



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

“Diseño de un Invernadero para la Producción de Chile Manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.) en el Municipio de Tenancingo, Estado de México”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PRESENTA:

DAMIÁN CÁRDENAS HIDALGO

Asesor: M.C. Roberto Guerrero Agama

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

“AGRADECIMIENTOS”

Agradezco profundamente a mi mamá y a mi abuelita por sacarme adelante.

Agradezco al M.C. Roberto Guerrero Agama por su tiempo, su atención y su paciencia durante todo este tiempo.

Agradezco al Ing. Valeriano López Morales por ayudarme a realizar y darle término a este trabajo, por su tiempo y dedicación y todos sus conocimientos.

Agradezco a la empresa “IMAAS Invernaderos” por abrirme las puertas y ayudarme a cristalizar este trabajo, en especial a los ingenieros Eleazar Bautista Hernández y Jorge Aguilar García y a todo el personal que labora por su apoyo y amabilidad.

Agradezco a Yetzi por ayudarme y apoyarme en todos los aspectos para terminar este trabajo y seguir adelante.

ÍNDICE

Índice de Cuadros y Tablas	i
Índice de Figuras	ii
Índice de Gráficas	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	4
III. MARCO DE REFERENCIA	
3.1. Invernadero, ventajas y desventajas	5
3.1.1. Tipos de invernaderos	6
3.1.2. Materiales de Estructuras para invernaderos	12
3.1.3. Materiales de Cubiertas	14
3.2. Antecedentes sobre diseño de invernaderos en zonas templadas de México	17
3.3. Diseño	23
3.3.1. Diseño funcional del invernadero	25
3.3.1.1. Factores geográficos	25
3.3.1.2. Factores climáticos	26
3.3.1.3. Factores técnicos	39
3.3.2. Diseño estructural para el invernadero	40
3.3.2.1. Cargas o acciones	41
3.3.2.2. Armaduras	46
3.3.2.3. Esfuerzo	54
3.4. Estudio Socioeconómico del municipio de Tenancingo, Estado de México	57
3.4.1. Ubicación	57

3.4.2. Características Climáticas	57
3.4.3. Características Edáficas	59
3.4.4. Actividades Agropecuarias	61
3.4.5. Infraestructura para la producción	62
3.5. Antecedentes y estudios técnicos de la producción de chile	
manzano (<i>Capsicum pubescens</i> R. y P)	64
3.5.1. Proceso de producción	68
IV. PROYECTO	
4.1. Ubicación del proyecto	73
4.2. Diseño del invernadero	74
4.3. Control ambiental dentro del invernadero	75
4.3.1. Sistema de iluminación	77
4.3.2. Sistema térmico	78
4.3.3. Sistema de humedad	83
4.4. Cubierta plástica	86
4.5. Cálculos de la estructura	87
4.5.1. Determinación de las cargas en la estructura	90
4.5.2. Esfuerzo máximo en la columna	102
4.5.3. Esfuerzo máximo en tornillo	110
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
VI. BIBLIOGRAFÍA	115
VII. ANEXOS	120

ÍNDICE DE CUADROS Y TABLAS

Cuadro 1. Ventajas y desventajas de los invernaderos	6
Cuadro 2. Tipos de suelo	59
Cuadro 3. Cantidad de fertilizantes utilizados para preparar 1,000 litros de solución nutritiva	70
Cuadro 4. Estimación del peso de la armadura	92
Cuadro 5. Sumatoria de fuerzas que actúan en la estructura.	101
Cuadro 6. Esfuerzos a los que están sometidos los elementos estructurales	102
Tabla 1. Calidad y efecto de la radiación solar sobre las plantas	29
Tabla 2. Horas luz promedio por mes para México	31
Tabla 3. Velocidades del viento	45
Tabla 4. Cargas normales del viento	45
Tabla 5. Datos de Normales Climatológicas 1971-2000	73
Tabla 6. Pesos, dimensiones y calibres perfil cuadrado ZC cal. 14	91
Tabla 7. Especificaciones del cable de acero galvanizado	95
Tabla 8. Espesores medios más comunes de los filmes	120
Tabla 9. Peso y superficie de plásticos de diferentes películas de plásticos.	120
Tabla 10. Porcentaje de transparencia a la radiación solar de las películas de plástico	120
Tabla 11. Comparación de materiales flexibles para cubiertas de invernaderos	121
Tabla 12. Superficies, pesos y densidad de láminas flexibles	121
Tabla 13. Factor de variación con la altura F_{α}	121
Tabla 14. Factor F_{TR} (Factor de topografía y rugosidad del terreno)	122
Tabla 15. Rugosidad del terreno α y δ	122

