizan los gráficos 3.1 a 3.4.

Las cargas térmicas obtenidas para los meses de estudio se muestran en las **Gráficos 3.2 a 3.3**:

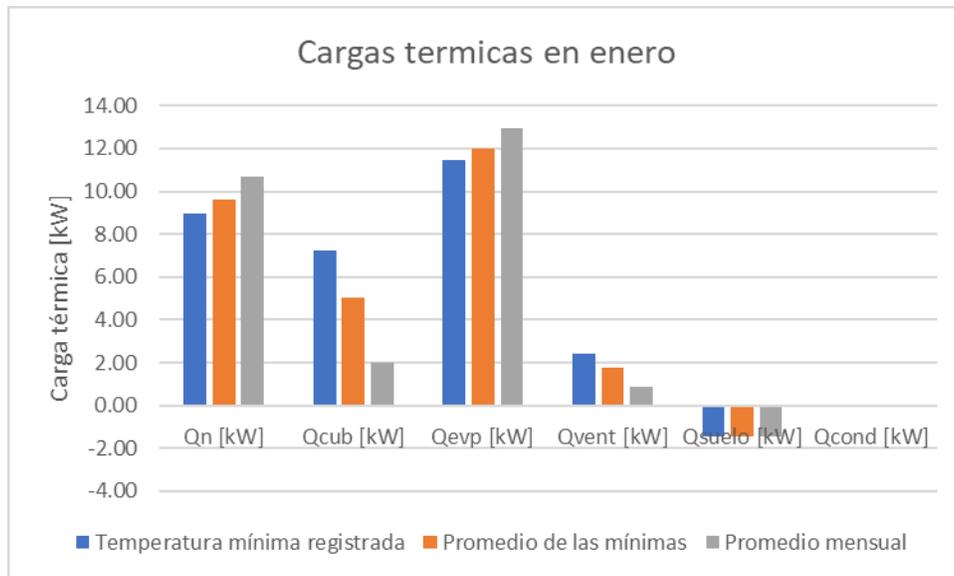


Gráfico 3.2 Carga térmica en enero

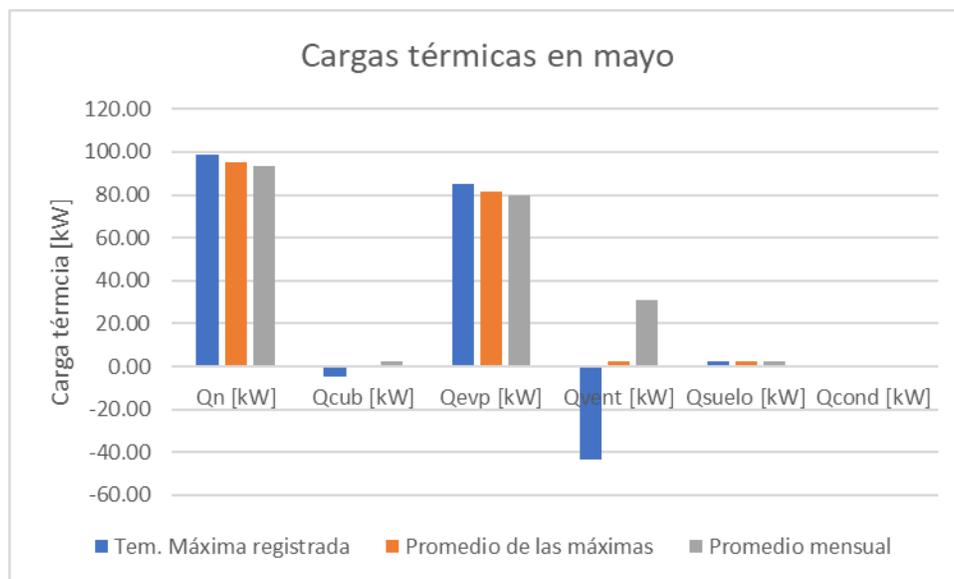


Gráfico 3.3 Carga térmica en mayo

Se observa para ambos meses las principales pérdidas de calor son debido a la evapotranspiración y la única ganancia es debido a la radiación neta ya que la humedad en la cubierta es mayor a la del aire interno, por lo que es cero, como se mencionó anteriormente. La pérdida de calor debido a la cubierta y a la ventilación tienen valores negativos para el mes de mayo debido a que las temperaturas máxima y promedio de las máximas son mayores a la temperatura interna del invernadero por lo que en vez de ser pérdida de calor, son ganancias de calor. La única excepción es para la temperatura promedio mensual en mayo por tener una temperatura exterior menor, por lo que si es una disipación de energía. La carga térmica debido al suelo es negativa para enero porque se tiene una

mayor temperatura para el suelo a diferencia de la temperatura del aire del invernadero, caso contrario para el mes de mayo donde sucede lo contrario, temperatura del suelo es menor a la temperatura del aire.

Para comparar si es necesario el uso de los equipos de calefacción y refrigeración, se analizan las ganancias y disipaciones de calor en los **Gráficos 3.4 y 3.5:**

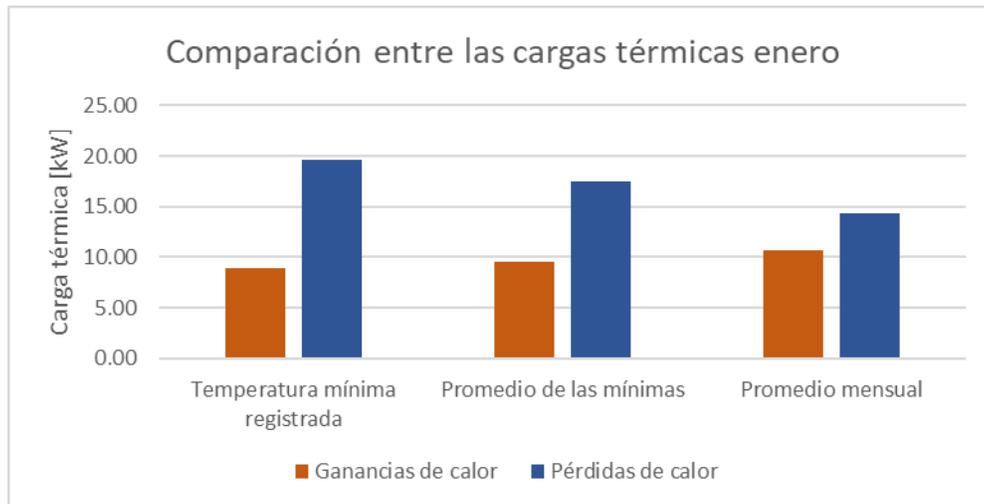


Gráfico 3.4 Comparación entre las cargas térmicas en enero

Se aprecia que, para enero, con las tres temperaturas de referencia, se tienen mayores disipaciones de energía por lo que hace necesario el uso de equipos de calefacción para mantener la temperatura de confort dentro del invernadero.

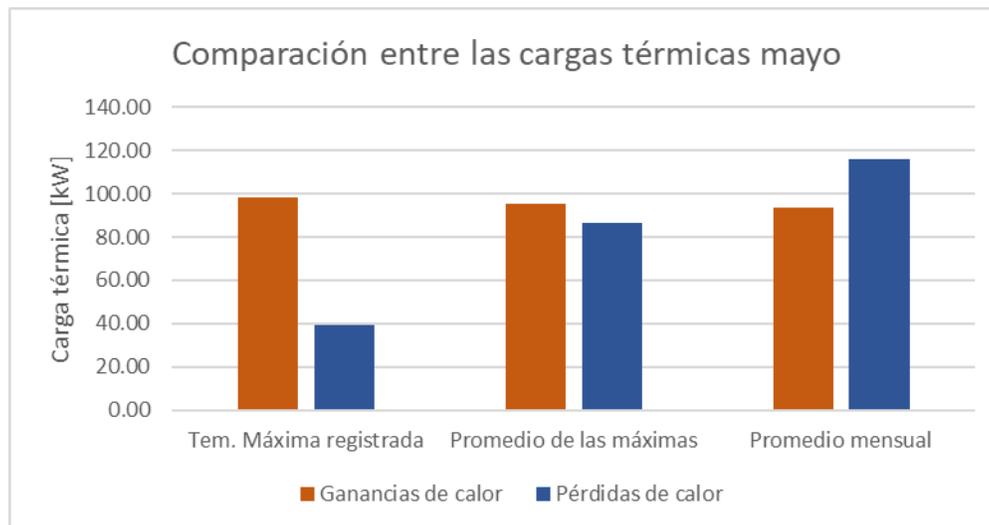


Gráfico 3.5 Comparación entre las cargas térmicas en mayo

Para el mes de mayo, se aprecia que con la temperatura promedio mensual, las pérdidas de calor son mayores a las ganancias por lo que se cubre la demanda de refrigeración únicamente con la ventilación natural. Para los casos de promedio de las máximas y máxima registrada, las ganancias son mayores por lo que es necesario el uso de equipo auxiliar para refrigerar el invernadero.

### 3.5.2 Comparación con Mexicali

Para comparar las cargas térmicas con el trabajo previo, se muestran en los **Gráficos 3.6 y 3.7** las cargas térmicas obtenidas para Mexicali y las del Domo de San Pedro

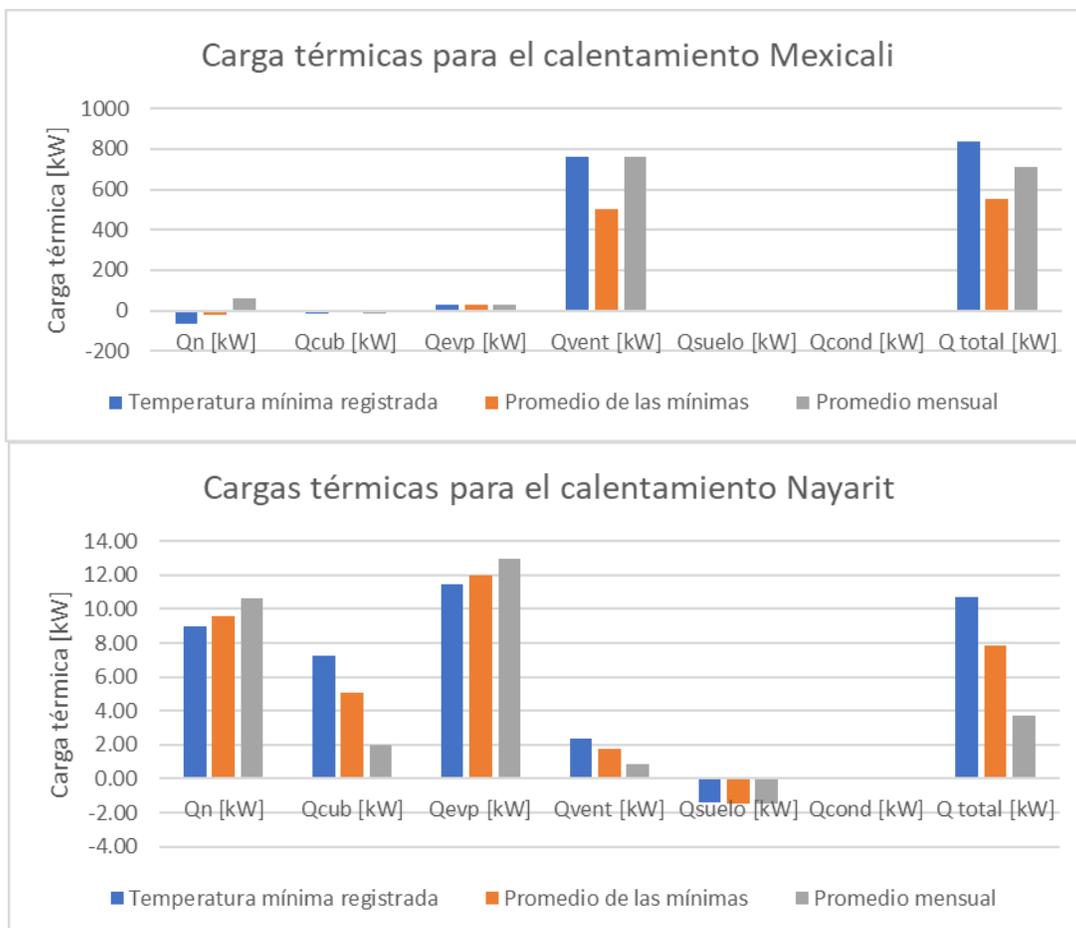


Gráfico 3.6 Comparación entre las dos locaciones para la calefacción

Se aprecia que las cargas térmicas son menores debido a que en Mexicali se tiene temperaturas menores a los 5 °C o incluso menores a 0 °C, por lo que se requiere de equipos de calefacción con mayor potencia, a diferencia de Nayarit. Las cargas negativas de radiación neta y calor cedido por la cubierta se deben a las temperaturas menores que tienen las dos regiones de estudio.

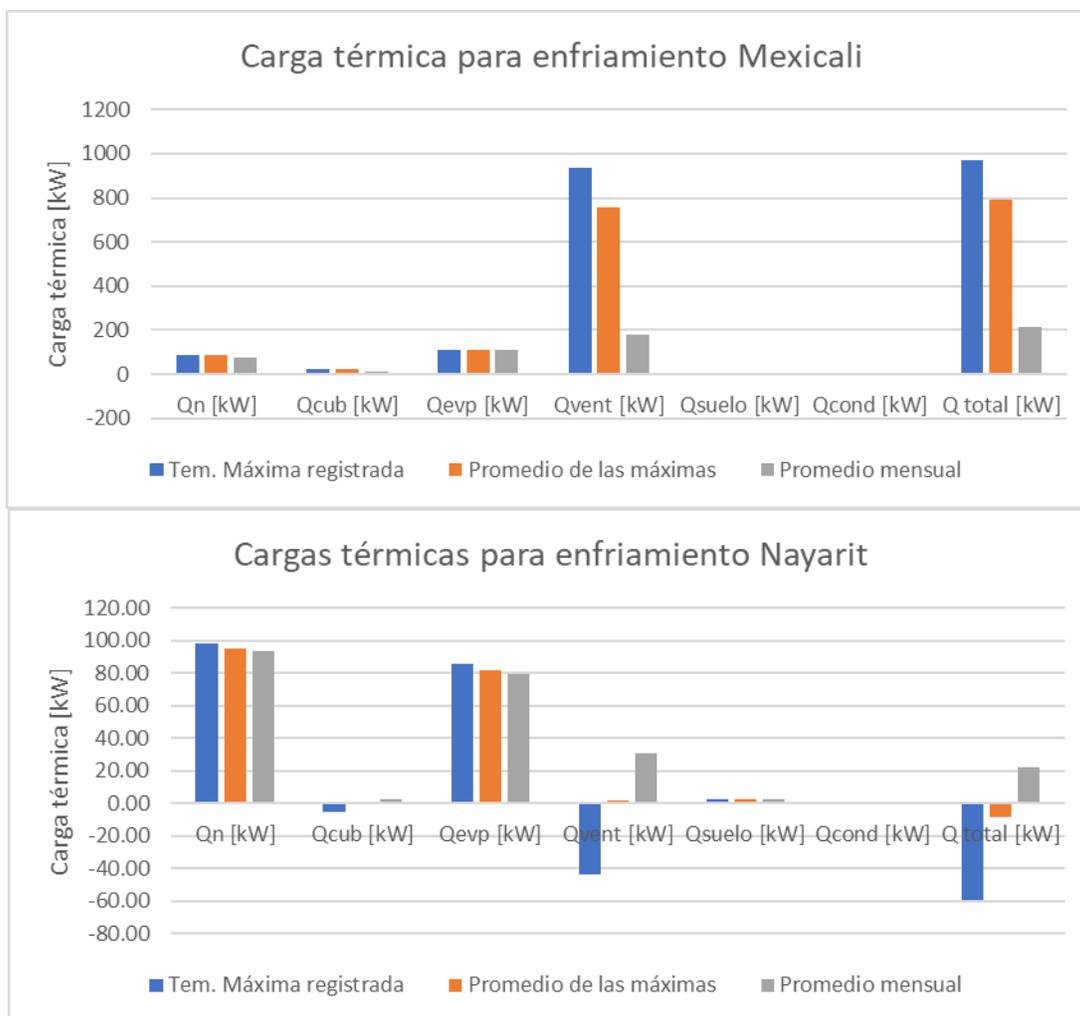


Gráfico 3.7 Comparación entre las dos locaciones para la refrigeración

Se observa que las cargas térmicas son mayores para Mexicali debido a que se tienen temperaturas ambientales mayores a 40 °C por lo que es necesario una mayor carga para refrigerar el invernadero. A diferencia de San Pedro Lagunillas, en Mexicali la mayor carga térmica se debe por la ventilación, debido a la entrada de aire con temperaturas mayores a las requeridas para el crecimiento de jitomate.

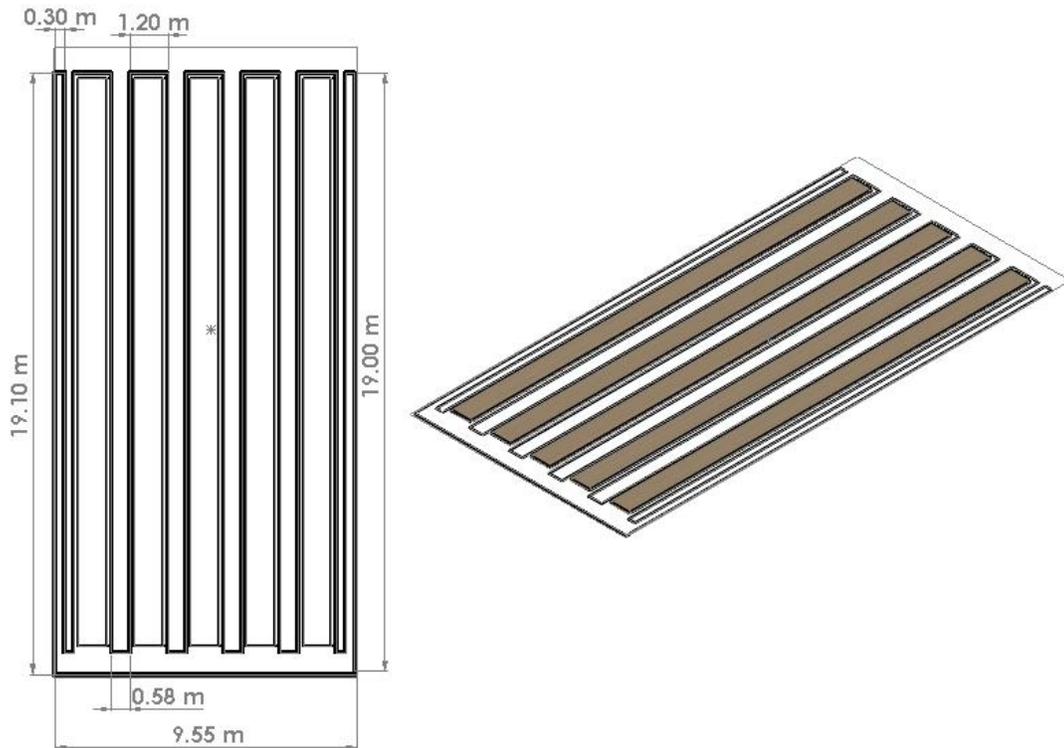
### 3.5.3 Calefacción

Para el caso de la calefacción se toma en consideración que las ventanas se encuentran cerradas, por lo que solo se tiene perdidas por renovación de aire debido a la infiltración y el sistema de nebulización esta apagado. Se considera el uso de tubería de acero para el transporte de agua, la temperatura de suministro de agua caliente será de 85 °C debido a que el pinch point o acercamiento de un intercambiador de calor de placas para calefacción de invernaderos es de 5 a 10 °C (Rafferty &

Boyd, 2008) ya que se cuenta con recurso geotérmico a 90 °C. Se considera el uso de una cisterna para almacenar el agua de trabajo.