Tabla 16. Coeficientes de presión C_p para cubiertas en arco ¹	122
Tabla 17. Coeficiente C_p para construcciones cerradas	123
Tabla 18. Coeficientes de presión para elementos de recubrimiento en cubiertas de arco.	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Unimodular	6
Figura 2. Multimodular	7
Figura 3. Tipo Capilla	8
Figura 4. Tipo Asimétrico	9
Figura 5. Tipo Túnel	9
Figura 6. Tipo Cenital	11
Figura 7. Tipo Sierra	11
Figura 8. Perfil tubular de acero galvanizado	13
Figura 9. Efecto invernadero	15
Figura 10. Orientación en base a mayor aprovechamiento de radiación solar	26
Figura 11. Esquema del espectro electromagnético y radiación visible	27
Figura 12. Cantidad de luz recibida por un invernadero con relación a la orientación y forma de la cubierta	32
Figura 13. Orientación que disminuye la resistencia a vientos dominantes	38
Figura 14. Movimiento del aire dentro del invernadero	39
Figura 15. Regiones sísmicas de México	43
Figura 16. Regiones eólicas de México	46
Figura 17. Tipos de armaduras según su forma	47
Figura 18. Partes de una estructura	47
Figura 19. Elementos estructurales principales y su disposición	49

Figura 20. Disposición de contravientos en marcos rígidos	49
Figura 21. Rigidez de un marco con contraviento	50
Figura 22. Representación esquemática de fuerzas de compresión y flexión, en columnas y vigas respectivamente	50
Figura 23. Tipos de esfuerzos	54
Figura 24. Tipos de esfuerzos y deformaciones	55
Figura 25. Deformación debida a los esfuerzos normales axiales	56
Figura 26 Deformación debida a los esfuerzos cortantes	56
Figura 27. Ubicación geográfica de Tenancingo, Edo. Méx.	57
Figura 28. Dimensiones: largo, ancho y altura	74
Figura 29. Dimensiones: ancho y altura	75
Figura 30. Acomodo del cultivo	76
Figura 31. Ventilación lateral	80
Figura 32. Ventilación cenital	81
Figura 33. Altura máxima y altura de las columnas	82
Figura 34. Área del marco, arco y ventila cenital del invernadero	83
Figura 35. Líneas de distribución del sistema de riego por goteo	85
Figura 36. Forma del invernadero y medidas de los elementos estructurales	89
Figura 37. Inclinación de la ventila cenital	89
Figura 38. Ubicación y longitud de los montantes o tensores	90
Figura 39. Elementos del invernadero	91
Figura 40. Distribución de las plantas a lo ancho (vista de lado)	94
Figura 41. Distribución de las plantas a lo largo (vista de frente y lado)	94
Figura 42. Área de influencia por la fuerza del viento por columna	98

Figura 43. Área de acción del viento en el arco superior	99
Figura 44. Área de acción del viento en el arco inferior	99
Figura 45. Fuerzas que actúan sobre la estructura	102
Figura 46. Deformación del invernadero por la carga del cultivo	104
Figura 47. Descomposición de la Fuerza del cultivo en su componente Horizontal	105
Figura 48. Fuerzas que actúan en la columna	106
Figura 49. Diagrama de cuerpo libre de la columna	107
Figura 50. Unión de columna y arco mediante dos tornillos	111
Figura 51. Unión de columna y trabe de carga con un tornillo	112
Figura 52. Formas topográficas locales	123
Figura 53. Rugosidad de terreno	124
Figura 54. Cubiertas en arco	124
Figura 55. Elementos de recubrimiento en cubiertas en arco	124

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Temperatura promedio	58
Gráfica 2. Precipitación promedio	59
Gráfica 3. Climograma: temperaturas máximas y mínimas normales por mes	79

RESUMEN

Se diseñó un invernadero semitecnificado tipo túnel modificado con ventana cenital para establecer el cultivo de chile manzano en el municipio de Tenancingo, Estado de México y poder diversificar la producción hacia el mercado de las hortalizas ya que actualmente esa zona se dedica principalmente a la floricultura.