Debido a que no se conoce la temperatura a la salida, longitud de la tubería ni el flujo másico, se considera que el calor requerido por el invernadero será el mismo que el obtenido en el intercambiador de calor. Se utiliza la ecuación 32 considerando a las temperaturas del pinch point y del ambiente, 85 y 25 °C respectivamente, por lo que se obtiene un flujo másico de  $0.04 \frac{kg}{s}$ . Como ya se tiene el flujo másico y la temperatura de salida que será igual al ambiente, se calcula la longitud necesaria para la tubería.

Se utiliza la máxima carga térmica debido a que, si no se entrega el calor necesario, se requiere del uso de equipos adicionales y para efectos de este estudio, toda la energía debe provenir del recurso geotérmico. Al resolver la ecuación 34, se obtiene que la longitud de la tubería necesaria es de 274.34 metros, para efectos prácticos será redondeado a 275 metros. En la **Figura 3.8** se muestra un esquema de cómo será el acomodo de las tuberías



*Fig. 3.8 Arreglo del sistema de tubería de calefacción para el invernadero*

Los resultados obtenidos para la temperatura promedio para este arreglo se muestran en la **Tabla 3.14**:

Tabla 3.14 Resultados para la calefacción

Punto de referencia	Q total [kW]	Temperatura promedio [°C]	Temperatura a la entrada [°C]	Temperatura a la salida [°C]	Flujo másico [ $\frac{kg}{s}$ ]	Flujo volumétrico [ $\frac{L}{hr}$ ]
Temperatura mínima registrada	10.72	55	80	25	0.05	167
Promedio de las mínimas	7.82	55	80	25	0.03	122
Promedio mensual	3.71	55	80	25	0.02	58

Se aprecia que el flujo másico requerido para los diferentes puntos de referencia son valores bajos, menores a  $1 \frac{kg}{s}$ , esto se debe porque las temperaturas no son tan extremas a diferencia de los resultados obtenidos en Mexicali, ya que en esa locación se alcanza temperaturas menores a 0 °C. El flujo que se requiere deberá ser controlado mediante la apertura y cierre de una válvula de bola.

### 3.5.4 Enfriamiento

Para el caso de la refrigeración se considera que las ventanas están completamente abiertas, el equipo de calefacción se encuentra apagado. Y recordando que, en caso de tener una carga total negativa, significa que se requiere del uso de nebulizadores, y en caso de tener valor positivo, significa que la ventilación es suficiente. Los resultados se muestran en la **Tabla 3.15**:

Tabla 3.15 Resultados para la refrigeración

Punto de referencia	Q total [kW]	Flujo másico [ $\frac{kg}{s}$ ]	Flujo volumétrico [ $\frac{L}{hr}$ ]
Temperatura Máxima registrada	-59.16	0.024	86.40
Promedio de las máximas	-8.65	0.004	14.40
Promedio mensual	22.42	No aplica	No aplica

Al igual que el sistema de calefacción, se elige el flujo volumétrico con el valor mayor, siendo este caudal el necesario para la selección del equipo. En el promedio mensual, la leyenda de “No aplica” se debe a que la temperatura externa del invernadero es menor a los 30°C, que es el set point para la activación de los nebulizadores. En la **Fig. 3.9** se muestra un esquema de los elementos necesarios para este sistema:

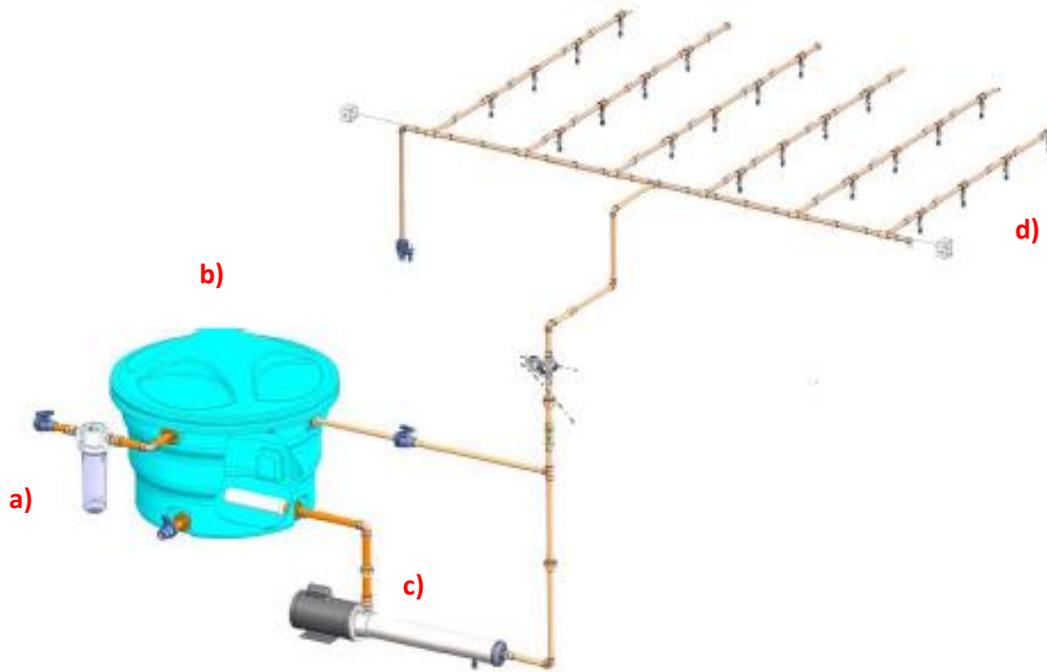


Fig. 3.9 Sistema de nebulización: a) filtro, b) cisterna, c) bomba, d) aspersores (Plasson, 2018)

Los elementos principales son el filtro, el tinaco para el almacenamiento del agua de enfriamiento, una bomba para el transporte de esta y los aspersores. Para conseguir el agua, es necesario que tenga la menor cantidad de minerales ya que afectarían al funcionamiento del sistema, por lo que se considera el uso de agua de lluvia y de pipas para llenar el tanque de agua debido a que la cantidad de sólidos disueltos del agua geotérmica del lugar son de  $4,000 \frac{mg}{l}$ , la cual puede dañar tanto el equipo, como a las plantas.

### 3.6 Equipos auxiliares

Para cubrir las demandas energéticas se deben considerar el uso de tres equipos auxiliares: intercambiador de calor de placas y dos sistemas de bombeo, uno para el agua de trabajo y otro para manejo del agua geotérmica. Estos serán explicados y calculados a continuación.

#### 3.6.1 Intercambiador de calor

En la mayoría de los proyectos de usos directos de la geotermia se utilizan los intercambiadores de calor para evitar problemas de corrosión en tuberías o equipos de bombeo. En la **Fig 3.10** Se muestra un esquema de los circuitos de agua para la calefacción de invernaderos

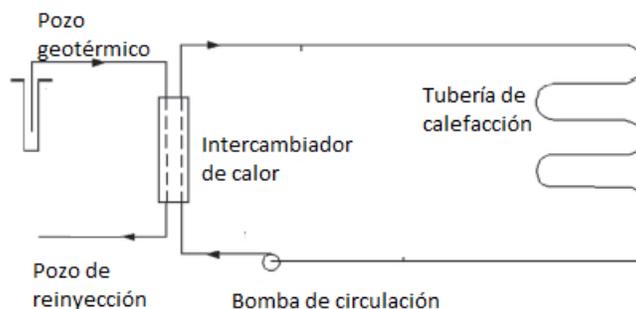


Fig. 3.10 Esquema del uso de intercambiadores de calor en invernaderos (Rafferty & Boyd, 2008)

Para la selección del intercambiador se debe conocer tanto la temperatura de suministro, como el acercamiento el cual depende del tipo del intercambiador, siendo la mínima diferencia de temperatura entre el fluido caliente y el frío. Para los intercambiadores de calor tipo placa, el acercamiento es de 5° a 10°; para los de tubo y coraza de 15° a 20°; mientras que intercambiadores caseros es de 20° a 40° (Ibíd, pp.4-4).

Como se mencionó anteriormente, se selecciona uno de placas por ser más económico, de fácil mantenimiento y en caso de requerir una mayor carga térmica, se le pueden adicionar placas para aumentar la superficie de transferencia de calor. En la literatura, se recomienda un acercamiento de 5° a 10° para este tipo de equipos al realizar el dimensionamiento, los proveedores proporcionarán el acercamiento real del equipo dependiendo de las condiciones del sitio y de operación. El recurso geotérmico se encuentra a 90 °C, por lo que la temperatura a la entrada de la tubería y superficial del tubo se consideran 85°C y se propuso que la temperatura del agua de la cisterna estaría a 25 °C y un flujo de agua de  $0.012 \frac{kg}{s}$ . Para conocer la temperatura a la que saldrá el recurso geotérmico se considera que se tiene tanto la misma carga térmica obtenida en la sección de calefacción y la misma cantidad de flujo de agua para evitar diferencia de presión y dañar el intercambiador. Usando la ecuación 32 con los datos de la información del fluido geotérmico, se tiene una temperatura a la salida de 29 °C.

Para conocer el tipo de intercambiador se utiliza el modelo propuesto por Juárez Andrade, Vladimir & Mendoza Mendo, Kukultzin (2015). Este método consiste en obtener de los catálogos de proveedores as características geométricas de un modelo de intercambiador y calcular la cantidad de placas necesarias mediante un proceso de iteración.

Para conocer la cantidad de placas necesaria se debe calcular la superficie de transferencia de calor mediante la **Ec. 42**:

$$Q = A_{inter} * U_{inter} * \Delta T_{ml} \quad \text{Ec. 42}$$

Donde la carga térmica (Q) es la misma que la requerida para la calefacción del invernadero, la superficie de transferencia ( $A_{inter}$ ) depende de las características geométricas y numero de placas del intercambiador, el coeficiente de transferencia de calor general ( $U_{inter}$ ) depende del material del

intercambiador, tipo de fluido y del coeficiente de transferencia de calor convectivo tanto del fluido geotérmico como del agua de trabajo, la diferencia de temperatura logarítmica ( $\Delta T_{ml}$ ) es un método de análisis entre el fluido caliente y el frío con el fin de determinar la fuerza de transferencia de calor.

Para conocer el coeficiente de transferencia de calor general se utiliza la **Ec. 43**:

$$U_{inter} = \frac{1}{\frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_c} + \frac{t}{k_m} + R_{fh} + R_{fc}} \quad \text{Ec. 43}$$

Los coeficientes convectivos tanto del fluido geotérmico ( $h_h$ ) y del agua del invernadero ( $h_c$ ) se obtienen mediante las ecuaciones 37 y 40. El espesor de la placa ( $t$ ) y la conductividad del material ( $k_m$ ) dependerán del fabricante, mientras que los factores de ensuciamiento del fluido geotérmico ( $R_{fh}$ ) y del invernadero ( $R_{fc}$ ) son valores que afectan al funcionamiento del intercambiador y depende del tipo de fluido. Para el fluido geotérmico se toma el valor de  $0.000084 \frac{m^2 K}{W}$  y para el fluido de trabajo el valor de  $0.000011 \frac{m^2 K}{W}$  (Rodríguez Zárate, 2013).

Los coeficientes convectivos se obtienen mediante la ecuación 37 donde se debe de conocer el número de Nusselt, la conductividad del agua y el diámetro hidráulico del intercambiador. Para conocer el número de Nusselt se utiliza la aproximación propuesta por Juárez Andrade, Vladimir & Mendoza Mendoza, Kukultzin (2015)

$$Nu = 0.2267 * Re^{0.631} * Pr^{1/3} \quad \text{Ec. 44}$$

Esta aproximación es válida para intercambiadores de calor con un Reynolds entre 50 y 15,000 y para ángulos de chevron de 60°. Este ángulo es un parámetro de los diseñadores que caracteriza la mejora de la turbulencia en el intercambiador, por lo tanto, mejorando la transferencia de calor entre las placas. Se toma como referencia los 60°, ya que, de acuerdo a información recabada de proveedores, es el valor más comercial.

Para conocer Reynolds se utilizan las **Ecs. 45 y 46** propuestas por Rodríguez Zárate (2013):

$$Re = \frac{G_g * D_e}{\mu} \quad \text{Ec. 45}$$

$$Re = \frac{G * D_e}{\mu} \quad \text{Ec. 46}$$

Siendo la ecuación 45 para el fluido geotérmico y la 46 para la del agua de trabajo. Ambas ecuaciones dependen del diámetro efectivo y de la viscosidad dinámica del fluido. El otro parámetro es el flujo másico por unidad de área entre cada placa. Este valor depende del número de placas ( $N$ ), flujo masico obtenido previamente ( $m$ ) y del área libre entre las placas ( $A_0$ ).

Para obtener el flujo másico se utilizan las **Ecs. 47 y 48**:

$$G_g = \frac{m \cdot 2}{A_0 \cdot \frac{N}{2}} \quad \text{Ec. 47}$$

$$G = \frac{m \cdot 2}{A_0 \cdot \frac{N-2}{2}} \quad \text{Ec. 48}$$

Para conocer el área libre entre las placas se utiliza la **Ec. 49**:

$$A_0 = b \cdot W \quad \text{Ec. 49}$$

Este valor depende del ancho de la placa, dependiendo del modelo seleccionado, y del alto efectivo del canal (b) que se obtiene mediante la **Ec. 50**:

$$b = P - t \quad \text{Ec. 50}$$

Se obtiene mediante la altura total del corrugado (P) y del espesor de la placa (t), que al igual que el ancho de la placa (W), depende del modelo del intercambiador.

Para conocer el diámetro efectivo se usa la **Ec. 51**:

$$D_e = 2 \cdot b \quad \text{Ec. 51}$$

Como se había mencionado anteriormente, para conocer el coeficiente convectivo se había mencionado que se debe utilizar el diámetro efectivo, el cual se calcula mediante la **Ec. 52**:

$$D_h = \frac{D_e}{\varphi} \quad \text{Ec. 52}$$

Este parámetro depende del diámetro efectivo y del factor de alargamiento de la superficie, que es un valor que depende de características específicas de los fabricantes, pero para efectos de facilidad se toma un valor de 1.22 (Juárez Andrade & Mendoza Mendoza, 2015).

Mediante el uso de las ecuaciones mencionadas se obtiene la superficie total de transferencia de calor del intercambiador. Para conocer el número de placas reales se procede a calcular el área de transferencia proyectada debido al factor de alargamiento ( $\varphi$ ), el cual es un parámetro que vincula la longitud desarrollada debido a las ondulaciones con la longitud proyectada de una placa plana, ya que las placas no son completamente planas; y el área proyectada de cada placa mediante las **Ec. 53** y **54**:

$$A_p = \frac{A_{inter}}{\varphi} \quad \text{Ec. 53}$$

$$A_{pp} = W \cdot L_e \quad \text{Ec. 54}$$

Donde el área proyectada de la placa depende del ancho de la placa y de la longitud vertical entre los puertos del intercambiador. Calculando el cociente de estas áreas, se obtiene el número de placas necesarios para el intercambiador:

$$N = \frac{A_p}{A_{pp}} \quad \text{Ec. 55}$$

De esta manera se procede a realizar el método iterativo para conocer la cantidad de placas necesarias del intercambiador.

Para este estudio se escoge de primera instancia la compañía Alfa Laval el modelo M3 con las siguientes características:

*Tabla 3.16 Características del intercambiador de calor (Alfa Laval, 2015)*

Temperatura máxima de trabajo [°C]	85 a 140
Material de las placas	Acero inoxidable AISI 316
Conexiones de rosca [inch]	1 1/4
Anchura de canal (P) [mm]	3
Espesor (t) [mm]	0.4
Ancho de la palca (W) [mm]	190
Longitud vertical entre puertos (L <sub>e</sub> ) [mm]	668
Número máximo de placas del modelo	45

Para una primera iteración se eligen 10 placas y se sigue calculando hasta que el porcentaje de error sea menor o igual a 5%. En caso de que se requieran un mayor número de placas que los permitidos, se escoge otro modelo y se itera hasta obtener los números de placas necesarios.

Otro parámetro que se debe de calcular es la caída de presión, la cual servirá para la selección del equipo de bombeo. Para conocer este valor se utiliza la **Ec. 56**:

$$\Delta P = \frac{1.4 \cdot G^2 \cdot N}{2 \rho_i} + \frac{4 \cdot f_{inter} \cdot L \cdot G^2}{2 D_e} \left(\frac{N}{\rho}\right)_m + \left(\frac{1}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_i}\right) \frac{G^2}{g} + \frac{\rho_m \cdot G \cdot L}{g} \quad \text{Ec. 56}$$

Donde cada uno de los terminos son: el flujo másico por unidad de área en entradas (G) obtenida de la ecuación 48, el número de placas (N) obtenido de la ecuación 55, la longitud de la placa efectiva (L) que depende del modelo y del fabricante, el diámetro efectivo (D<sub>e</sub>) obtenido en la ecuación 51, la aceleración de la gravedad que se considera como un valor contante de 9.81  $\frac{m}{s^2}$ , la densidad tanto a la

entrada como a la salida ( $\rho_i$  y  $\rho_o$ , respectivamente) depende de la temperatura en estos puntos, la densidad media ( $\rho_m$ ) obtenida como el promedio entre la entrada y salida del intercambiador .

Y la correlación de la caída de presión ( $f$ ) se obtiene mediante correlaciones, se usará la misma que se menciona en el trabajo de Juárez Andrade, Vladimir & Mendoza Mendo, Kukultzin (2015):

$$f_{inter} = 0.572 * Re^{-0.217} \quad \text{Ec. 57}$$

Esta correlación se utiliza cuando el número de Reynolds es mayor a 550 y para ángulos de chevrón de 60°.

Se enlistan los resultados para el intercambiador de calor en la **Tabla 3.17**:

Tabla 3.17 Requerimientos para el intercambiador de calor

Parámetro	Valor
Carga térmica [kW]	10.72
Temperatura del agua geotérmica a la entrada [°C]	90
Temperatura del agua geotérmica a la salida [°C]	40
Temperatura del agua del invernadero a la entrada del intercambiador [°C]	25
Temperatura del agua del invernadero a la salida del intercambiador [°C]	85
Número de placas	19
Área de transferencia [m <sup>2</sup> ]	0.51
$\Delta P$ [kPa]	10.11

### 3.6.2 Equipos de bombeo

Para lograr el transporte del agua de calefacción se requiere del uso de una bomba por su transporte. Para conocer la carga que debe de vencer se utiliza la **Ec. 58**:

$$H_b = \frac{P}{\rho * g} + \frac{v^2}{2g} + z + H \quad \text{Ec. 58}$$

Cada uno de los términos representa un tipo de carga: el primero hace mención a la carga de presión, el segundo término es la carga de velocidad, el tercero es la carga de posición que se mide desde el

nivel de referencia y el último son las pérdidas lineales en la tubería y por los accesorios. Obteniendo esta carga y con el flujo volumétrico se puede obtener el equipo que mejor se adapte al proyecto.

La presión (P) se obtiene mediante la caída de presión en el intercambiador de calor mediante la ecuación 56, la velocidad es la misma que la utilizada para el cálculo del calor emitido por la tubería de calefacción y la altura entre el nivel de referencia y el equipo de bombeo es despreciable debido a que el tanque del agua y la bomba se encuentra a la misma altura. La densidad se considera a la temperatura promedio del agua de calefacción.

Para conocer las pérdidas en tubería y accesorios se utiliza la **Ec. 59**:

$$h = f \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ec. 59}$$

El diámetro (D) es el mismo tanto en la tubería como en los accesorios, siendo para este estudio un diámetro de una pulgada. La velocidad (v) es la misma que en la del calor emitido por la tubería.

El factor de fricción depende principalmente del material de la tubería, su diámetro interno y el régimen del flujo. Se utiliza la correlación de Churchill la cual se utiliza para todos los rangos de rugosidad y regímenes de flujo (Anaya Durand, Cauich Segovia, Funabazama Bárcenas, & Gracia Medrano Bravo, 2014), **Ecuaciones 60-62**:

$$f = 8 \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-1.5} \right]^{1/12} \quad \text{Ec. 60}$$

$$A = \left\{ -2.457 \ln \left[ \left( \frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{\epsilon}{D} \right] \right\}^{16} \quad \text{Ec. 61}$$

$$B = \left( \frac{37.530}{Re} \right)^{16} \quad \text{Ec. 62}$$

Para el caso de régimen turbulento, el factor de fricción depende del diámetro interno y de la rugosidad absoluta la cual depende del material. En la **Tabla 3.15** se muestran algunos valores de diferentes tipos de materiales:

*Tabla 3.18 Rugosidad absoluta de diferentes materiales (Universidad de la República, 2015)*

Material	$\epsilon$ (mm)
Plástico (PE, PVC)	0.0015
Acero comercial y forjado	0.03 a 0.09
Hierro forjado	0.03 a 0.09
Tubos estirados de acero	0.0024
Latón o cobre	0.0015
Fundición	0.12 a 0.6

Para este estudio se consideró el siguiente circuito, tomando como referencia la **Figura 3.8**:

- 278 metros de tubería
- 30 codos a 90°
- Una válvula de bola de 1 pulgada
- Una reducción de 1 ¼ de pulgada a 1 pulgada, esta se debe colocar para el intercambiador que cuenta con conexiones de 1 ¼.
- Material: acero inoxidable

Los resultados se muestran en la **Tabla 3.19**:

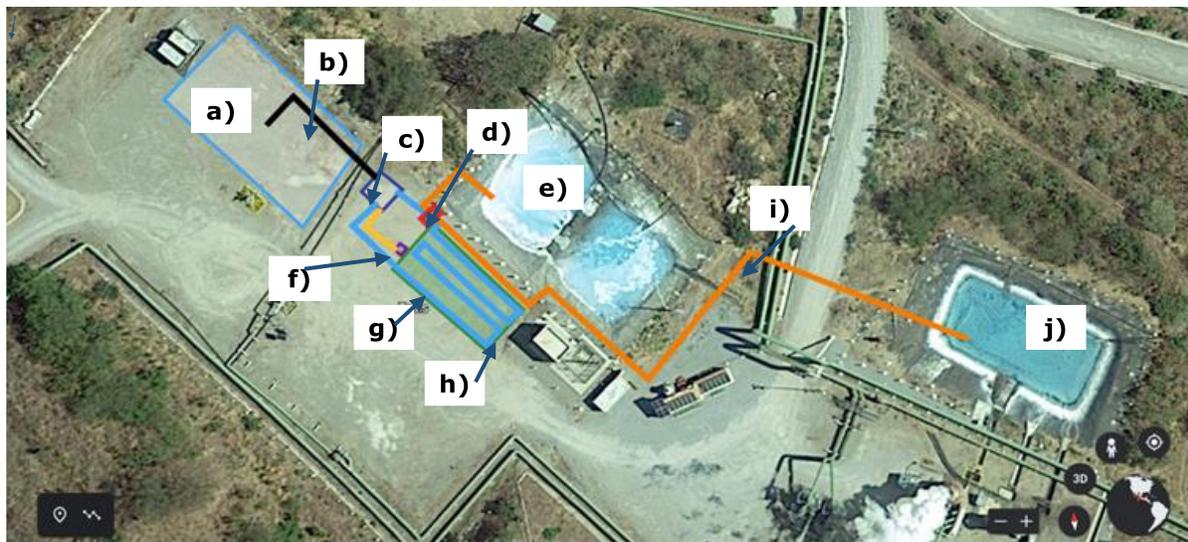
*Tabla 3.19 Selección del equipo de bombeo*

Parámetro	Valor
Presión en el sistema (debida al intercambiador) [kPa]	10.11
Velocidad en el sistema $\left[\frac{m}{s}\right]$	0.082
Perdidas primarias [m]	0.15
Pérdidas secundarias [m]	0.01
Rugosidad absoluta (acero comercial) [mm]	0.03
Diámetro interno [mm]	25.4
Carga a suministrar [m]	1.07

Para evitar daños al intercambiador de calor, se debe tener el mismo flujo en ambos lados. La caída de presión será la misma, pero se considera solamente una longitud de tubería de 32 metros que será para llevar al agua a un segundo cárcamo, 5 codos y el material será acero inoxidable. Siguiendo el mismo procedimiento, se obtiene que la carga de la bomba será de 2.46 metros.

### 3.7 Lista de material requerido

En la **Fig. 3.11** se muestra un croquis del proyecto, con el fin de conocer el sitio de estudio, y principalmente las medidas del sistema de tubería.



*Fig. 3.11 Croquis de la propuesta del proyecto: a) cárcamo de agua de lluvia, b) tubería del cárcamo al tanque de agua dulce, c) tanque de agua dulce, d) intercambiador de calor, e) cárcamo de agua geotérmica, f) sistema de tubería y tanque de agua para sistema de riego y nebulizadores, g) Invernadero, h) tubería de calefacción, i) tubería geotérmica, j) cárcamo de reinyección*

A continuación, se muestra una lista de los materiales y equipos necesarios para la realización del proyecto. Para la longitud de la tubería, se toma un factor de seguridad de 1.25, debido a que no se cuenta con un plano exacto del terreno y se toma como referencia a la **Figura 3.11** para este listado:

- Rollo de 100 kg de cubierta plástica de polietileno, las medidas del rollo son de 6.2 metros de largo por 88 metros de largo. (Se deberá comprar cada 2 años)
- 2 malacates mecánicos
- Herramientas varias: pinzas de corte, desarmador, segueta, palas, cúter
- 328 metros de tubería de acero de 1 pulgada
- 192 metros de tubería de acero inoxidable de 1 pulgada
- 36 metros de tubería de pvc hidráulico de 1 ¼ de pulgada
- 30 codos a 90° de acero al carbón
- 6 codos a 90° de acero inoxidable
- 6 codos a 90 ° de pvc hidráulico

- Una válvula de bola de 1 pulgada
- Una reducción de 1 ¼ de pulgada a 1 pulgada
- Bomba hidráulica de 1.19 y otra de 1.05 metros de carga
- Intercambiador de calor de placas, modelo T2 con 10 placas
- Sistema de nebulización para un total de 86.5 L/h
- Tanque con capacidad mínima de 16,128 litros
- Kit de sistema de riego por goteo
- Invernadero asimétrico, para este estudio, se buscará que los fabricantes ofrezcan materiales, y transporte hasta el área de estudio, también se solicitará la cotización del montaje para tener un costo de referencia.
- Cárcamo de 500 m<sup>2</sup>
- 2 bombas hidráulicas de 10 GPM, uno para agua dulce y otro para agua geotérmica
- Motobomba centrífuga 1/4 Hp
- Motobomba centrífuga de 2 Hp
- Semillas de rosas tipo híbrida de té
- Sustrato y plaguicidas específicas para cultivos de rosas
- Equipo de protección para manejo de insecticidas: bota, overol, guantes y gafas.

### 3.8 Recapitulación

A manera de sumario de este capítulo, en las **Tablas 3.20 y 3.21** se enlistan las consideraciones técnicas y los resultados de este capítulo:

*Tabla 3.20 Recapitulación de los parámetros del proyecto*

Marco	Concepto	Valor
Parámetros del cultivo de rosa en invernadero	Temperatura máxima de desarrollo diurna de la rosa [°C]	30
	Temperatura nocturna óptima de desarrollo de la rosa [°C]	16
	Temperatura óptima del suelo para cultivo de rosas [°C]	21
	Humedad relativa óptima en invernadero para rosas [%]	70
	Índice de área foliar [1]	2.6
	Coficiente de la cubierta vegetal para la radiación solar de la rosa [1]	0.718
	Coficiente de crecimiento inicial del cultivo de rosas [1]	0.58
	Coficiente de crecimiento a la mitad de desarrollo del cultivo de rosas [1]	1.13
Consideraciones de diseño para el invernadero	Ancho [m]	9.6
	Largo [m]	20
	Altura al Zenit [m]	6.4
	Altura debajo del canal [m]	4
	Distancia entre pilares [m]	2
	Área total del piso del invernadero o captadora de la energía solar [m <sup>2</sup> ]	192
	Área de siembra [m <sup>2</sup> ]	144.36
	Área de la ventana lateral [m <sup>2</sup> ]	77.4
	Área de la ventana cenital [m <sup>2</sup> ]	24
Altura entre ventanas [m <sup>2</sup> ]	4.88	

	Volumen del invernadero [m <sup>3</sup> ]	1100
	Tasa de renovación de aire por infiltración [ $\frac{1}{h}$ ]	1
	Coefficiente de efecto de viento o eólico [1]	0.14
	Coefficiente de caída de presión en las ventas del invernadero [1]	0.6
Parámetros de la cubierta plástica	Cubierta plástica	Polietileno
	Coefficiente de transmisión de radiación solar de la cubierta [1]	0.88
	Espesor de la cubierta [mm]	0.1
	Conductividad térmica de la cubierta [ $\frac{W}{mK}$ ]	0.33
	Absorvidad de radiación solar de la cubierta [1]	0.03
	Emisividad térmica de la cubierta [1]	0.2
Condiciones edafoclimáticas del sitio de estudio	Temperatura mínima absoluta registrada [°C]	9
	Temperatura mínima promedio de las temperaturas mínimas del mes más frío [°C]	10.77
	Temperatura mínima promedio del mes más frío [°C]	13.5
	Temperatura máxima absoluta registrada [°C]	35
	Temperatura máxima promedio de las máximas del mes más cálido [°C]	30.17
	Temperatura máxima promedio del mes más cálido [°C]	27.16
	Velocidad del viento del mes más frío [ $\frac{m}{s}$ ]	2.13
	Velocidad del viento del mes más cálido [ $\frac{m}{s}$ ]	2.51
	Humedad relativa exterior del mes más frío [%]	58.92
	Humedad relativa exterior del mes más cálido [%]	46.62
	Radiación solar del mes más frío [ $\frac{W}{m^2}$ ]	0
	Radiación solar del mes más cálido [ $\frac{W}{m^2}$ ]	583.4

Análisis tecno-económico de un sistema de invernadero para cultivo de plantas ornamentales mediante el aprovechamiento de recurso geotérmico de baja entalpia

	Tipo de suelo	Tierra seca
	Conductividad térmica del suelo $\left[\frac{W}{mK}\right]$	1.0
	Albedo de la tierra	0.17
	Profundidad a la que se estima la temperatura del suelo [m]	0.5
Parámetros de la tubería	Material de la tubería de calefacción	Acero al carbón
	Conductividad térmica de la tubería $\left[\frac{W}{mK}\right]$	60.50
	Flujo másico $\left[\frac{kg}{s}\right]$	0.046
	Emisividad de la tubería [1]	0.32
	Cédula de la tubería	40
	Diámetro nominal [pulgada]	1
	Rugosidad absoluta [mm]	0.03
Parámetros del intercambiador de calor	Temperatura del recurso [°C]	90
	Acercamiento [°C]	10
	Modelo del intercambiador de placas	Alfa Laval-T2
	Temperatura máxima de trabajo [°C]	130
	Material de las placas	Acero inoxidable AISI 316
	Conexiones de rosca [pulgadas]	3/4
	Anchura de canal [mm]	2.4
	Espesor mm]	0.5
	Ancho de la palca[mm]	140
	Longitud vertical entre puertos [mm]	298
	Número máximo de placas del modelo	25
	Factor de alargamiento [1]	1.22

Los resultados obtenidos son:

Tabla 3.21 Resultados del proyecto

Concepto	Valor
Carga térmica a suministrar (Temperatura mínima registrada) [kW]	10.72
Carga térmica a suministrar (Temperatura promedio de las mínimas) [kW]	7.82
Carga térmica a suministrar (Temperatura promedio mensual) [kW]	3.71
Carga térmica a disipar (Temperatura máxima registrada) [kW]	59.16
Carga térmica a disipar (Temperatura promedio de las máximas) [kW]	8.65
Carga térmica a disipar (Temperatura promedio mensual) [kW]	No aplica
Flujo másico del agua caliente $\left[\frac{kg}{h}\right]$	167.2
Flujo volumétrico del agua caliente $\left[\frac{l}{h}\right]$	180
Flujo másico de los nebulizadores $\left[\frac{kg}{h}\right]$	87.21
Flujo volumétrico de los nebulizadores $\left[\frac{l}{h}\right]$	86.4
Longitud de la tubería dentro del invernadero [m]	257
Modelo del intercambiador de placa	T2
Número de placas	10
Superficie de transferencia de calor [m <sup>2</sup> ]	0.51
Longitud total de la tubería de agua caliente [m]	280
Carga de la bomba agua dulce [m]	1.07
Potencia de la bomba de agua dulce [hp]	1/25
Longitud de la tubería de agua geotérmica [m]	132
Flujo másico del agua geotérmica $\left[\frac{kg}{h}\right]$	183.92
Flujo volumétrico del agua geotérmica $\left[\frac{l}{h}\right]$	183.6
Carga de la bomba [m]	0.97
Potencia de la bomba de agua geotérmica [hp]	0.183

### 3.9 Esquema de operación

Se mostrará de manera ejemplificada un esquema de cómo será el proceso de operación y control del invernadero geotérmico, el funcionamiento del proyecto y del sistema de climatización del invernadero, ver **Fig. 3.12 a 3.14:**

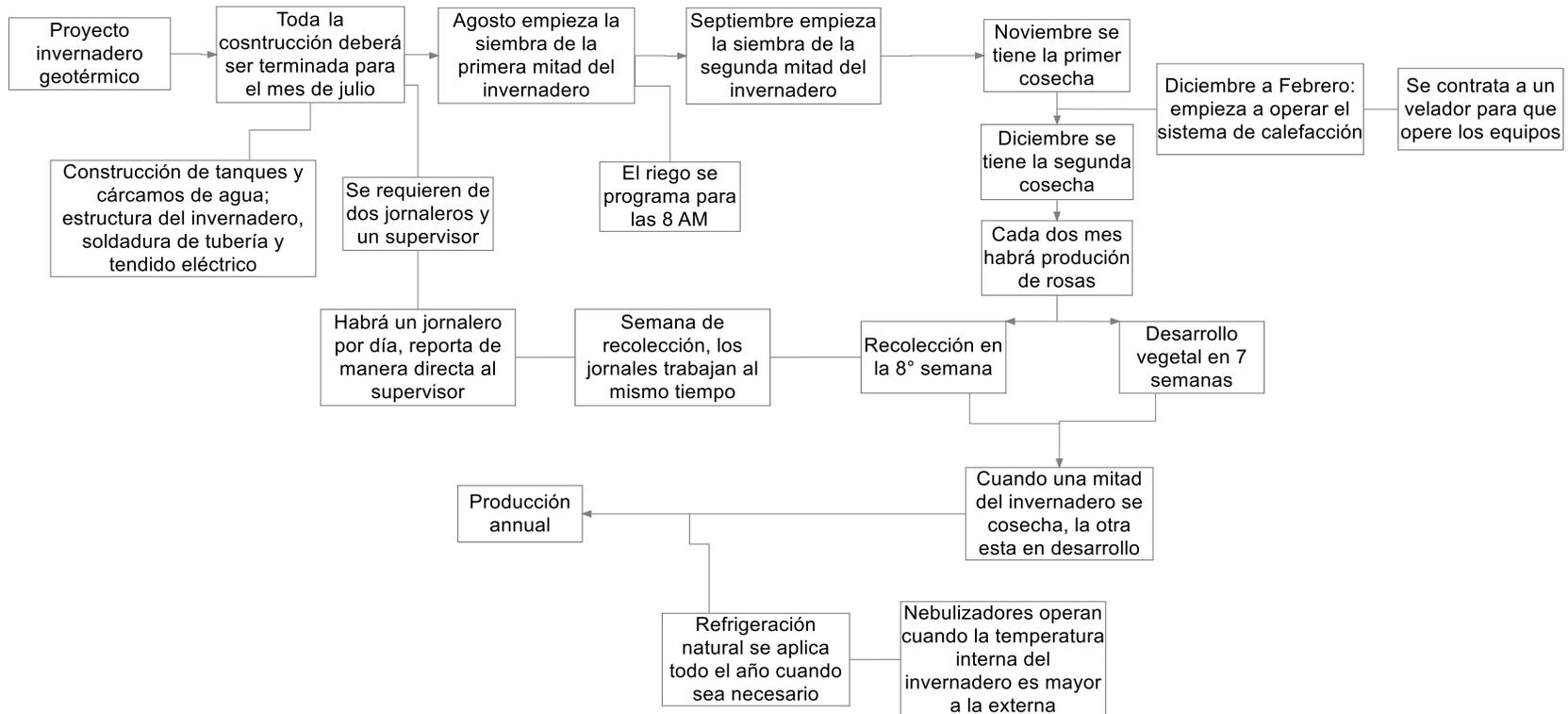


Fig. 3.12 Esquema del proceso del proyecto (Elaboración propia)

La elección de riego en la mañana es para evitar la transpiración del agua debida a la energía solar. La elección de regar un máximo de 5 días se explicará en el próximo capítulo.