Para el diseño funcional se tomaron en cuenta las condiciones agroclimáticas del municipio, principalmente los factores de luminosidad, temperatura, humedad relativa y CO₂ que existen en la zona, para compararlos con los requerimientos del cultivo de chile manzano y así poder determinar el diseño óptimo del invernadero y definir los elementos complementarios de control ambiental para cubrirlos.

Para el diseño estructural se determinaron las cargas a las que estará sometida la estructura del invernadero. Se calcularon dichos esfuerzos producidos por las fuerzas calculadas en la determinación de las cargas sobre la estructura y se compararon con la resistencia de fluencia del perfil de acero a utilizar. En el cálculo de los esfuerzos se aplicaron los valores máximos para asegurar que la resistencia de fluencia del material al ser mayor al esfuerzo máximo presente en el elemento, la estructura soportará las cargas determinadas. Se analizó principalmente la columna y la tornillería, como elementos representativos que forman parte de los puntos más críticos, siendo los más propensos a fallar por la acumulación de esfuerzos antes que el resto de los elementos de la estructura.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de flores en Tenancingo, Estado de México tiene un precio bajo, debido a que la región, junto al municipio de Villa Guerrero, se dedica principalmente a la producción de flores. Es por esto que se planea diversificar la producción, ya que las hortalizas se presentan como una opción a los pequeños productores para acceder al mercado local y hasta regional; de esta forma se puede conseguir un ingreso económico para el beneficio de las familias de este municipio.

De esta manera, se propone el cultivo de chile manzano como alternativa, puesto que es una planta considerada perenne; esto es, que no se tiene la necesidad de cambiar la plantación. Producido de forma intensiva en invernadero, es posible aprovechar su vida útil hasta cinco años, manteniendo un control adecuado en la planta: poda, fertilización, tutorado y control de plagas y enfermedades.

A diferencia de otras hortalizas como el jitomate, cuyo precio en el mercado fluctúa mucho, el precio del chile manzano se mantiene estable a lo largo del año, aunque en los meses de febrero a junio, tiene un alza en el precio; esto es debido a que la producción de temporal se establece de agosto a diciembre. Claro está, que con una producción de invernadero se obtiene una mejor calidad de fruto; esta característica, precisamente, es la que hace competir sin ningún problema con la producción de temporal.

En nuestro país ha tomado gran importancia la horticultura protegida porque comprende una serie de técnicas o sistemas de producción que permiten modificar el ambiente natural en el que se desarrollan los cultivos, con el propósito de alcanzar un crecimiento vegetal óptimo y, con ello un alto rendimiento, o bien obtener cosechas en fechas en las que con los cultivos conducidos tradicionalmente no pueden obtenerse si no es con un alto riesgo.

El territorio mexicano presenta diversas regiones climáticas, principalmente templadas, áridas y tropicales, debido a esto tenemos dentro del país distintas zonas productoras de alimentos. Cada región presenta fenómenos climáticos adversos que reducen la producción agrícola, teniendo como consecuencia problemas económicos y sociales para los pequeños y medianos productores rurales.

El tratar de controlar y aminorar los efectos y las variaciones desfavorables del medio ambiente para proteger los cultivos es un problema que ha sido resuelto con la introducción de invernaderos.

El clima se convierte en el factor primordial para elegir un invernadero: se debe pensar en seleccionar un tipo de construcción que mejore el ambiente del exterior en su interior para que los cultivos se desarrollen adecuadamente. Con esta tecnología se puede obtener mejor calidad y cantidad en la producción de un cultivo, siempre y cuando se elija la construcción y el diseño apropiados. Estos deben tomar en cuenta el clima, la temperatura y la humedad de cada zona, así como las necesidades del cultivo, lo cual quiere decir que cada región requiere un invernadero diferente (Antonio, 2006).

Es necesario subrayar que la problemática no sólo llega hasta el control ambiental. Lamentablemente esta tecnología no está al alcance de todos los productores, en especial de los pequeños, debido a los altos costos del material, como el acero con que se fabrica la estructura y el plástico para cubrirla.

Otro gran inconveniente es que: el diseño de los invernaderos y la tecnología en general se desarrollan lentamente en México; la mayor parte de los modelos que existen son copiados de invernaderos importados, debido a la falta de crecimiento de las empresas nacionales. Esto ocasiona que este tipo de estructuras tengan problemas de manejo en el interior, ya que fueron diseñadas para condiciones diferentes a las que se requiere en México.

Uno de los obstáculos para la introducción de esta técnica de producción intensiva es el nivel de inversión requerida, un invernadero holandés cuesta aproximadamente 100 dólares el m² y un canadiense 50 dólares, esto incluye el invernadero y un control de riego y temperatura. Este tipo de inversiones se encuentran fuera del alcance de muchos de nuestros productores, por lo que el desarrollo de un invernadero a costos más favorables es deseable (Herrera, 2004).

Por otra parte, actualmente el agro mexicano se encuentra en crisis, esto debido al incipiente uso de tecnología que se tiene y a los altos costos de la tecnología extranjera disponible.

La tecnología de invernaderos disponible en México se desarrolló para áreas donde el clima es diferente al nuestro; los invernaderos holandeses por ejemplo están diseñados

para soportar cargas elevadas producto de nevadas, etc., esto lleva a pagar costos extras en la estructura del invernadero. También están diseñados para permitir al máximo la penetración de luz y evitar la pérdida de calor al interior del invernadero. En nuestro país los requerimientos están más dirigidos a evitar, en ocasiones, el exceso de luz y en mantener temperaturas más bajas dentro del invernadero que en el exterior. Es razonable que estas diferencias nos lleven a un diseño totalmente diferente de invernadero. En principio, una estructura para cargas más livianas permite una reducción en el precio del invernadero.

Por todo lo anterior el objeto de esta investigación se centra en el diseño de una estructura de invernadero para la región de Tenancingo, Estado de México que sea funcional, resistente, versátil y económica, tratando de reducir los costos para que pueda estar al alcance de los pequeños productores rurales, de tal forma que se pueda llevar a cabo el cultivo de chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.) de forma intensiva.

Sin perder de vista y considerando la problemática que en párrafos anteriores hemos expuesto, se plantea que los alcances de esta investigación correspondan con la fase de planear y proyectar, que es principalmente el propósito de este trabajo de diseño de un invernadero para zonas templadas.

Para realizar este trabajo se toman en cuenta los factores de radiación solar, temperatura, humedad relativa y CO₂ principalmente, los cuales son analizados para así obtener datos acerca del entorno ambiental de la zona y crear un diseño que resuelva las insuficiencias agroclimatológicas para llevar a cabo el cultivo de chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.). Una vez que se tenga lo anterior se procede a calcular las cargas del propio peso de la estructura, cubierta, viento y tutoreo principalmente.

II. OBJETIVOS

General:

Diseñar un invernadero en base a los requerimientos del cultivo de chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.), y en las condiciones geográficas, climáticas y técnicas que se presentan en el municipio de Tenancingo, Estado de México.

Particulares:

Determinar las condiciones agroclimáticas del municipio de Tenancingo, Estado de México, que intervienen en las características de forma, estructura y manejo del cultivo, para poder determinar el diseño óptimo del invernadero para la producción de chile manzano.

Definir los elementos complementarios de control ambiental dentro del invernadero para cubrir los requerimientos del cultivo de chile manzano, que permitan optimizar los recursos humanos y materiales para su producción, generando un invernadero de tipo semitecnificado.

Llevar a cabo los cálculos correspondientes para precisar el diseño de los elementos estructurales del invernadero, conforme al análisis de las variables climáticas y de manejo de cultivo.

III. MARCO DE REFERENCIA

3.1 Invernadero, ventajas y desventajas

Ya que los invernaderos son estructuras de apoyo a la producción agrícola, deben usarse como parte fundamental de un sistema productivo constituido por una serie de elementos, igualmente importantes para aumentar los rendimientos. Los invernaderos por sí solos no son una panacea ni la solución universal a los problemas que enfrenta la agricultura nacional (Pacheco, 2008).

Un invernadero es una instalación cubierta y abrigada artificialmente con materiales transparentes para defender las plantas de la acción de los meteoros exteriores. Esta instalación permite el control de determinados parámetros productivos, como: temperatura ambiental y del suelo, humedad relativa, concentración de CO₂ en el aire, luz, etc., en lo más cercano posible al óptimo para el desarrollo de los cultivos que se establezcan. El volumen interior del recinto permite el desarrollo de los cultivos en todo su ciclo vegetativo.