El proceso de operación y control del invernadero será de la siguiente manera:

- Con un termómetro dentro y fuera del invernadero se llevará registro de las temperaturas
- Cuando la temperatura exterior sea menor a la de confort nocturna de la rosa se deberá activar el sistema de calefacción para mantener la temperatura dentro del invernadero en 16 °C. En caso de que no se tenga temperaturas menores a los 16°C, el equipo de calefacción no será encendido. El tiempo que deberán permanecer encendidos será igual a la cantidad de horas en que la temperatura externa sea menor a la referencia.
- Para el caso en que la temperatura interna sea mayor a la máxima biológica (30°C), se deberán abrir las ventanas para la renovación de aire externo a menor temperatura, pero en caso de que la temperatura externa sea mayor, se deberán accionar los nebulizadores para evitar que la temperatura aumente.
- Si la temperatura externa no alcanza ningún de los valores antes mencionados, los equipos de climatización no se deberán activar.

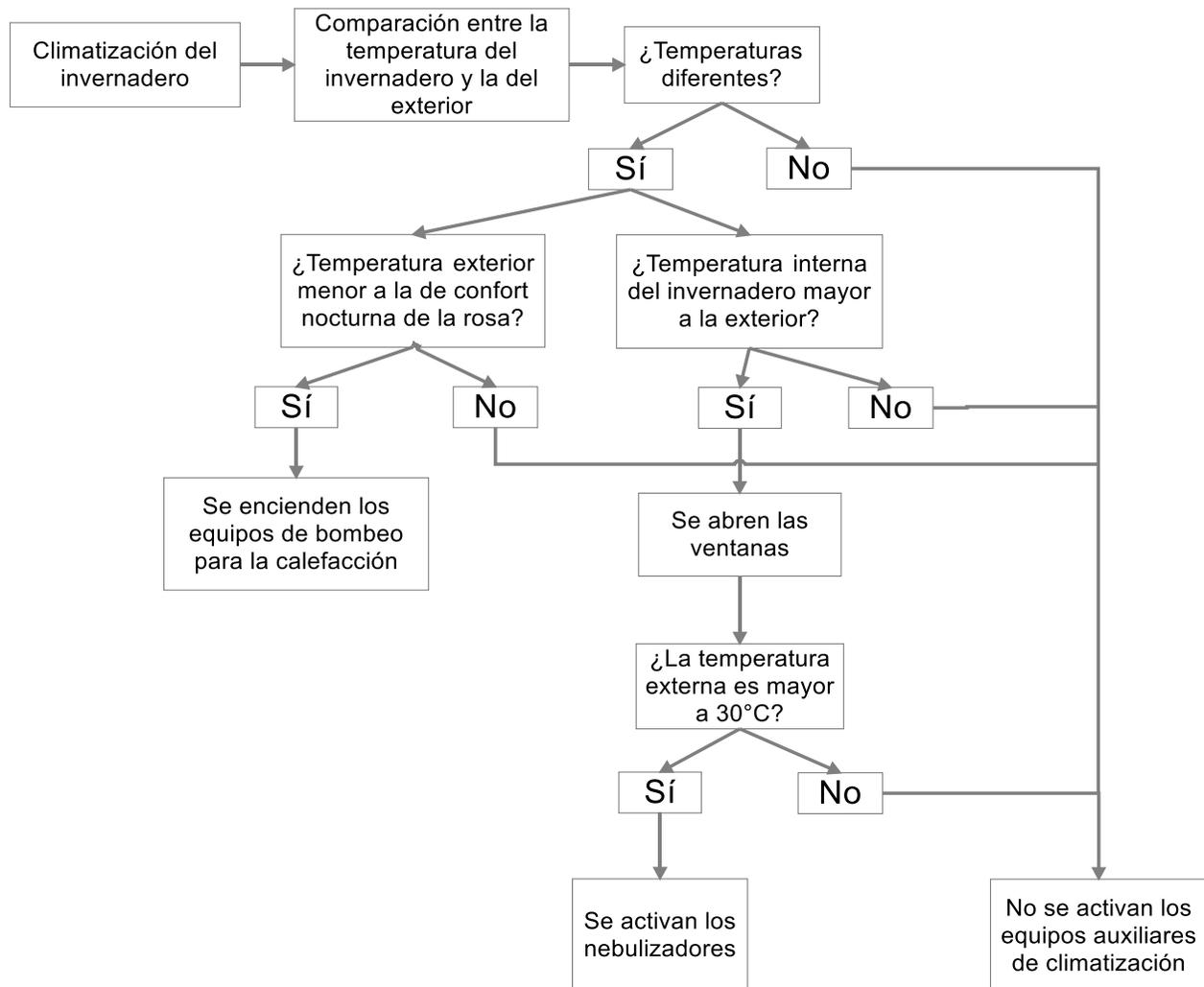


Fig. 3. 14 Funcionamiento del sistema de climatización

Como primer acercamiento, los equipos deberán ser operados manualmente, esto será cubierto por los jornaleros y el velador.

## Conclusiones

De la temática que se abordan en este capítulo se sintetizan los siguientes puntos:

- Para la región de estudio, de diciembre a febrero son los meses que se utilizaría para la calefacción por ser los meses con las temperaturas más bajas, principalmente en enero.
- Se diseña en base al mes de enero por ser el más frío, por lo que, cubriendo las necesidades de este mes, se cubren las de calefacción de todo el año.
- Se logra cubrir la demanda de calefacción con recurso geotérmico de baja entalpia.
- Debido a la diferencia de temperatura entre el agua a temperatura ambiente y el acercamiento del intercambiador, se requiere de varios tramos de tubería. Se debe considerar los usos en cascada para que la temperatura a la salida del invernadero sea mayor, con el fin de reducir la longitud total de la tubería
- De marzo a junio son las épocas del año donde se alcanzan temperaturas mayores a la máxima biológica de la rosa, que pueden dañar a los cultivos.
- Es posible cubrir parte de la refrigeración mediante la ventilación natural, pero para el caso de mayo, es necesario usar el sistema de nebulización propuesto en el trabajo previo para cubrir la demanda energética.
- Se muestra una lista detallada de los materiales y equipos necesarios para la realización del proyecto, a diferencia del trabajo previo.
- Para este estudio, se propone el funcionamiento de manera manual de los equipos, ya que no se considera el uso de equipos de automatización.
- Se deberá realizar un levantamiento del terreno con el fin de conocer las medidas correctas para la longitud de las tuberías.

## Capítulo 4 Análisis económico

En este capítulo se realizará un análisis de los equipos y materiales que se emplearán para el proyecto de acuerdo a los cálculos del capítulo anterior. Se enlistará la cotización de los materiales, equipos, mano de obra y costos de producción. Se realizará un análisis económico con base en la producción de rosas para un periodo de 10 años y una comparación entre la producción de jitomate y de rosas.

### 4.1 Costos e inversiones del proyecto

Los costos para el proyecto se definen como el gasto económico necesario para lograr la producción del cultivo dentro del invernadero:

- Insumos agrícolas como semillas, pesticidas, abonos y película plástica del invernadero.
- Gastos debido a la energía eléctrica y al agua; tanto el agua geotérmica como el agua dulce.
- Mano de obra.
- Mantenimiento del invernadero y los equipos.
- Depreciación y amortización.

Las inversiones o gastos fijos engloban todo el material y equipo necesarios para la realización del proyecto, estos son:

- Montaje y costo del invernadero.
- Equipos de riego.
- Equipos auxiliares, que consisten en los equipos de climatización.
- Montaje y puesta en marcha del sistema de tuberías y el tendido eléctrico para los equipos que requieren electricidad.
- Costo de la ingeniería.
- Capital de trabajo.

Cada uno será desglosado a continuación y se pondrá una lista de los costos de cada uno de los equipos y del personal necesario.

### 4.2 Inversiones del proyecto

Las inversiones se dividen en dos:

- Fijas: las cuales son todos los bienes tangibles del proyecto.
- Diferidas: son todos los bienes y servicios intangibles del proyecto.

#### 4.2.1 Inversiones fijas

Estas inversiones hacen referencia a los diferentes equipos de bombeo, la estructura y equipos adicionales del invernadero y los equipos de climatización.

Para una mayor facilidad, se dividen en tres rubros las inversiones fijas:

- Red de sistema de calefacción: contiene al intercambiador de calor, la bomba centrífuga para el agua de calefacción y la red de tubería necesaria.
- Invernadero: implica la estructura, flete y montaje, ya que se cotizo con empresas fabricantes de éstos, los dos tanques de agua, el sistema de riego por goteo, herramientas varias, termómetro e higrómetro, un almacén para guardar las herramientas e insumos agrícolas.
- Red de toma geotérmica: bomba centrífuga y la red de sistema de tubería. Ambos deben ser de materiales resistentes a la corrosión.

#### 4.2.2 Inversiones diferidas

Hacen referencia al costo de instalación del sistema de tubería, tendido eléctrico para los diferentes equipos como las bombas, ambos fueron cotizados con terceros, el pago del contrato para servicios de agua potable y el costo de la ingeniería del proyecto.

#### 4.2.3 Total de las inversiones

En la **Tabla 4.1** se enlistan cada una de las inversiones necesarias para el proyecto:

Tabla 4.1 Inversiones fijas del proyecto<sup>7</sup>

	Cantidad	Costo Unitario	Total
<b>Inversiones Fijas</b>			<b>\$508,014.46</b>
<b>Red sistema de calefacción</b>			<b>\$78,432.23</b>
Intercambiador de placas	1	\$45,277.32	\$45,277.32
Bomba centrífuga	1	\$5,365.00	\$5,365.00
<b>Tubería, válvulas y conexiones sistema de calefacción</b>			<b>\$27,789.91</b>
Tubería acero al carbón	50	\$474.00	\$23,700.00
Medidor de flujo de agua	1	\$1,700.00	\$1,700.00
Sistema de conxiones: codos, coples, válvula	1	\$2,389.91	\$2,389.91
<b>Invernadero</b>			<b>\$321,505.20</b>
Estructura, película plástica, flete y montaje	1	\$122,116.00	\$122,116.00
Cárcamo 500 m2	1	\$117,350.00	\$117,350.00
Tanque de agua de 18,000 litros	1	\$45,800.00	\$45,800.00
Tanque de agua de 2,500 litros	1	\$7,572.00	\$7,572.00
Kit sistema de riego por goteo	6	\$1,159.42	\$6,956.52
Almacén	1	\$5,999.00	\$5,999.00
Electrobomba 1 hp	1	\$1,489.00	\$1,489.00
Sistema de tubería de 1 " acero al carbón	12	\$45.00	\$540.00
Electrobomba 2 hp	1	\$3,729.00	\$3,729.00
Sistema de tubería de 1 1/4 y 1 1/2 " pvc	1	\$1,091.46	\$1,091.46
Herramientas y cemento pvc	1	\$2,162.00	\$2,162.00
Kit sistema de nebulización	1	\$28,871.22	\$28,871.22
<b>Red de Toma Geotérmica</b>			<b>\$86,446.03</b>
Bomba centrífuga de 10 GPM	1	\$62,800.65	\$62,800.65
Tubería de acero inoxidable	26	\$859.67	\$22,351.42
Sistema de conxiones: codos, coples, válvula	1	\$1,293.26	\$1,293.26
<b>Montaje y Puesta en Marcha</b>			<b>\$129,810.20</b>
<b>Capital de trabajo</b>			<b>\$46,828.71</b>
<b>Sub total</b>			<b>\$684,653.37</b>
<b>Ingeniería</b>			<b>\$205,396.01</b>
<b>Total</b>			<b>\$890,049.39</b>

<sup>7</sup> Todos los costos y totales se encuentran expresados en MXN

El capital de trabajo es el dinero que será necesario para cubrir los costos de operación hasta que se empiece a vender el producto, para este caso se considera el costo de 3 meses, ya que las rosas tardarán 11 semanas en desarrollarse, para que en la doceava semana se cosechen (Arévalo, Vélez, & Camacho Tamayo, 2013). El concepto de Ingeniería hace referencia a cuanto se espera ganar por el proyecto, se considera que será un 30% del sub total del proyecto.

#### 4.3 Plan de producción

Las rosas que se plantarán serán del tipo Híbrida de té Rare Rojo, siendo este tipo de flor de las más vendidas en florerías. Otra característica principal es su capacidad de florecer varias veces al año. En invernadero, las rosas tardan de 40 a 57 días en desarrollarse, llegando a generar 6 temporadas de floración al año con una vida útil de 5 a 7 años (Joshel & Melnicoe, 2004).

La densidad de plantación varía con respecto a cada autor, puede ser de 11.7 o de 13.4 dependiendo del tipo de rosa (Kool & de Koning, 1996), al igual que de 10 arbustos por metro cuadrado (Reid, 2008) o 7 plantas por metro cuadrado (Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal, 2010). De igual manera sucede con el rendimiento esperado, ya que se pueden llegar a obtener 220 flores/planta/año (FAO, 2002B), 25 a 30 flores por planta al año (Romo, 2018) o de 18 tallos/año/planta (Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal, 2010).

Para este estudio se considera una densidad de plantación de 8 plantas por metro cuadrado con una producción de 5 flores por planta (FAO, 2002B), con un periodo de desarrollo de 7 semanas (FAO, 2002B; Joshel & Melnicoe, 2004) y la octava semana será de cosecha (Kool & de Koning, 1996; FAO, 2002B), para un rendimiento anual de 220 flores/planta/año (FAO, 2002B). Se escogieron estos parámetros por ser lo más aconsejable de acuerdo a la FAO.

El beneficio de utilizar un invernadero climatizado, además de evitar daños debido a las condiciones ambientales, es un aumento en la producción. Zeroni & Gale (1987) realizaron un experimento donde utilizaron dos invernaderos con y sin climatización, para la producción de rosas. En su experimento, solo abarcó 3 periodos de cosechas, del 3 de noviembre al 26 de marzo, reportaron un aumento mínimo del rendimiento del 57% hasta un aumento máximo del 174%. En la **Tabla 4.2** se muestran los resultados de su experimento:

Tabla 4.2 Rendimiento de las rosas en diferentes invernaderos (Zeroni & Gale, *The effect of root temperature on rose plants in relation to air temperature, 1987*)

Fecha de cosecha	Rendimiento en invernadero climatizado <sup>8</sup>	Rendimiento en invernadero sin climatización	Porcentaje de aumento de la producción
18-22 de diciembre	12.1 ± 1.4	7.7 ± 1.9	57%
5-9 de enero	11.8 ± 1.0	5.6 ± 1.3	111%
26-30 de marzo	11.8 ± 1.5	4.3 ± 1.6	174%

La principal diferencia entre los rendimientos es por las bajas temperaturas alcanzadas, ya que se tienen registradas temperaturas de hasta 5 °C, las cuales son perjudiciales para el desarrollo de las plantas. Se tomarán los rendimientos adicionales de la tabla anterior para los tres meses donde se planea usar el equipo de calefacción.

Debido a las diferencias climatológicas de la región de Beerseba, Israel en el estudio de Zeroni & Gale (1987), se tendrá un porcentaje de error con respecto a Nayarit. Mientras que para el estudio antes mencionado se tendrá en promedio un rendimiento de 11.9 flores por planta para los tres periodos de producción, en Nayarit se espera cosechar un promedio de 12.84 flores por planta considerando los porcentajes de aumento de producción y la densidad de plantación antes mencionada. Por lo tanto, se tiene un error del 8%.

Para el resto de los meses del año no se aplicará un rendimiento extra, ya que el equipo de calefacción no será utilizado. Para acercarse lo más posible a la realidad, se toma como referencia la producción de rosas en invernadero, ya que en los meses fríos se espera tener menor producción que en los meses cálidos.

En la **Tabla 4.3** se muestra la producción anual de rosas mediante un invernadero sin equipo de climatización:

---

<sup>8</sup> Está representado en cantidad de flores obtenidas por planta

*Tabla 4.3 Producción mensual de rosas (Kool & de Koning, 1996)*

Mes	Cantidad de tallos por metro cuadrado	Comportamiento
Enero	8.40	49%
Febrero	6.40	37%
Marzo	11.10	65%
Abril	14.50	85%
Mayo	24.70	144%
Junio	20.30	119%
Julio	38.10	223%
Agosto	41.30	242%
Septiembre	14.20	83%
Octubre	6.30	37%
Noviembre	8.60	50%
Diciembre	4.50	26%
Promedio	17.1	100%

Al comparar la producción esperada de 17 tallos por metro cuadrado, en los meses fríos se tienen producciones menores o iguales al 50% por las bajas temperaturas, mientras que para los meses más cálidos se puede tener hasta el doble de producción. Este factor será de gran importancia para la programación de las fechas de cultivo.

#### 4.3.1 Ingresos

A lo largo del año, los productos agrícolas tienen diferentes precios, principalmente por la época del año y la demanda del producto. Se toma como referencia la información reportada por el Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados (SNIIM) para las rosas de invernadero. En la **Tabla 4.3** se enlista la estacionalidad de los precios para la rosa:

Tabla 4.4 Estacionalidad de los precios para rosas de invernadero (SNIIM, 2020)

Mes	Precio (MXN)
Enero	220
Febrero	200
Marzo	240
Abril	200
Mayo	260
Junio	200
Julio	200
Agosto	220
Septiembre	200
Octubre	240
Noviembre	240
Diciembre	240

Está representado por el precio del rollo de 24 flores o piezas, para el mercado de abasto de Michoacán. Se escogió este mercado por la cercanía que se tiene con Nayarit, ya que los otros son de la Ciudad de México, Oaxaca y Chiapas. Se observa que para mayo se obtendrá la mayor ganancia posible, mientras que para los meses de febrero, abril y julio se tienen los precios más bajos.

Como se mencionó anteriormente, se requieren de 8 semanas para el desarrollo de los cultivos, es por ello que para tener cosechas durante todo el año, se planea hacer las labores agrícolas necesarias como el sembrar con una diferencia de un mes, y las labores de poda necesarias, aunque signifique el sacrificar flores que pueden ser cosechadas, ya que como mencionan Joshel & Melnicoe (2004), los productores de flores deben cubrir tanto el mercado regular como son bodas, regalos, decoración hogareña; y para días en específico como San Valentín, Día de las Madres, entre otros.

#### 4.4 Costos del proyecto

Como se mencionó anteriormente, los costos hacen referencia a todo el material y personal necesario para poder operar el invernadero. Estos se explican a continuación:

#### 4.4.1 Insumos agrícolas

Los insumos agrícolas son las semillas de las rosas, las cuales pueden producir cultivos entre 5 a 7 años. Para este estudio se considera que serán 5 años de cultivos, por lo que para el sexto año deberán ser remplazadas.

Otros insumos son los abonos, ya que aportan los nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas. Se escoge específicamente para rosas, ya que cada cultivo es específico con los nutrientes y cantidades que necesita. De acuerdo a la información proporcionada por diferentes proveedores, se requieren de 15 gramos de abono por planta. La densidad de plantación de las rosas es de 7 plantas por metro cuadrado (Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal, 2010), al contar con 144 metros cuadrados de superficie de trabajo, se tendrá un total de 1,008 plantas, por lo que se requieren de 15.12 kilogramos de abono, se escoge de la marca Vigoro por ser de fácil adquisición en Nayari, como el que se muestra en la **Fig 4.1**, se requieren comprar 3 costales de 10 litros cada 3 meses.



*Fig. 4.1 Abono para rosas (Homedepot, 2020)*

Se considera el uso de pesticidas, ya que de entre las labores agrícolas, una es evitar la proliferación de plagas que afecten los cultivos. Al igual que el abono, se elige específicamente para rosas, ya que afecta principalmente a las plagas de las rosas. Se escoge de la marca Boom!, al igual que el abono es de fácil adquisición en la región, por afectar a las plagas de las rosas y por ser un insecticida orgánico. Se comprará 1 bolsa de 1 kg, ya que, por recomendación del proveedor, se deben utilizar hasta 1.5 kg por cada 2.5 a 3.5 hectáreas, y se renueva cada 2 años debido a su caducidad. También se comprará un rociador para su aplicación, al igual que equipo de protección como guantes, botas y overoles para evitar daños a los operarios. Se debe recordar que el insecticida solo se aplica cuando se presenten síntomas en las rosas, por lo que el monitoreo debe ser de manera continua. En la **Fig 4.2** se muestran los equipos para su manejo:



Fig. 4.2 Material para aplicación de pesticida: a) Insecticida (Homedepot, 2020), b) Rociador manual (Grainger, 2019), c) Equipo de protección para el operario (Vallen, 2019)

El último insumo necesario es la película plástica para el invernadero, ya que la vida útil de estos plásticos es de 2 años. Se comprará 1 rollo de 6.2 metros ancho por 88 metros de largo, además de comprar rollos de cinta, en caso de que se tenga que parchar el invernadero.

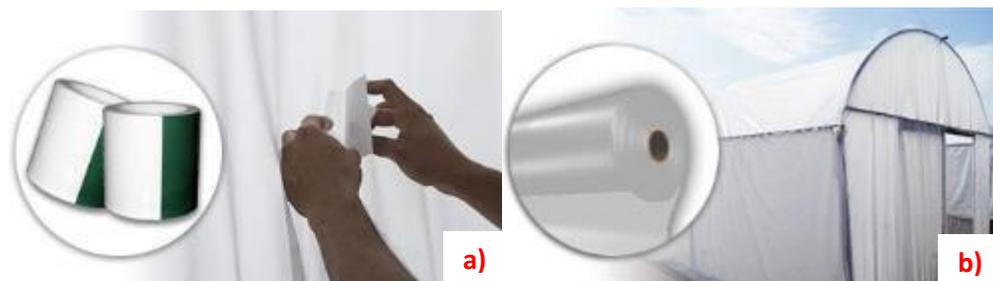


Fig. 4.3 Película plástica para invernadero: a) Cinta para parchado, b) Película plástica (Hydro Enviroment, 2020)

#### 4.4.2 Mano de obra

En la mano de obra se emplearán dos jornaleros para labores directas en los cultivos como: poda, cosecha, revisión y control de plagas y enfermedades, puesta en marcha del sistema de riego y aplicación de los abonos. También se contará con un velador para revisar el invernadero y cultivos y puesta en marcha de los equipos de calefacción para los meses de diciembre a febrero, los meses más fríos. Y por último se contará con un supervisor que lleve control de la producción, se encargue del reabastecimiento de los insumos necesarios y sea el encargado de la revisión del correcto funcionamiento de los equipos y de ser necesario solicitar la reparación y mantenimiento de éstos.

En la **Tabla 4.4** se muestran los salarios de los diferentes cargos:

Tabla 4.5 Costo de mano de obra

Ocupación	Número de trabajadores	Salario mínimo (\$ MXN)
Jornales	1	\$300.00 por jornada
Velador	1	\$1,500 a la semana
Supervisor	1	\$10,000 al mes

Con la experiencia que ha tenido Grupo iiDEA en colaboración con Grupo Dragón en los diferentes proyectos que se han trabajado, el salario de los jornaleros es de \$300.00, el salario final se toma del salario promedio de un jornalero en invernadero en México (Talent.com, 2020). El supervisor se tomó como referencia el salario medio de un Supervisor de producción agrícola en México (indeed, 2020). Se consideran estos puestos tomando como referencia al personal necesario para una empresa de asesoramiento para cultivos protegidos (Valerio, 2016).

#### 4.4.3 Energía eléctrica

El consumo eléctrico depende de la región del país donde se factura y de las horas de trabajo, debido a que se clasifican con energía base, intermedia y punta. Nayarit se encuentra en la región Noroeste y los cargos y horas se enlistan en la **Tabla 4.5**

Tabla 4.6 Costo de la energía eléctrica (CFE, 2020)

Región Noroeste		
Tipo de energía	Cargo por kilowatt \$(MXN)/kW <sub>e</sub>	Horas del día
Energía base	0.9137	0:00-6:00
Energía intermedia	1.0914	6:00-20:00
		22:00-24:00
Energía punta	2.1750	20:00-22:00

Se toma un promedio anual, principalmente por facilidad de cálculo, ya que, dependiendo de la época del año y del día de la semana, las horas intermedias y punta cambian.

En la **Tabla 4.6** se desglosan las horas de funcionamiento, potencia eléctrica y el costo que tendrán la energía eléctrica, dependiendo del equipo utilizado.

*Tabla 4.7 Consumo y costo de la energía eléctrica*

Equipo	Potencia en W	Horas por día	Kwh/día	Días de operación	kWh/semana	base	intermedias	punta	Costo semanal
bomba calefacción	96	10	0.96	7	6.72	6	2	2	\$ 8.07
bomba intercambiador	246	10	2.46	7	17.22	6	2	2	\$ 20.69
Bomba tinaco	745.7	0.335	0.25	7	1.75	0	0.335	0	\$ 1.91
Bomba de riego	35	1	0.04	7	0.25	0	1	0	\$ 0.27
Bomba cárcamo lluvia	1491.40	0.54	0.81	7	5.64	0	0.54	0	\$ 6.15
Nebulizadores	750	1	0.75	7	5.25	0	4	0	\$ 22.92

Se debe recordar que los equipos de climatización y la bomba del cárcamo para agua de lluvia no estarán en funcionamiento todos los meses del año, solamente los equipos de riego funcionarán todos los días. Los equipos de calefacción se emplearán de diciembre a febrero y consta de las bombas de calefacción e intercambiador, mientras que el equipo de refrigeración se usara de marzo a julio. Se toma como referencia la información presentada en la Gráfico 3.1 y los horarios de operación de la información recabada por Grupo iiDEA y PI-Ingenera. La bomba del cárcamo operará en las semanas cuando llueva, ya que no en todos los meses se tiene registros de ésta.

La bomba del tinaco solo estará en funcionamiento por 20 minutos, ya que su flujo es de 100 litros por minuto y requiere que llene el tinaco unos 2,010 litros para el riego de todas las rosas. Mientras que la bomba del nebulizador, se recomienda que solo esté en funcionamiento por 15 minutos por cada hora.

La bomba del cárcamo estará en funcionamiento solo cuando cuente con agua, y se está considerando que se vaciará. En la tabla se muestra el ejemplo de una semana de trabajo.

#### 4.4.4 Costo del agua geotérmica

Un problema de la geotermia en usos directos es que no se cuenta con un costo por cada kilowatt térmico producido, a diferencia de la energía eléctrica. Para este estudio, se tomarán dos aproximaciones:

- Una aproximación directa, donde el costo del calor utilizado para la calefacción de invernaderos es de  $0.07 \frac{\$}{kWh}$  (Dickson & Fanelli, 2003, pág. 107)
- Se realizará, además, una aproximación mediante un análisis de combustión de un calentador de gas, tomando como referencia la utilización del 10 al 30% del costo de la energía térmica producida mediante gas natural.

Si el costo mediante las dos aproximaciones es cercano, ya sea con el 10 o el 30%, se tomará ese valor. En caso contrario, se elegirá la aproximación directa.

Para la aproximación directa, se toma los resultados obtenidos en el capítulo anterior. Para la calefacción se tiene una carga térmica de 10.72 kW. Para conocer la cantidad de horas que estará en funcionamiento del equipo se tomará de referencia la información presentada por la página Weather Spark, donde presentan gráficos de la temperatura promedio de diferentes regiones del mundo a diferentes horas del día a lo largo del año, ver **Fig. 4.4**.

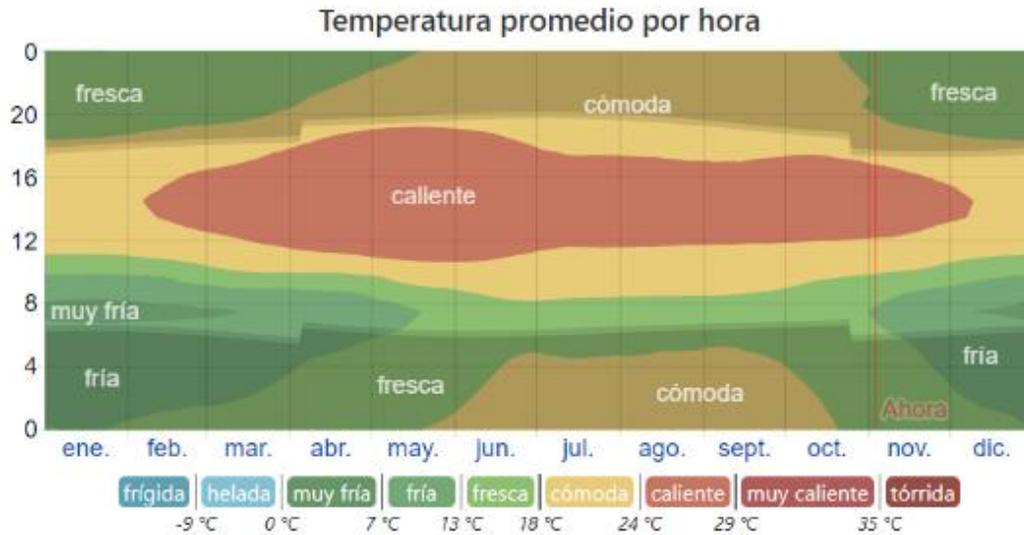


Fig. 4.4 Temperatura promedio San Pedro Lagunillas (Weather Spark, 2019)

Se observa que, para el valor de referencia de 9 °C para los cálculos anteriores, corresponde al rango de “fría”. Se toma como referencia el rango de horas de 0:00 a las 08:00. Después de las 08:00 no se considera el uso del equipo de calefacción, debido a que la salida del sol es aproximadamente a las 06:30 (Ibid, 2019).

Para un mes de funcionamiento, se enlistan los valores de carga térmica y costo en la **Tabla 4.8:**

Tabla 4.8 Costo del agua geotérmica, análisis directo

Concepto	Valor
Carga térmica [kW]	10.72
Horas de operación en un mes	240
Carga térmica mensual [kWh]	2,572.80
Costo del calor producido [ $\frac{\$(USD)}{kWh}$ ]	0.07
Costo mensual [\$(USD)]	180.10
Costo anual (Tres meses de operación) [\$(USD)]	540.30

Para la aproximación indirecta, se selecciona una caldera tomando como referencia la potencia térmica calculada anteriormente de 10.72 kW<sub>t</sub>. Se utilizará un calentador de agua de 16.75 kW<sub>t</sub> de la marca Whirlpool, siendo un modelo cercano a la carga térmica requerida, ya que otros modelos dan una menor carga térmica o los más cercanos al valor requerido son con gas LP. Los datos de placa se enlistan en la **Tabla 4.9** ya que serán necesarios para el análisis de combustión:

*Tabla 4.9 Especificaciones técnicas del calentador de agua (ManualPDF.es, 2020)*

Concepto	Descripción
Modelo	WK71312Q
Valor de Calor de Carga [kW]	16.57
Caudal de agua [ $\frac{L}{min}$ ]	9.5
Presión de gas [kPa]	1.76
Presión de agua [kPa]	1.76
Máxima temperatura del agua [°C]	75

En el análisis de combustión se busca conocer el poder calorífico inferior con respecto a las condiciones del sitio, éstas, junto con la composición química del gas natural se enlistan en la **Tabla 4.10**:

*Tabla 4.10 Datos para el análisis de combustión (Aviña Jiménez, 2018, pág. 18)*

Concepto	Descripción
Altura sobre nivel del mar [m]	1331
Temperatura de bulbo seco [°C]	9
Humedad del aire [%]	58.92
Porcentaje de O <sub>2</sub> en gases (base seca) [%]	3.4
Composición química del gas natural [%]	Carbono, 74.62; Hidrógeno, 23.09; Azufre, 0; Oxígeno, 0.08; CO <sub>2</sub> , 1.39; SO <sub>2</sub> , 0; Nitrógeno, 0.73; Agua libre, 0.09

Los datos del sitio, como la temperatura y humedad se consideran como los mismos utilizados para el cálculo de la carga térmica.

Al realizarse los cálculos de combustión, se obtuvo un Poder Calorífico Inferior de  $47,241.12 \frac{kJ}{kg}$  y un Poder Calorífico Superior de  $58,040.81 \frac{kJ}{kg}$ . Conociendo este valor, se procede a realizar un cálculo de eficiencia de calderas mediante la cantidad de energía transferida al vapor.

Con los datos de placa y condiciones del lugar se obtienen los siguientes datos para el análisis de la caldera, en listados en la **Tabla 4.11**:

*Tabla 4.11 Datos para el análisis de combustión*

Presión barométrica [MPa]	0.09
Presión absoluta [MPa]	0.59
Gasto Nominal máximo continuo [kg/h]	167.20
Temperatura del vapor [°C]	100
Temperatura de gases de salida chimenea [°C]	300
Horas de operación por mes	300
Densidad del combustible $[\frac{kg}{m^3}]$	0.698
Consumo mensual [m <sup>3</sup> ]	57,490.84

Al analizar la energía suministrada por la combustión, aire seco, agua en el aire, combustible; las perdidas por gases secos, agua formada y agua libre, se enlistan los valores obtenidos en la **Tabla 4.12**. Se considera un promedio del costo del gas natural, de acuerdo a la CRE, tiene un costo de  $2.1257 \frac{\$}{MMBTU}$  (CRE, 2020).

*Tabla 4. 12 Costo del agua geotérmica, análisis indirecto*

Concepto	Valor
Energía suministrada por la caldera [MJ]	1,956,887.51
Energía del combustible [MMBTU]	1854.77
Costo al 10% [\$]	394.27
Costo al 30% [\$]	1,182.81

Como hay una diferencia de más de 200 dólares entre los dos análisis, se tomará la aproximación directa.

Si la conversión del dólar a pesos mexicanos está en \$22.25 MXN para el 27 de septiembre de 2020, al mes, el agua geotérmica costaría \$4,007.26 MXN, y para los tres meses que se usará la calefacción, sería un total de \$12,021.68.

#### 4.4.5 Costo del agua dulce

La cantidad de agua que necesitan las rosas en invernadero son de 2 litros por día (López, 2017). Debido a la densidad de plantación de 8 plantas por metro cuadrado, en el invernadero se tendrá un total de 1,152 plantas, para un total de 2,304 litros de agua diarios; al mes se requieren 69,120 litros o 69.12 m<sup>3</sup>.

Se considera dos formas de obtención de agua: pluvial y pipas:

- Se utilizará un cárcamo de 500 m<sup>2</sup> para la obtención de ésta, la cual costará \$35,000 MXN. Esto se debe a que el agua de lluvia se mide en mm. Por lo que, a manera de ejemplo, si llueven 10 mm, y tenemos una superficie de 10 m<sup>2</sup>, se obtendría un total de 100 litros, ver **Fig. 4.5**.
- Se cotizo con diferentes empresas de pipas, y se eligió a una empresa que su pipa de 18,000 litros tiene un costo de \$800 MXN, siendo el destino la planta del Domo, costaría \$2,500 MXN en total por el transporte del agua. La empresa cuenta con pipas de 4,000, 8,000 y 12,000 litros con costo de \$300, \$400 y \$500 MXN respectivamente. De acuerdo a las necesidades hídricas de las rosas y a la pipa de mayor capacidad cotizada, solo se tendrá disponible esa misma cantidad de agua semanalmente.

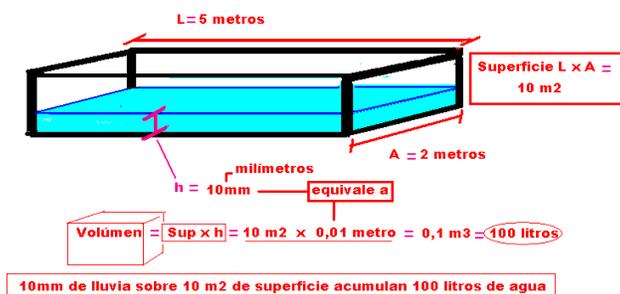


Fig. 4.5 Medición de la cantidad de lluvia (Hernán Pepa, 2013)

De acuerdo a datos de la NASA, se obtuvo la precipitación durante todo el año, ver **Gráfico 4.1**:

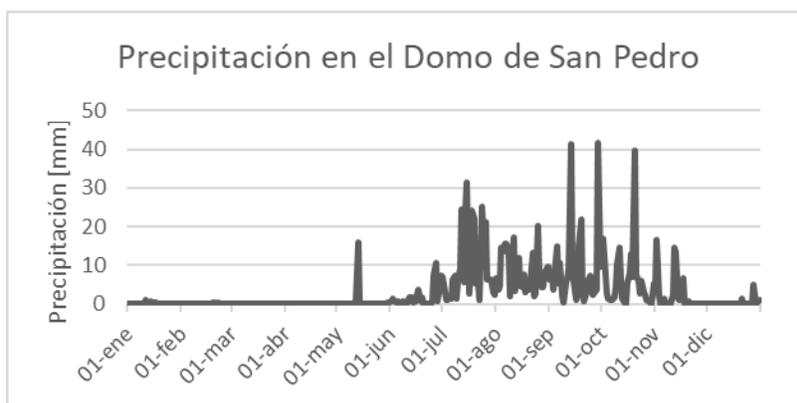


Gráfico 4.1 Precipitación diaria (NASA, 2020)

Se observa que, de diciembre a junio, se tienen registros esporádicos de precipitación, y la temporada de lluvia empieza en el mes de junio, siendo de julio a octubre los meses más lluviosos. De acuerdo a la cantidad de precipitación acumulada semanalmente, se decidirá si se pagará el servicio de pipas.