Estas instalaciones están formadas por una estructura o armazón ligero (metálico, madera, hormigón, etc.), sobre la que se asienta una cubierta de material transparente (polietileno, copolímero EVA, policarbonato, policloruro de vinilo, poliéster, cristal, etc.), con ventanas frontales, laterales, cenitales y puertas para el servicio del invernadero (Serrano, 2005).

Un invernadero es una construcción agrícola con estructura de madera o metal, usada para la protección de cultivos, mediante su aislamiento del exterior con una cubierta plástica translúcida o vidrio y mallas en las partes laterales (FAO-SAGARPA, 2007). Los invernaderos funcionan bajo dos principios fundamentales, la transformación de la energía luminosa en energía calorífica y la circulación del aire con el movimiento ascendente del aire caliente y descendente del aire frío.

Además del efecto invernadero que consiste en captar la energía radiante, se producen otros efectos como el sombreado, el efecto paraguas, cortavientos y efecto oasis, al

poderse mantener un ambiente más húmedo que en el exterior de zonas áridas. Las principales ventajas y desventajas de los invernaderos se mencionan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Ventajas y desventajas de los invernaderos

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Intensificación de la producción. - Posibilidad de cultivar todo el año. - Obtención de cosechas fuera de temporada. - Obtención de productos en regiones con condiciones restrictivas. - Incremento de los rendimientos por unidad de superficie. - Obtención de productos de buena calidad. - Menor riesgo de pérdida de cosechas. - Uso más eficiente del agua e insumos. - Mejor control de plagas y enfermedades. - Mayor comodidad y seguridad para el trabajo. - Condiciones idóneas para la experimentación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Inversión inicial alta. - Desconocimiento de las estructuras más apropiadas para cada región. - Alto nivel de especialización y necesidades de capacitación del personal. - Altos costos de producción. - Condiciones óptimas para el rápido ataque de plagas y enfermedades. - Alta dependencia de las condiciones del mercado.

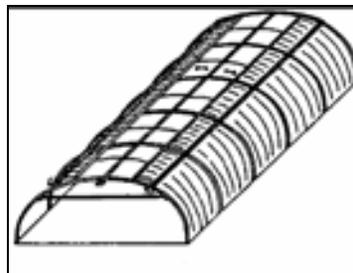
Fuente: Comunicación personal con profesores de Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo.

3.1.1. Tipos de invernaderos

Existen diversas clasificaciones de los tipos de invernaderos. Atendiendo a su forma arquitectónica cabe distinguir dos formas básicas:

- Invernadero unimodular: constituido por un invernadero (un solo módulo) aislado de otras estructuras.

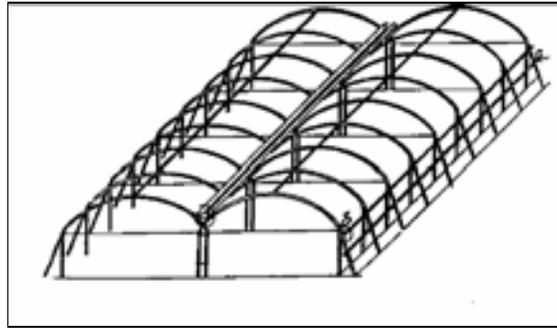
Figura 1. Unimodular



Fuente: FAO, 2002.

- Invernadero multimodular: lo forman una serie de invernaderos unidos, en disposición de módulos paralelos asociados.

Figura 2. Multimodular



Fuente: FAO, 2002.

Cubiertas de secciones planas

Son aptas para el uso de cubiertas rígidas (fibra de vidrio, policarbonato o vidrio), las cuales resisten el impacto del viento, del granizo y del agua sin deformarse, a excepción del cristal, que puede romperse al impacto de algún material sólido (Torres, 2007).

No es recomendable el uso de plástico en techos planos, debido a que la elasticidad del plástico provoca vibración por efecto del viento, que junto al calentamiento causado por la radiación solar, ocasiona pérdida de resistencia y rompimiento, disminuyendo la vida del material.

En caso de cubiertas rectas, la cubierta a dos aguas puede ser simétrica o asimétrica, con diversidad de angulaciones, según la latitud y condiciones locales.