En el **Gráfico 4.2** se muestra la semana del año en que se requiere el contratar una pipa y cuando la cantidad de agua de lluvia acumulada:

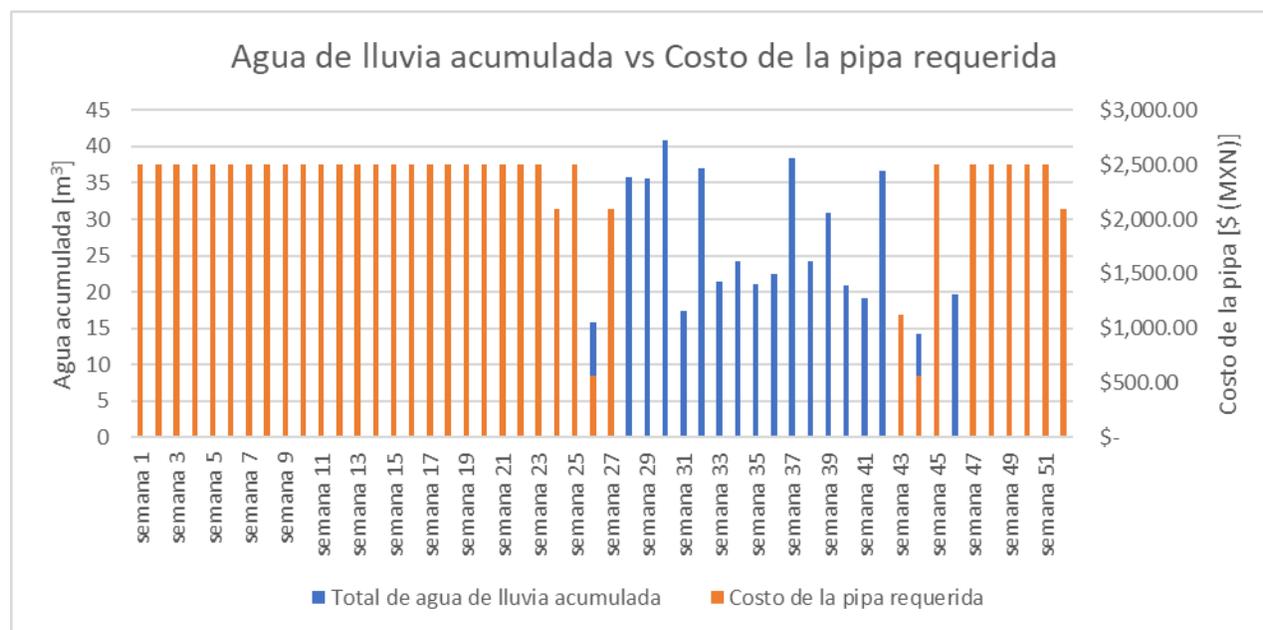


Gráfico 4.2 Épocas del año donde se requiere el uso de pipas (Elaboración propia)

Es hasta la semana 28, en el mes de julio, se tiene la suficiente cantidad de agua de lluvia para cubrir la demanda de riego. También se observa que hay semanas donde se deberá pedir pipas menores de los 800 litros, aunque en la mayor parte del año, se deberá considerar las pipas de \$2,500 MXN.

#### 4.4.6 Depreciación y amortizaciones

Para todo modelo financiero, se debe considerar la depreciación y amortización, ya que con el paso del tiempo los diferentes activos de los proyectos se van desgastando, por lo que sirve para tener un ahorro con el fin de reemplazar los equipos en caso de continuar con los proyectos. La depreciación se realiza con los activos fijos tangibles como equipos y estructuras, mientras que las amortizaciones son para los activos fijos intangibles como el proceso de ingeniería en los proyectos.

De acuerdo a la Ley de Impuestos sobre la Renta (Ley del ISR), en el artículo 33, los cargos diferidos para las amortizaciones son del 5% para un total de 5 años. En caso de la depreciación, éstas se mencionan en los artículos 34 y 35. Se divide en tres apartados los activos para la depreciación:

- Invernadero: se considera la estructura y los tanques de almacenamiento de agua.
- La red de sistema de calefacción y equipos de riego: son el sistema de tubería y equipos de bombeo dentro del invernadero.
- La red de toma geotérmica: de igual manera se considera el sistema de tubería y equipo de bombeo y el intercambiador de calor, que están conectados al cárcamo de agua geotérmica.

De acuerdo a la Ley del ISR, para estos tres apartados son del 10%, y se considera como vida útil, la duración de los invernaderos, de acuerdo a la NMX-E-255-CNCP-2013, es de 10 años.

#### 4.4.6 Costos totales

En la **Tabla 4.13** se muestran los costos totales para un periodo de 10 años:

Tabla 4.13 Costos del proyecto

<i>Concepto</i>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>	<b>Año 6</b>	<b>Año 7</b>	<b>Año 8</b>	<b>Año 9</b>	<b>Año 10</b>
<b>Mantenimiento</b>	\$2,235.49	\$3,209.34	\$3,208.41	\$3,203.76	\$3,207.17	\$2,174.73	\$3,205.79	\$3,206.47	\$3,206.23	\$3,206.16
<b>Renta</b>	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00
<b>Materiales</b>	\$3,036.00	\$9,585.00		\$9,585.00		\$9,585.00		\$9,585.00		
<b>Semillas</b>	\$2,015.04					\$2,015.04				
<b>Sustrato</b>	\$860.00	\$860.00	\$860.00	\$860.00	\$860.00	\$860.00	\$860.00	\$860.00	\$860.00	\$860.00
<b>Pesticida</b>	\$910.10		\$910.10		\$910.10		\$910.10		\$910.10	
<b>Mano de obra</b>	\$196,200.00	\$212,450.00	\$212,450.00	\$212,450.00	\$212,450.00	\$212,450.00	\$212,450.00	\$212,450.00	\$212,450.00	\$212,450.00
<b>Luz</b>	\$7,219.54	\$7,219.54	\$7,219.54	\$7,219.54	\$7,219.54	\$7,219.54	\$7,219.54	\$7,219.54	\$7,219.54	\$7,219.54
<b>Agua caliente</b>	\$12,021.41	\$12,021.41	\$12,021.41	\$12,021.41	\$12,021.41	\$12,021.41	\$12,021.41	\$12,021.41	\$12,021.41	\$12,021.41
<b>Agua dulce</b>	\$82,690.00	\$82,690.00	\$82,690.00	\$82,690.00	\$82,690.00	\$82,690.00	\$82,690.00	\$82,690.00	\$82,690.00	\$82,690.00
<b>Depreciación</b>	\$50,855.45	\$50,855.45	\$50,855.45	\$50,855.45	\$50,855.45	\$50,855.45	\$50,855.45	\$50,855.45	\$50,855.45	\$50,855.45
<b>Amortizaciones</b>	\$67,073.64	\$67,073.64	\$67,073.64	\$67,073.64	\$67,073.64	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>Total</b>	\$445,116.66	\$465,964.37	\$457,288.54	\$465,958.79	\$457,287.30	\$399,871.16	\$390,212.28	\$398,887.86	\$390,212.72	\$389,302.55

El mantenimiento se considera como el máximo porcentaje de los ingresos de las rosas, permitiendo que el proyecto sea rentable.

Para la renta del espacio, se comparó el costo de diferentes terrenos, tanto de en San Pedro Lagunillas y Tepic (Mitula,2020). Se considera que el metro cuadrado cuesta \$28.57 MXN, por lo que los 700 m<sup>2</sup> requeridos para el proyecto, tendrá un costo anual de \$20,000.

## 4.5 Modelo financiero

En la **Tabla 4.14** se muestra el flujo de caja libre:

Tabla 4.14 Flujo de caja libre del proyecto

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
<b>Ingresos</b>		\$ 223,548.9	\$ 320,933.8	\$ 320,840.7	\$ 320,375.5	\$ 320,716.7	\$ 217,472.7	\$ 320,578.8	\$ 320,646.6	\$ 320,623.3	\$ 320,616.2
<b>OPEX</b>		\$445,116.66	\$465,964.37	\$457,288.54	\$465,958.79	\$457,287.30	\$399,871.16	\$390,212.28	\$398,887.86	\$390,212.72	\$389,302.55
<b>Beneficios antes de impuestos</b>		- \$221,567.77	- \$145,030.58	- \$136,447.79	- \$145,583.25	- \$136,570.61	- \$182,398.45	- \$69,633.43	- \$78,241.23	- \$69,589.46	- \$68,686.31
PTU		\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Impuestos		\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>Ganancia neta</b>		- \$221,567.77	- \$145,030.58	- \$136,447.79	- \$145,583.25	- \$136,570.61	- \$182,398.45	- \$69,633.43	- \$78,241.23	- \$69,589.46	- \$68,686.31
<b>Beneficios antes de impuestos</b>		- \$221,567.77	- \$145,030.58	- \$136,447.79	- \$145,583.25	- \$136,570.61	- \$182,398.45	- \$69,633.43	- \$78,241.23	- \$69,589.46	- \$68,686.31
ISR		\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>Beneficio después de impuestos</b>		- \$221,567.77	- \$145,030.58	- \$136,447.79	- \$145,583.25	- \$136,570.61	- \$182,398.45	- \$69,633.43	- \$78,241.23	- \$69,589.46	- \$68,686.31
Depreciación		\$50,855.45	\$50,855.45	\$50,855.45	\$50,855.45	\$50,855.45	\$50,855.45	\$50,855.45	\$50,855.45	\$50,855.45	\$50,855.45
Amortization		\$67,073.64	\$67,073.64	\$67,073.64	\$67,073.64	\$67,073.64	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
CAPEX	\$890,751.39	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Inversión Fija	\$508,554.46	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Inversiones Diferidas	\$335,368.21	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Capital de Trabajo	\$46,828.71	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>Flujo de caja libre</b>	<b>- \$890,751.39</b>	<b>- \$103,638.69</b>	<b>- \$27,101.49</b>	<b>- \$18,518.70</b>	<b>- \$27,654.16</b>	<b>- \$18,641.52</b>	<b>- \$131,543.01</b>	<b>- \$18,777.98</b>	<b>- \$27,385.79</b>	<b>- \$18,734.01</b>	<b>- \$17,830.86</b>

El mantenimiento para este proyecto es del 1%.

De acuerdo a la Ley del ISR, el porcentaje de impuestos que se deberá de pagar es del 30%, mientras que la Participación de los Trabajadores en las Utilidades (PTU), es del 10%. Durante los primeros dos años no se pagan debido a que la utilidad antes de impuestos del primer año, y a la utilidad acumulada del segundo año son negativos, debido a eso es hasta el tercer año que se empiezan a pagar.

Para conocer si el proyecto es económicamente atractivo, se debe calcular la tasa interna de retorno (TIR), la máxima tasa de interés que es posible de endeudarse para financiar el proyecto, y el valor presente neto (VPN) que es la herramienta que permite traer a valores presentes la totalidad de flujos proyectados con el fin de verificar si se tendrán pérdidas o ganancias.

Para conocer el VPN se debe calcular el Coste Medio Ponderado del capital (CMPC) se puede definir como el costo de oportunidad para los inversionistas. Esta se calcula mediante la **Ec. 62**:

$$CMPC = K_e * \frac{E}{E+D} + K_d * (1 - T) * \frac{D}{E+D} \quad \text{Ec. 62}$$

Donde:

$K_e$ : Coste de los fondos propios

$D$ : Deuda propia

$E$ : Fondos propios

$K_d$ : Coste financiero

$T$ : Tasa impositiva

Se considera que no se tiene deuda, por lo que solo se debe obtener los costos de los fondos propios, estos se obtienen mediante la **Ec. 63**:

$$CMPC = K_e = R_f + (\text{Beta} * R_p) \quad \text{Ec. 63}$$

Donde:

Beta: es una medida del riesgo sistemático o de mercado de una acción y ofrece a los inversores indicación de la volatilidad de una emisión en relación con el mercado de valores en general. Para el caso de la agricultura, su valor es de 0.63 (Damodaran, Total Betas by Sector, 2020)

$R_f$ : el beneficio que recibirán los inversionistas al adquirir bonos de vencimiento, esta varía con el tiempo. Para este estudio se consideró de 5.95% (Investing, 2020)

Rp: la rentabilidad que exigen los inversionistas para compensarlos por el riesgo de inversión, dependiendo del país extranjero, en comparación con la inversión del mercado nacional. Se debe elegir el Country Risk Premiun para México, el cual tiene el valor de 2.35% (Damodaran, 2020)

En la **Tabla 4.15** se muestran los indicadores financieros para el invernadero de rosas

*Tabla 4.15 Indicadores financieros*

CMPC	7.43%
Horizonte Evaluación	10 Años
TIR	No es rentable
VPN	-\$ 1,101,754.69
<i>Pay Back(meses)</i>	120.00
<i>Pay Back(años)</i>	10.00
<i>Relación Costo/Beneficio</i>	-0.32
<i>ROI</i>	-13%

Como los valores del VPN, Relación Costo/Beneficio y la ROI salen negativos y la TIR muestra un error, para este caso se pone “No es rentable”, se deberá realizar un ajuste a los equipos y costos operativos, con el fin de lograr un proyecto rentable.

De los cambios que se realizaran son:

- Reducir el porcentaje del concepto de Ingeniería del 30% al 10%
- Reducir la cantidad de agua necesaria para el riego, de regar los siete días de la semana a cuatro días a la semana. Esto reducirá el tanque de agua necesario, de 18,000 litros a 10,000 litros.
- La jornada laboral del jornalero se reducirá de 30 días al mes a 15 días.
- Solo se contará como personal al jornalero y velador.

Se enlistarán los nuevos indicadores económicos en las **Tablas 4.16 a 4.19:**

Tabla 4.16 Inversiones fijas modificadas

	Cantidad	Costo Unitario	Total
<b>Inversiones Fijas</b>			<b>\$485,843.46</b>
<b>Red sistema de calefacción</b>			<b>\$78,432.23</b>
Intercambiador de placas	1	\$45,277.32	\$45,277.32
Bomba centrífuga	1	\$5,365.00	\$5,365.00
<b>Tubería, válvulas y conexiones sistema de calefacción</b>			<b>\$27,789.91</b>
Tubería acero al carbón	50	\$474.00	\$23,700.00
Medidor de flujo de agua	1	\$1,700.00	\$1,700.00
Sistema de conxiones: codos, coples, válvula	1	\$2,389.91	\$2,389.91
<b>Invernadero</b>			<b>\$320,965.20</b>
Estructura, película plástica, flete y montaje	1	\$122,116.00	\$122,116.00
Cárcamo 500 m <sup>2</sup>	1	\$117,350.00	\$117,350.00
Tanque de agua de 10,000 litros	1	\$23,629.00	\$23,629.00
Tanque de agua de 2,500 litros	1	\$7,572.00	\$7,572.00
Kit sistema de riego por goteo	6	\$1,159.42	\$6,956.52
Almacén	1	\$5,999.00	\$5,999.00
Electrobomba 1 hp	1	\$1,489.00	\$1,489.00
Sistema de tubería de 1 " acero al carbón	12	\$45.00	\$540.00
Electrobomba 2 hp	1	\$3,729.00	\$3,729.00
Sistema de tubería de 1 1/4 y 1 1/2 " pvc	1	\$1,091.46	\$1,091.46
Herramientas y cemento pvc	1	\$2,162.00	\$2,162.00
Kit sistema de nebulización	1	\$28,871.22	\$28,871.22
<b>Red de Toma Geotérmica</b>			<b>\$86,446.03</b>
Bomba centrífuga de 10 GPM	1	\$62,800.65	\$62,800.65
Tubería de acero inoxidable	26	\$859.67	\$22,351.42
Sistema de conxiones: codos, coples, válvula	1	\$1,293.26	\$1,293.26
<b>Montaje y Puesta en Marcha</b>			<b>\$129,810.20</b>
<b>Capital de trabajo</b>			<b>\$40,788.71</b>
<b>Sub total</b>			<b>\$656,442.37</b>
<b>Ingeniería</b>			<b>\$65,644.24</b>
<b>Total</b>			<b>\$722,086.61</b>

Tabla 4.17 Costos modificados

<b>Concepto</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>	<b>Año 6</b>	<b>Año 7</b>	<b>Año 8</b>	<b>Año 9</b>	<b>Año 10</b>
Mantenimiento	\$2,235.49	\$3,209.34	\$3,208.41	\$3,203.76	\$3,207.17	\$2,174.73	\$3,205.79	\$3,206.47	\$3,206.23	\$3,206.16
Renta	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00
Materiales	\$3,036.00	\$9,585.00		\$9,585.00		\$9,585.00		\$9,585.00		
Semillas	\$2,015.04					\$2,015.04				
Sustrato	\$860.00	\$860.00	\$860.00	\$860.00	\$860.00	\$860.00	\$860.00	\$860.00	\$860.00	\$860.00
Pesticida	\$910.10		\$910.10		\$910.10		\$910.10		\$910.10	
Mano de obra	\$64,800.00	\$76,500.00	\$76,500.00	\$76,500.00	\$76,500.00	\$76,500.00	\$76,500.00	\$76,500.00	\$76,500.00	\$76,500.00
Luz	\$7,219.54	\$7,219.54	\$7,219.54	\$7,219.54	\$7,219.54	\$7,219.54	\$7,219.54	\$7,219.54	\$7,219.54	\$7,219.54
Agua caliente	\$10,518.73	\$10,518.73	\$10,518.73	\$10,518.73	\$10,518.73	\$10,518.73	\$10,518.73	\$10,518.73	\$10,518.73	\$10,518.73
Agua dulce	\$63,560.00	\$63,560.00	\$63,560.00	\$63,560.00	\$63,560.00	\$63,560.00	\$63,560.00	\$63,560.00	\$63,560.00	\$63,560.00
Depreciación	\$48,584.35	\$48,584.35	\$48,584.35	\$48,584.35	\$48,584.35	\$48,584.35	\$48,584.35	\$48,584.35	\$48,584.35	\$48,584.35
Amortizaciones	\$38,553.29	\$38,553.29	\$38,553.29	\$38,553.29	\$38,553.29	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>Total OPEX</b>	<b>\$262,292.53</b>	<b>\$278,590.24</b>	<b>\$269,914.41</b>	<b>\$278,584.66</b>	<b>\$269,913.17</b>	<b>\$241,017.38</b>	<b>\$231,358.50</b>	<b>\$240,034.08</b>	<b>\$231,358.95</b>	<b>\$230,448.78</b>

Tabla 4.18 Flujo de caja libre modificado

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
<i>Ingresos</i>		\$ 223,548.9	\$ 320,933.8	\$ 320,840.7	\$ 320,375.5	\$ 320,716.7	\$ 217,472.7	\$ 320,578.8	\$ 320,646.6	\$ 320,623.3	\$ 320,616.2
OPEX		\$262,292.53	\$278,590.24	\$269,914.41	\$278,584.66	\$269,913.17	\$241,017.38	\$231,358.50	\$240,034.08	\$231,358.95	\$230,448.78
<i>Beneficios antes de impuestos</i>		- \$38,743.64	\$42,343.55	\$50,926.34	\$41,790.88	\$50,803.52	- \$23,544.68	\$89,220.35	\$80,612.54	\$89,264.32	\$90,167.47
PTU		\$0.00	\$4,234.35	\$5,092.63	\$4,179.09	\$5,080.35	\$0.00	\$8,922.03	\$8,061.25	\$8,926.43	\$9,016.75
Impuestos		\$0.00	\$0.00	\$13,559.78	\$11,283.54	\$13,716.95	-\$7,063.40	\$24,089.49	\$21,765.39	\$24,101.37	\$24,345.22
		0	0	\$0.27	0.27	0.27	0.3	0.27	0.27	0.27	0.27
<i>Ganancia neta</i>		- \$38,743.64	\$42,343.55	\$37,366.56	\$30,507.34	\$37,086.57	- \$16,481.28	\$65,130.85	\$58,847.16	\$65,162.95	\$65,822.25
<i>Beneficios antes de impuestos</i>		- \$38,743.64	\$42,343.55	\$50,926.34	\$41,790.88	\$50,803.52	- \$23,544.68	\$89,220.35	\$80,612.54	\$89,264.32	\$90,167.47
ISR		\$0.00	\$0.00	\$13,559.78	\$11,283.54	\$13,716.95	-\$7,063.40	\$24,089.49	\$21,765.39	\$24,101.37	\$24,345.22
<i>Beneficio después de impuestos</i>		- \$38,743.64	\$42,343.55	\$37,366.56	\$30,507.34	\$37,086.57	- \$16,481.28	\$65,130.85	\$58,847.16	\$65,162.95	\$65,822.25
<i>Depreciación</i>		\$48,584.35	\$48,584.35	\$48,584.35	\$48,584.35	\$48,584.35	\$48,584.35	\$48,584.35	\$48,584.35	\$48,584.35	\$48,584.35
<i>Amortization</i>		\$38,553.29	\$38,553.29	\$38,553.29	\$38,553.29	\$38,553.29	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
CAPEX	\$692,518.61	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<i>Inversión Fija</i>	\$485,843.46	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<i>Inversiones Diferidas</i>	\$192,766.44	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<i>Capital de Trabajo</i>	\$13,908.71	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<i>Flujo de caja libre</i>	- \$692,518.61	\$48,393.99	\$129,481.18	\$124,504.19	\$117,644.98	\$124,224.20	\$32,103.07	\$113,715.20	\$107,431.50	\$113,747.30	\$114,406.60

*Tabla 4.19 Indicadores financieros, modificado*

CMPC	7.43%
Horizonte Evaluación	10 Años
TIR	7.62%
VPN	\$6,094
Pay Back(meses)	84.274
Pay Back(años)	7.023
Relación Costo/Beneficio	1.5
ROI	5%

Al tener una Tasa Interna de Retorno (TIR) mayor al CMPC, indica que los inversionistas obtendrán ganancias del proyecto. El Retorno de la Inversión (ROI) indica la cantidad de perdidas o ganancias obtenidas de la inversión realizada. Al ser positiva, indica que se tendrán ganancias del proyecto. Se observa que el tiempo de retorno será de 7.023 años, por lo que sólo en tres años se obtendrían ganancias.

## Conclusiones

Se puede concluir en este capítulo lo siguiente:

- El proyecto puede llegar a ser rentable, ya que la tasa interna de retorno es mayor al costo medio ponderado de capital, y el tiempo de retorno es menor a los 10 años, que es la vida útil de los invernaderos.
- Se podría mejorar la rentabilidad del proyecto si se contara con un pozo local o solicitar una cotización con CONAGUA para un contrato de suministro de ésta.
- Se podría mejorar la rentabilidad del proyecto si se tuviera disponible agua dulce de un pozo local o solicitar una cotización con CONAGUA para un contrato de suministro de ésta.
- Se deberán hacer simulaciones de temperatura y de efectos de la reducción del agua de riego para saber cómo afectará a los cultivos con los cambios que se hicieron.
- Se debe buscar si al cosechar otros productos se puede reducir el tiempo de recuperación. Si se cambia el cultivo, afectará a las cargas térmicas.
- Se deben plantear propuestas para la reducción del tiempo de retorno, como los uso en cascada. Aunque se requiera de una inversión mayor, se tendrán mayores ganancias.
- Donde se tiene el principal costo, es en el agua dulce por el costo de la pipa, ya que no en todos los meses se tienen lluvias o en mejorar el sistema de captación de lluvia para obtener una mayor cantidad de agua.
- El costo del agua caliente es tan solo una aproximación de estudios previos en condiciones diferentes de operación, por lo que se debe realizar un análisis más a fondo o impulsar la realización de proyectos de usos directos para tener un costo del agua caliente en México. Principalmente porque al manejar el precio en dólares, se tendría una volatilidad en su valor.
- Se requiere de un análisis más riguroso para conocer la renta del lugar y el costo de la energía eléctrica, ya que se analizó como un promedio

## Capítulo 5 Conclusiones

En esta tesis se evaluó la tanto la factibilidad tecnológica y económica de la implementación de energía geotérmica para la climatización de un invernadero, con el propósito de producir flores ornamentales, en este caso rosas, a lo largo del año sin verse afectado por las condiciones climatológicas de la región de San Pedro Lagunillas, Nayarit.

Debido a diferentes factores como el cambio climático, volatilidad de precios de combustibles y al escaso apoyo a agricultores particulares, el campo mexicano se ha visto afectado a lo largo de los años. Es por ello que se busca la aplicación de tecnología económicamente atractivas y de fácil implementación para mejorar la producción de los cultivos, siendo una solución la implementación de invernaderos debido a que su construcción puede ser de manera artesanal como tecnificada.

Como se mencionó anteriormente, la volatilidad de los combustibles y el cambio climático debido al uso de combustibles fósiles afecta de manera directa en el uso de invernaderos, debido a que para mantener las condiciones idóneas de desarrollo de los cultivos se requiere de aportar energía térmica cuando la temperatura en el exterior del invernadero es menor a la necesario dentro del invernadero. Es por ello que se plantea el uso de recurso geotérmico con el fin de aprovechar recursos naturales que pueden ser renovables con el uso adecuado de éstos, además de que este tipo de energía está disponible las 24 horas del día y 365 días al año.

Se propuso la aplicación en San Pedro Lagunillas, Nayarit debido a la experiencia que tiene Grupo iiDEA en la zona con diferentes proyectos en conjunto con Grupo Dragón, además de ser un estado que una de sus principales actividades económicas es la agricultura y por tener un potencial geotérmico de hasta  $150 \text{ mW/m}^2$ . Se eligió a las rosas de corte debido a que las flores ornamentales no son un producto que se siembren normalmente en Nayarit, además de que el estado colinda con Jalisco, uno de los estados con mayor población en México y por ser un cultivo que se siembra principalmente en invernaderos por su rendimiento en invernadero de 7,379.57 gruesas por hectárea en comparación con su siembra a cielo abierto de 2,200.76.

Una de las consideraciones para este proyecto era el uso de recurso de baja entalpia, ya que en la zona de estudio cuenta con recurso de hasta  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ , es por ello que se buscó la solución que cumpliera con este parámetro. En el sistema propuesto se logró cumplir este parámetro, ya que se requiere de agua caliente a  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  para una temperatura promedio del agua caliente dentro del invernadero de  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ , considerando que a la salida se tengan  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se obtuvo un flujo másico de  $167.2 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$  para una longitud total de la tubería de 280 metros, y el uso de un intercambiador de calor de  $0.51 \text{ m}^2$  de superficie de transferencia de calor.

El análisis económico demostró que el tiempo de recuperación de la inversión del proyecto sería de 7 años, para una proyección de 10 años, ya que es el tiempo de vida útil de un invernadero. El principal costo que se tiene es la obtención de agua dulce debido a su utilización para el riego de los cultivos,

nebulización y agua de calefacción utilizada para la climatización del invernadero. El alto costo se debe a la utilización de pipas de agua para rellenar el tanque de almacenamiento de agua debido a que las lluvias no son suficientes para cubrir esta demanda.

Para trabajos futuros se proponen varios puntos: la automatización de los sistemas de climatización para un mejor control de la temperatura y humedad dentro del invernadero, así como la realización de simulaciones para verificar el comportamiento dentro del invernadero y tener aproximaciones más cercanas a la realidad. Otro punto importante es el reducir el tiempo de recuperación de la inversión para obtener mayores ganancias, esto se lograría obteniendo alguna concesión con el gobierno local para el suministro de agua dulce, el realizar de manera conjunta con la desalación de agua de mar mediante energía geotérmica o el implementar este tipo de tecnología con empresas que tengan acceso a un yacimiento geotérmico, aunque esto requeriría el cambiar la zona de estudio y las condiciones de trabajo.

## Anexo 1

Materiales utilizados en cubiertas simples, en dobles paredes o como pantallas térmicas	Espesor (mm)	Radiación solar (300-2.500 nm)			Radiación visible (380-760 nm)			Radiación térmica (2.500-40.000 nm)			U (W/m <sup>2</sup> ·°C)	Pc (g/cm <sup>3</sup> )
		(α = ε)	(τ)	(δ)	(α = ε)	(τ)	(δ)	(α = ε)	(τ)	(δ)		
Vidrio hortícola (VH)	4	0,03	0,89	0,08	0,01	0,91	0,08	0,90	0,00	0,10	6,7	2,40
Poliéster (PRV)	1	0,01-0,02	0,89-0,92	0,07-0,09	0,01	0,93	0,06	0,64-0,69	0,27-0,32	0,04		1,50
PVC rígido	18	0,11	0,62	0,27	0,02	0,61	0,37	0,92	0,01	0,07	3,8	1,30
Polimetacrilato de metilo (PMMA)	8	0,06	0,82	0,12	0,01	0,92	0,07	0,98	0,00	0,02	3,4	1,19
Polycarbonato (PC)	4	0,08-0,11	0,78	0,14-0,15	0,06-0,10	0,75-0,79	0,15	0,89-0,98	0,02-0,03	0,09	3,5	0,17-0,20
Poliétileno sin aditivos (PE)	0,1	0,01	0,88-0,91	0,08-0,11	0,01	0,88-0,91	0,08-0,11	0,04-0,19	0,79-0,84	0,02	9,1	0,92
Poliétileno de baja densidad (PEbd)	0,18	0,03	0,88	0,09	0,01	0,89	0,10	0,13-0,40	0,53-0,80	0,07	9,4-16,2	0,91
Poliétileno de larga duración (PEld)	0,1	0,03	0,88	0,09	0,01	0,89	0,10	0,20-0,40	0,53-0,76	0,04-0,07	9,4-16,2	0,92
Poliétileno infrarrojo (PEir)	0,1	0,03	0,89	0,08	0,01	0,89	0,10	0,77	0,20	0,03	8,6-13,0	0,92
Poliétileno térmico (PET)	0,18	0,03	0,89	0,08	0,02	0,90	0,08	0,80	0,10	0,03	8,6-13,0	0,92
Copolímeros EVA	0,1	0,02	0,89-0,91	0,07-0,09	0,00	0,90-0,92	0,08-0,10	0,42-0,58	0,39-0,55	0,03	7,8	0,94
Coextrusiones PE-EVA-PE	0,2	0,02-0,04	0,82-0,89	0,09-0,14	0,01	0,82-0,85	0,14-0,17	0,59	0,38	0,03	8,8-10,4	0,93
PVC plastificado	0,1	0,02	0,91	0,07	0,01	0,92	0,07	0,62	0,06	0,32	7,7	1,3
PVC armado	0,15	0,06	0,73-0,74	0,20-0,21	0,03	0,73-0,76	0,21-0,25	0,53-0,76	0,09-0,32	0,15	6,5	1,3
Polipropileno (PP)	0,8	0,06	0,74	0,20	0,04	0,73	0,23	0,69-0,71	0,21-0,26	0,05-0,08	11,2	0,91
VH+VH	4+4	0,15	0,72	0,13	0,03	0,82	0,15	0,83	0,00	0,17	3,2	
VH+PE	3,4+0,1	0,04	0,84	0,12	0,01	0,86	0,13	0,87	0,01	0,12	4,2	
VH+EVA	3,4+0,1	0,04	0,84	0,12	0,02	0,86	0,12	0,87	0,01	0,12	4,0	
PE+PE	0,1+0,1	0,03	0,83	0,14	0,00	0,84	0,16	0,28	0,66	0,06	6,8	
PE+EVA	0,1+0,1	0,03	0,87	0,10	0,00	0,88	0,12	0,59-0,70	0,27-0,38	0,03	9,4-10,2	
Pantalla aluminizada en las dos caras	0,04							0,50	0,10	0,40	7,6	
Cara aluminizada hacia el suelo	0,03							0,45	0,23	0,32	7,9	
Cara aluminizada hacia el cielo	0,03							0,50	0,23	0,27	8,1	

Fuentes:  Feuilleley et al., 1989  Nijskens et al., 1989  Nisen y Coutisse, 1981  
 Feuilleley et al., 1994 a.  Nijskens et al., 1984 a.  Nisen et al., 1984  
 Feuilleley y Issanchou, 1996  Nijskens et al., 1984 b.

Tabla A.1 Características principales de diferentes cubiertas plásticas de invernaderos (IDAE, 2008)

## Referencias

- Abglo. (31 de Marzo de 2020). *Abglo; Servicios Especializados Agropecuarios*. Obtenido de <https://www.abglo.com.mx/plastico-para-invernadero>
- Aguilar, R. (29 de Junio de 2017). *Slideshare*. Obtenido de LinkedIn Corporation: <https://es.slideshare.net/RosonielAguilar/manual-para-el-manejo-de-rosas>
- Alfa Laval. (2015). *Catalogo Alfa Laval*. Alfa Laval.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*. Portugal: University of Lisbon.
- Arévalo, J. J., Vélez, J. E., & Camacho Tamayo, J. H. (2013). *Uso eficiente del agua para el cultivo de rosa cv. Freedom bajo invernadero*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Asesoría Técnica Investigación y Servicios Agropecuarios, S. C. (2010). *Diagnóstico Sectorial en el Estado de Nayarit*. México: SAGRPA.
- Asociación Mexicana de Horticultura Protegida AC. (2018). *Agricultura protegida en México*. Obtenido de Agricultura protegida en México: <http://amhpac.org/2018/images/PDFoficial/HorticulturaenMexico.pdf>
- Avila, A., Campos, M., Guharay, F., & Camacho, A. (2013). *Aprendiendo e innovando sobre la cosecha, fermentación y secado del cacao*. Nicaragua: Lutheran World Relief.
- Aviña Jiménez, H. M. (2018). Balance por método de pérdidas. UNAM, México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Balansiya. (8 de Enero de 2018). *Restaurante Balansiya*. Obtenido de [https://www.balansiya.com/ingredientes\\_agua\\_rosas.html](https://www.balansiya.com/ingredientes_agua_rosas.html)
- Bastida Tapia, A. (2017). Evolución y Situación Actual de la Agricultura Protegida en México. En *Sexto Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agroeconómicas* (págs. 281-294). México: INIFAP.
- Bayer de México S.A. de C.V. (2018). *Agricultura Protegida en México*. Obtenido de Agricultura Protegida en México: <https://www.hablemosdelcampo.com/en-auge-la-agricultura-protegida-en-mexico/>
- Berk, Z. (2013). Food Process Engineering and Technology. En Z. Berk, *Food Process Engineering and Technology* (págs. 513-514). Estados Unidos: ELSEVIER.
- Bontsema, J., Hemming, J., Stanghellini, C., De Visser, P., Van Henten, E., Budding, J., . . . Nioer, S. (2007). *Online estimation of the transpiration in greenhouse horticulture*. Holanda: Wageningen University & Research.
- Bruzos, T. (25 de Marzo de 2011). *Cultivos en invernaderos*. Obtenido de [http://www.sabelotodo.org/agricultura/generalidades/consideraciones\\_agronomicas.html](http://www.sabelotodo.org/agricultura/generalidades/consideraciones_agronomicas.html)
- Cacho Carranza, Y. (2018). *Estado de la Energía Geotérmica en México*. Estado de México: Petroquimex.
- CanGEA. (2014). *Direct Utilization of Geothermal Energy: Suitable Applications and Opportunities for Canada*. Canada: CanGEA.
- CEDRSSA. (2017). *Las exportaciones agrícolas de México*. México: CEDRSSA.

- CEDRSSA. (2019). *El Sector Agropecuario en el PIB*. México: CEDRSSA.
- Cengel, Y. &. (2012). Termodinámica. En Y. &. Cengel, *Termodinámica* (pág. 149). México: Mc Graw Hill.
- Cengel, Y. A. (2000). *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico*. México: Mc Graw Hill.
- CFE. (30 de Julio de 2020). *Conoce tu tarifa*. Obtenido de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Tarifas/Tarifa1B.aspx>
- CFE. (10 de Agosto de 2020). *Consulta tu tarifa*. Obtenido de [https://app.cfe.mx/aplicaciones/ccfe/tarifas/tarifas/tarifas\\_negocio.asp?Tarifa=HM&Anio=2017&](https://app.cfe.mx/aplicaciones/ccfe/tarifas/tarifas/tarifas_negocio.asp?Tarifa=HM&Anio=2017&)
- CONAGUA. (20 de Agosto de 2020). *Contrato de servicio de agua potable*. Obtenido de <https://www.gob.mx/tramites/ficha/contrato-de-servicio-de-agua-potable/Entidades7307>
- Cortés Jiménez, S. (2011). *Producción de rosas para flor de corte en suelo abonado con biosólidos (Tesis de pregrado)*. México: Universidad Autónoma de Chapingo.
- CRE. (30 de Julio de 2018). *Comisión Reguladora de Energía*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/cre/prensa/la-cre-aprueba-una-nueva-division-de-zonas-tarifarias-aplicables-al-sistrangas>
- CRE. (28 de Septiembre de 2020). *Índices de Referencia de Precios de Gas Natural*. Obtenido de <https://www.cre.gob.mx//IPGN/index.html>
- Cubillos, G., Merizalde, G. J., & Correa, E. (2008). *Manual de beneficio del cacao*. Colombia: Secretaria de agricultura de Antioquia.
- Damodaran, A. (17 de Agosto de 2020). *Country Default Spreads and Risk Premiums*. Obtenido de [http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New\\_Home\\_Page/datafile/ctryprem.html](http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/ctryprem.html)
- Damodaran, A. (17 de Agosto de 2020). *Total Betas by Sector*. Obtenido de [http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New\\_Home\\_Page/datafile/totalbeta.html](http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/totalbeta.html)
- de la Helguera y García, Á. (13 de Abril de 2006). *Eumed.net*. Obtenido de Eumed.net: <http://www.eumed.net/libros-gratis/2006a/ah-prod/2d.htm>
- Díaz Mora, R. (2004). El proceso. En R. Díaz Mora, *Probar que se puede maximizar la utilización del invernadero en la siembra de jitomate, tomando para estudio el invernadero "Back to Basics" ubicado en la ciudad de Tehuacán* (págs. 4-7). Puebla: Universidad de las Américas de Puebla.
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal Energy: Utilization and technology*. Francia: UNESCO.
- Dubón, A. (2014). *10 consejos para lograr cacao de calidad*. Honduras: Fundación Hondureña de Investigación Agrícola.
- Dubón, A. (2016). *Protocolo para el Beneficiado y Calidad del Cacao*. Honduras: Fundación Hondureña de Investigación Agrícola.
- Ekos. (1 de Febrero de 2019). *Ecuador es el tercer exportador mundial de flores*. Obtenido de <https://www.ekosnegocios.com/articulo/ecuador-es-el-tercer-exportador-mundial-de-flores>
- El Economista. (22 de Marzo de 2019). *El Economista*. Obtenido de <https://www.eleconomista.com.mx/politica/Corredores-comerciales-Mexico-EU-20190322-0063.html>