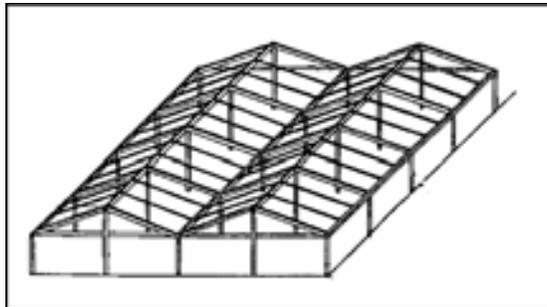
A dos aguas, simétrico (capilla): Los invernaderos de capilla simple tienen la techumbre formando uno o dos planos inclinados (figura 3), según sea a un agua o a dos aguas (Serrano, 2005). Este tipo de invernadero se utiliza bastante, destacando las siguientes ventajas:

- Es de fácil construcción y de fácil conservación.
- Es muy aceptable para la colocación de todo tipo de plástico en la cubierta.
- La ventilación vertical en paredes es muy fácil y se puede hacer de grandes superficies, con mecanización sencilla. También resulta fácil la instalación de ventanas cenitales.

- Tiene grandes facilidades para evacuar el agua de lluvia.
- Permite la unión de varias naves en batería.

El ancho que suele darse a estos invernaderos es de 12 a 16 m. La altura en cumbre es comprendida entre 3.25 y 4 metros. Si la inclinación de los planos de la techumbre es mayor a 25° no ofrecen inconvenientes en la evacuación del agua de lluvia. La ventilación es por ventanas frontales y laterales. Cuando se trata de estructuras formadas por varias naves unidas la ausencia de ventanas cenitales dificulta la ventilación.

Figura 3. Tipo Capilla



Fuente: FAO, 2002.

A dos aguas, asimétrico: Estos invernaderos siempre orientados en la exposición este-oeste, en la cubierta de la techumbre, presenta una mayor superficie de exposición solar y menos pendiente en la cara sur que en la norte (figura 4).

La inclinación o pendiente de la cara sur debe ser lo más aproximado para que la incidencia de los rayos solares sobre la cubierta, al medio día, se acerquen a la perpendicular en los meses de diciembre y enero. Los invernaderos asimétricos pueden ser de líneas rectas y curvas (Serrano, 2005).

Ventajas:

- Mayor captación de radiación en los meses de menor incidencia solar.
- Aumento de temperatura en el invernadero, consecuencia de lo anterior.
- Ventilación estática a sotavento de alta eficiencia para la adecuación y manejo del clima interior del invernadero.

- En las pendientes que se dan a la cubierta de techumbre tiene una buena escurrentía a la lluvia y nieve.

Figura 4. Tipo Asimétrico

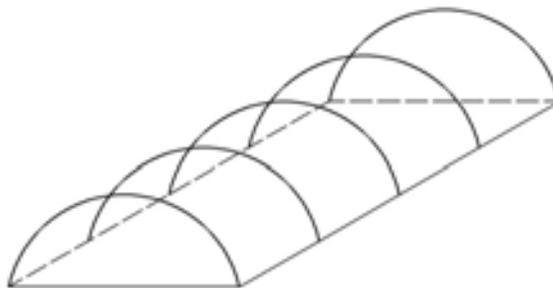


Cubiertas de sección curva

Adoptan forma de túnel: semicircular o semielíptica, de ojiva (arco gótico), entre otras. Los techos de líneas curvas presentan mejores opciones al diseñador, primero porque el uso de cubiertas plásticas se ha generalizado, y segundo porque los techos curvos permiten una buena tensión de la película plástica, además los elementos del medio ambiente como el viento, agua, nieve y granizo, son desplazados con facilidad.

Túnel (Forma semicircular): La forma semicircular no es, precisamente, la expresión de una semicircunferencia, más bien tiende a ser una forma elíptica; por lo tanto, presenta un radio mayor y un radio menor. Las longitudes y formas de los arcos pueden ser variadas para cada caso en que se quiera aplicar. Sin embargo, a partir de este tipo de arcos agrupados en forma longitudinal logramos una estructura de forma semicircular que, cubierta con algún tipo de película, determina alguna forma de domo o túnel (figura 5).

Figura 5. Tipo Túnel



Las formas de domo o túnel que delimitan un espacio, conforman ambientes muy cerrados, en los cuales se crean condiciones ambientales extremas en periodos de alta radiación solar o alta humedad relativa, pues presentan las siguientes características: alta captación de radiación solar, altas temperaturas por efecto invernadero, alta humedad relativa, escasa ventilación, alta evapotranspiración, respiración acelerada en las plantas y bajas concentraciones de CO₂ (Torres, 2007).