- Emeish, M. (1999). *Geothermal heating system for jordanian greenhouses*. Islandia: The United Nations University.
- FAO. (2002A). *Agua y cultivos*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/y3918s/y3918s00.htm#TopOfPage>
- FAO. (2002B). *El cultivo protegido en clima mediterráneo*. Roma: Organización De Las Naciones Unidas Para La Agricultura Y La Alimentación.
- FAO. (2013). *Code of practice for the prevention and reduction of ochratoxin a contamination in cocoa*. FAO.
- FIRA. (2011). *Consejos prácticos para invertir en invernaderos*. Michoacán: FIRA.
- FIXR. (20 de Septiembre de 2018). *FIXR*. Obtenido de FIXR: <https://www.fixr.es/guias-de-precios/invernadero>
- Floricultura y Servicios Ornamentales el Organal, S:C de R.S. (2009). La infraestructura y sistemas requeridos para el desarrollo de clústers de horticultura ornamental orientados a la exportación de productos de valor agregado a los Estados Unidos y Canadá. En S. d. Floricultura y Servicios Ornamentales el Organal, *La infraestructura y sistemas requeridos para el desarrollo de clústers de horticultura ornamental orientados a la exportación de productos de valor agregado a los Estados Unidos y Canadá* (págs. 2-13). México: SAGARPA.
- Francisco Tellez, M. R. (2010). *Producción de rosas (Rosa spp.) y su importancia económica*. Coahuila: Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro".
- Fundación PRODUCE Chiapa, A.C. (2016). *Manual de la producción de la rosa*. México: Soluciones Estratégicas.
- Fundación PRODUCE Chiapas, a.c. (2009). *Manual de producción de la rosa*. Chiapas: SAGARPA.
- Geothermal Education Office. (2000). *Geothermal Education Office*. Obtenido de Geothermal Education Office
- Gijón Belenguer, R. (5 de Enero de 2018). *Los jardines en el antiguo Egipto*. Obtenido de [http://espaciosverdes2017.blogspot.com/2018/01/los-jardines-en-el-antiguo-egipto\\_5.html](http://espaciosverdes2017.blogspot.com/2018/01/los-jardines-en-el-antiguo-egipto_5.html)
- Gómez Mena, C. (10 de Octubre de 2018). *La Jornada*. Obtenido de Asociación de Consumidores Orgánicos: <https://consumidoresorganicos.org/2018/10/10/mexico-tercer-lugar-en-cultivo-flores/>
- Google Maps. (12 de Marzo de 2020). *Google Maps*. Obtenido de <https://www.google.com.mx/maps/@21.1862895,-104.7195017,522m/data=!3m1!1e3?hl=es&authuser=0>
- Grainger. (2019). *Grainger México*. Obtenido de [https://www.grainger.com.mx/producto/Equipo-para-Exteriores/Rociadores-y-Aspersores/Rociadores-de-Aire-Comprimido/p/310UN5?gclid=Cj0KcQjwhIP6BRCMARIsALu9LfnGpBADxk9jUNP9INLyUjGU6EQWW3NSQ7MAHU5KSDXj2b1jv8A3mAAaAt1REALw\\_wcB&cm\\_mmc=pla:10:108:105:303:AllProd](https://www.grainger.com.mx/producto/Equipo-para-Exteriores/Rociadores-y-Aspersores/Rociadores-de-Aire-Comprimido/p/310UN5?gclid=Cj0KcQjwhIP6BRCMARIsALu9LfnGpBADxk9jUNP9INLyUjGU6EQWW3NSQ7MAHU5KSDXj2b1jv8A3mAAaAt1REALw_wcB&cm_mmc=pla:10:108:105:303:AllProd)
- Green Tech Americas. (29 de Enero de 2020). *Inforural*. Obtenido de <https://www.inforural.com.mx/mexico-potencia-mundial-en-agricultura-protegida/>

- Gutiérrez Negrín, L., Maya González, R., & Quijano León, J. L. (2015). *Present Situation and Perspectives of Geothermal in Mexico*. Australia: Proceedings World Geothermal Congress.
- Harford, T. (16 de Febrero de 2020). *Cómo unas ingeniosas cajas de cristal se volvieron poderosas armas en manos de colonizadores británicos*. Obtenido de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-51474420>
- Hernán Pepa, G. (27 de Noviembre de 2013). *Córdoba Times*. Obtenido de <https://www.cordobatimes.com/el-campo/2013/11/27/sabe-usted-como-se-mide-la-lluvia/>
- Hogarmania. (18 de Enero de 2016). *horgamania*. Obtenido de <https://www.bioenciclopedia.com/rosa/>
- HortiPoint, & Rabobank. (25 de Noviembre de 2016). *International Trade Center*. Obtenido de <http://www.intracen.org/blog/World-Floriculture-Map-2016-equator-countries-gathering-speed/>
- Hurtado Arroyo, N. G. (2017). *Evaluación del uso de bombas de calor geotérmicas en invernaderos*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Hydro Enviroment. (2020). *Catálogo de productos*. Obtenido de <https://hydroenv.com.mx/catalogo/#popup>
- IDAE. (2008). *Ahorro y eficiencia energética en invernaderos*. España: IDAE.
- IDAE. (2010). *Guía técnica: Diseño de sistemas de bombas de calor geotérmica*. España: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- Iglesias y Cabrera, S. (15 de Abril de 2014). *komoni*. Obtenido de Chemisax: <https://komoni.chemisax.com/la-primera-chinampa/>
- IMA. (11 de Marzo de 2020). *IMA Invernaderos*. Obtenido de <https://www.invernaderosima.com/es/inicio.html>
- IMA Invernaderos. (6 de Noviembre de 2019). Obtenido de Pantalla térmica: <https://www.invernaderosima.com/es/pantalla-t%C3%A9rmica.html>
- IMTA. (25 de Agosto de 2020). *Tarifas de uso industrial*. Obtenido de <http://187.189.183.90/graficaind.php>
- INAFED. (2010). *Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México*. Obtenido de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM18nayarit/municipios/18013a.html>
- indeed. (10 de Agosto de 2020). *Salarios de Supervisor/a de producción en México*. Obtenido de <https://www.indeed.com.mx/salaries/supervisor-de-producci%C3%B3n-Salaries>
- INEGI. (2015). Balanza comercial de mercancías de México Anuario estadístico 2014 Exportaciones en dólares. En I. N. Geografía, *Balanza comercial de mercancías de México Anuario estadístico 2014 Exportaciones en dólares* (págs. 24-26). México: INEGI.
- INEGI. (15 de Julio de 2016). *Cuéntame... Información por entidad*. Obtenido de INEGI: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/nay/territorio/clima.aspx?tema=m&e=18>
- INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Nayarit 2017*. Nayarit: INEGI.

- INEGI. (17 de Marzo de 2020). *Estadísticas de la Balanza Comercial de Mercancías de México*. Obtenido de [https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/consulta/general\\_ver4/MDXQueryDatos.asp?c=23725](https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?c=23725)
- Instituto de geofísica de la UNAM. (29 de Mayo de 2017). *Publicaciones IGeF*. Obtenido de <http://www.geofisica.unam.mx/publicaciones.html>
- Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal. (25 de Octubre de 2010). *Cultivo de Rosa*. Obtenido de <http://icamex.edomex.gob.mx/rosa>
- Investing. (17 de Agosto de 2020). *Rentabilidad del bono de México 10 años*. Obtenido de <https://mx.investing.com/rates-bonds/mexico-10-year>
- Jasso Rivera, A. (2016). *Invernadero geotérmico de baja entalpia para cultivos de jitomates*. México: UNAM.
- Jorquera, C. (4 de Junio de 2019). *Piensa en Geotermia*. Obtenido de <http://www.piensageotermia.com/los-10-principales-paises-geotermicos-a-diciembre-2018-capacidad-instalada-mwe/>
- Joshel, C., & Melnicoe, R. (2004). *Crop Timeline for California Greenhouse Grown Cut Roses*. California: University of California.
- Juárez Andrade, V., & Mendoza Mendoza, K. (2015). *Metodología de cálculo para el diseño térmico de un intercambiador de calor de placas*. Méxcio: UNAM.
- Kamenan Koua, B., Ekoun Koffi, P. M., & Gbaha, P. (2017). *Evolution of shrinkage, real density, porosity, heat and mass transfer coefficients during indirect solar drying of cocoa beans*. Arabia Saudita: ScienceDirect.
- Kern, D. (1999). *Procesos de transferencia de calor*. México: Compañía Editorial Continental.
- Kool, M., & de Koning, J. (1996). *Analysis of rose crop production*. Países Bajos: Wageningen Agricultural University.
- Land O'Lakes International Development y Winrock International . (2013). *Priority Geothermal Direct-Use Applications for Kenya: A Pre-Feasibility Study for Greenhouses*. United States: USAID.
- Lienau, P. J. (1997). *Geothermal Greenhouse Development Update*. Estados Unidos de América: Geo-Heat Center Quarterly Bulletin.
- LLopis Trillo, G., & Rodrigo Angulo, V. (2008). *Guía de la energía geotérmica*. España: Dirección General de la industria, energía y minas.
- López, R. (2017). *Manual para el manejo del cultivo de Rosas Bajo condiciones de invernadero*. San Marcos: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2015). *Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review*. Estados Unidos de América: ELSEVIER.
- ManualPDF.es. (27 de Septiembre de 2020). *ManualPDF.es*. Obtenido de <https://www.manualpdf.es/whirlpool/wk71322q/manual?p=2>
- Mitula. (8 de Septiembre de 2020). *Terrenos en renta en Nayarit*. Obtenido de <https://casas.mitula.mx/casas/renta-terrenos-nayarit>

- NASA. (6 de Noviembre de 2019). Obtenido de POWER Data Access Viewer:  
<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- NASA. (22 de 08 de 2019). *NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources*. Obtenido de  
<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- NASA. (06 de Mayo de 2020). *POWER Data Access Viewe*. Obtenido de  
<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Navarro, K. (26 de Noviembre de 2018). *cienciamx noticias*. Obtenido de  
<http://cienciamx.com/index.php/tecnologia/energia/24825-climatizar-geotermia-cemie-upbc>
- Novagric. (23 de Octubre de 2008). Obtenido de Pantallas para invernaderos:  
<https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/materiales-y-estructuras/pantallas-invernaderos>
- NOVAGRIC. (2016). *Tipos de invernaderos*. Obtenido de NOVAGRIC:  
<https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/tipos-de-invernaderos>
- Observatorio de Inteligencia del Sector Energético. (2016). *OISE*. Obtenido de  
<http://www.oise.mx/geotermica>
- OIRSA. (2016). *Manual de buenas prácticas agrícolas de proceso y empaque del cacao*. El Salvador: OIRSA.
- orensila. (Diciembre de 2019). *freepik*. Obtenido de [https://www.freepik.es/vector-premium/ilustracion-isometrica-3d-invernadero-cultivo-plantulas-invernadero\\_5963001.htm](https://www.freepik.es/vector-premium/ilustracion-isometrica-3d-invernadero-cultivo-plantulas-invernadero_5963001.htm)
- Ortega, H. (2018). *Energía Solar Térmica Para Procesos Industriales En México Estudio base de mercado*. Mexico: CONUEE.
- Ortiz, A. (28 de Junio de 2018). *Sentido Común*. Obtenido de  
<http://www.consentidocomun.mx/nayarit-en-el-marco-de-los-gasoductos-sociales/>
- Park, B.-S., Kang, T.-H., & Han, C.-S. (2015). *Analysis of Heating Characteristics Using Aluminum Multi-Layer Curtain*. Corea del Sur: The Korean Society for Agricultural Machinery.
- Parra Rosero, P. (2013). *Secado artificial de cacao. Estado del arte*. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana Ecuador.
- PI INGENERA - GRUPO IIIDEA. (2019). *INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DE UN SISTEMA MODULAR GEOTÉRMICO PARA LA DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS DGA*. Ciudad de México: PI Ingenera.
- PI ingenera, Grupo iiDEA. (2019). *Informe climatológico y metereológico del proyecto DGA600*. México: PI ingenera.
- PireKrone. (11 de Mayo de 2019). *Bioinsecticida*. Obtenido de  
<http://www.biokrone.com/bioinsecticida/pire-krone/>
- PISUMMA. (21 de Febrero de 2017). *EcoSustrato para Rosas y Claveles*. Obtenido de  
<https://pisumma.com/producto/ecosustrato-para-rosas-y-claveles/>
- Plasson. (2018). *Sistema De Nebulización 70psi*. México: Plasson.

- Rafferty, K., & Boyd, T. (2008). *Geothermal Greenhouse Information Package*. Oregon: U.S. Department of Energy.
- Ramírez Hernández, J. J., & Avitia Rodríguez, J. A. (2016). *Floricultura mexicana en el siglo XXI: su desempeño en los mercados internacionales*. México: Revista de Economía.
- Ramos Novelo, J. A. (14 de Septiembre de 2010). *El Economista*. Obtenido de El Economista: <https://www.economista.com.mx/opinion/Lo-que-debes-saber-antes-de-invertir-en-invernaderos-20100914-0004.html>
- Reid, A. (2008). Greenhouse roses for cutflower production. En A. Reid, *Greenhouse roses for cutflower production* (pág. 3). Western Australia: Department of Agriculture and Food, Western Australia.
- Rodríguez Rivas, D. (2009). *Curso de cultivos protegidos*. Colombia: SENA y la Fundación Agricultores Solidarios - España.
- Rodríguez Zárate, E. F. (2013). *Propuesta de diseño de un intercambiador de calor de placas para el ciclo PWG*. México: UNAM.
- Romero Arellano, M. C. (2013). *Rendimiento Y Calidad De Producción De Cinco Cultivares De Rosa En El Municipio De Tenancingo, Estado De México*. Estado de México: Universidad Autónoma Del Estado De México.
- Romo, P. (24 de Junio de 2018). *El Economista*. Obtenido de <https://www.economista.com.mx/estados/Floricultura-el-cultivo-mas-rentable-UdeG-20180625-0006.html>
- Rosa. (2015). *BioEnciclopedia*. Obtenido de <https://www.bioenciclopedia.com/rosa/>
- Ruíz Corral, J. A., Medina García, G., González Acuña, I. J., Flores López, H. E., Ramírez Ojeda, G., Ortiz Trejo, C., . . . Martínez Parra, R. A. (2013). Requerimientos agroecológicos de cultivos. En J. A. Ruíz Corral, G. Medina García, I. J. González Acuña, H. E. Flores López, G. Ramírez Ojeda, C. Ortiz Trejo, . . . R. A. Martínez Parra, *Requerimientos agroecológicos de cultivos* (págs. 419-421). México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- SAGARPA. (2010). *Diagnóstico Sectorial en el Estado de Nayarit*. Nayarit: Asesoría Técnica Investigación y Servicios Agropecuarios, S. C.
- Salazar Moreno, R., López Cruz, I. L., & Sánchez Cruz, A. C. (2018). *Modelo dinámico de balance de energía en un invernadero con cultivo de tomate: simulación, calibración y evaluación*. México: Revista Chapingo.
- Santoyo, E., & Barragán Reyes, R. M. (2010). *Energía geotérmica*. México: ResearchGate GmbH.
- SIAP. (2018). *Atlas Agroalimentario 2012-2018*. México: SIAP.
- SIAP. (12 de Junio de 2019). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Obtenido de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- SIAP. (2019). *gob.mx*. Obtenido de Anuario Estadístico de la Producción Agrícola: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Singh, A. (2017). *THERMAL MODELING OF ASYMMETRIC OVERLAP ROOF GREENHOUSE FOR YEAR ROUND MICROCLIMATE CONTROL*. India: Punjab Agricultural University.

- SNIIM. (15 de Agosto de 2020). *Mercados Nacionales Agrícolas*. Obtenido de <http://www.economia-sniim.gob.mx/nuevo/Home.aspx?opcion=Consultas/MercadosNacionales/PreciosDeMercado/Agricolas/ConsultaFlores.aspx?SubOpcion=5|0>
- Soler & Palau. (16 de Enero de 2017). Obtenido de Climatización de un invernadero: caso práctico: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/climatizacion-de-un-invernadero/>
- Subedi, A., & Chávez, J. L. (2015). *Crop Evapotranspiration (ET) Estimation Models: A Review and Discussion of the Applicability and Limitations of ET Methods*. Colorado: Colorado State University.
- Tejeda Sartorius, O., Ríos Barreto, Y., Trejo Téllez, L. I., & Vaquera Huerta, H. (2015). *Caracterización de la producción y comercialización de flor de corte en Texcoco, México*. Estado de México: Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.
- Universidad de la República. (2015). *Hidraulica*. Obtenido de <http://www.fagro.edu.uy/~hidrologia/riego/HIDRAULICA%202015.pdf>
- Urquijo, I. (6 de Agosto de 2014). *Taller de flores*. Obtenido de Inesurquijo: <http://inesurquijo.com/2014/08/06/1112/>
- Valerio, M. (27 de Mayo de 2016). *Uso eficiente del personal en cultivo protegido*. Obtenido de <https://www.hortalizas.com/horticultura-protegida/uso-eficiente-del-personal-en-cultivo-protegido/>
- Vallejo, A., & Asunción, M. (2004). Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. En A. Vallejo, & M. Asunción, *El invernadero mediterráneo* (págs. 23-25). Cataluña: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Vallen. (2019). *Overol para Proteccion Quimica Tela Microgard Plus con Capucha | Ansell*. Obtenido de [https://www.vallen.com.mx/seguridad/proteccion-corporal/ropa-proteccion-general-acidos-calor-frio/overol-para-proteccion-quimica-tela-microgard-plus-con-capucha-ansell\\_pc-7-88aa-l](https://www.vallen.com.mx/seguridad/proteccion-corporal/ropa-proteccion-general-acidos-calor-frio/overol-para-proteccion-quimica-tela-microgard-plus-con-capucha-ansell_pc-7-88aa-l)
- Van Beveren, P., Bontsema, J., Van Straten, G., & Van Henten, E. (2014). *Minimal heating and cooling in a modern rose greenhouse*. Holanda: ELSEVIER.
- Villamizar de Borrero, F., & Hernandez H., J. E. (1989). *Determinación de parámetros y simulación matemática del proceso de secado del cacao (Theobroma cacao)*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Weather Spark. (6 de 11 de 2019). Obtenido de El clima promedio en San Pedro Lagunilla México: <https://es.weatherspark.com/y/3635/Clima-promedio-en-San-Pedro-Lagunillas-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Weather Spark. (2019). *Weather Spark*. Obtenido de <https://es.weatherspark.com/y/3635/Clima-promedio-en-San-Pedro-Lagunillas-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- World Bank Group. (18 de Febrero de 2020). *Global Solar Atlas*. Obtenido de <https://globalsolaratlas.info/map?c=21.184782,-104.721554,11&s=21.184782,-104.721554&m=site>
- World History Archive, Alamy Foto. (10 de Marzo de 2020). *Ilustración que muestra en la azotea, un invernadero de cristal y acero para uso hortícola. 1893*. Obtenido de

<https://www.alamy.es/ilustracion-que-muestra-en-la-azotea-un-invernadero-de-cristal-y-acero-para-uso-horticola-1893-image235180392.html>

Yong, A. (2004). *El cultivo del rosal y su propagación*. Cuba: Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas.

Zeroni, M., & Gale, J. (1982). The effect of root temperature on rose plants in relation to air temperature. *Scientia Horticulturae*, 177-184.

Zeroni, M., & Gale, J. (1987). The effect of root temperature on rose plants in relation to air temperature. *Plant and soil*, 93-98.