Túnel modificado: Se caracteriza por la forma de su cubierta y por su estructura totalmente metálica. El empleo de este tipo de invernadero se está extendiendo por su mayor capacidad para el control de los factores climáticos, su gran resistencia a fuertes vientos y su rapidez de instalación al ser estructuras prefabricadas.

Los soportes son de tubos de hierro galvanizado y tienen una separación interior de 5 x 8 o 3 x 5 m. La altura máxima de este tipo de invernaderos oscila entre 3.5 y 5 m. En las bandas laterales se adoptan alturas de 2.5 a 4 m. El ancho de estas naves está comprendido entre 6 y 9 m y permiten el adosamiento de varias naves en batería. La ventilación es mediante ventanas cenitales que se abren hacia el exterior del invernadero. (Serrano, 2005).

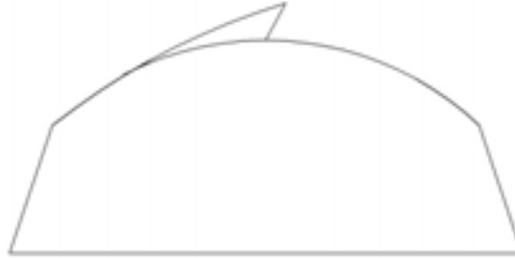
Ventajas:

- Estructuras con pocos obstáculos en su estructura.
- Buena ventilación.
- Buena estanqueidad a la lluvia y al aire.
- Permite la instalación de ventilación cenital a sotavento y facilita su accionamiento mecanizado.
- Buen reparto de la luminosidad en el interior del invernadero.
- Fácil instalación.

Tipo cenital: Esta forma de tejado incorpora líneas curvas de formas diferentes y líneas rectas creando una figura de forma semicircular fraccionada, lo cual ha permitido agregar una ventila en el ático que permite el paso de aire en forma natural (figura 6). El techo conforma una bóveda que al estar cubierta conforma un volumen considerable, el cual almacena aire caliente y humedad, por lo tanto es aconsejable que el volumen de

esta bóveda sea mínimo; esto se consigue disminuyendo la altura de su techo (Torres, 2007).

Figura 6. Tipo Cenital



Tipo sierra semicircular: Este tipo de techo utiliza una fracción semicircular, creando una figura abierta de forma mixta (figura 7). Se ha adaptado para zonas de climas calurosos. Sus desventajas es que son ligeramente caros aunado al mal desplazamiento del viento.

Ventajas:

- Buen desplazamiento de la precipitación
- Buena ventilación
- Buena humedad relativa
- Regular captación de luz
- No muy difícil de construir

Figura 7. Tipo Sierra



3.1.2. Materiales de Estructuras para invernaderos

La estructura de un invernadero es uno de los factores más importantes, ya que la resistencia que tenga ésta va a estar relacionada con la economía del proyecto de construcción. La estructura está conformada por el conjunto de elementos verticales, horizontales y curvos, que son los que le otorgan la forma y resistencia al invernadero y su función es soportar la carga y esfuerzos que ocasionan los materiales de cubierta, los aparatos de climatización o de riego, el viento, el granizo, etc.; las plantas y los frutos, cuando se realiza el tutorado, pueden producir cargas de hasta 14-16 kg/m. Los materiales más comunes que constituyen un invernadero son la madera y el fierro o acero.

Madera: Es barata y fácil de conseguir y trabajar, a la que se le puede dar un tratamiento de protección basado en keroseno, diesel o creosota en la parte que se entierra; las partes expuestas al aire libre puede protegerse con pinturas plásticas para exteriores. También se pueden utilizar otate, bambú y morillos, entre otros.

Acero: El acero se instala o reubica fácilmente en el menor tiempo; en algunos casos no requiere de sostén central, su duración es mayor y puede resistir más carga que la madera; por lo general, para evitar su corrosión, se debe pintar periódicamente aunque también se puede usar el tipo galvanizado. (Espinosa Robles y Espinosa Mendoza, 1996).

Acero

El acero es el material más empleado en la construcción de estructuras para invernaderos, por la diversidad de elementos y secciones que se localizan en el mercado, tales como: plancha, lámina, varilla corrugada, perfiles estructurales y tubería de conducción

La manufactura de materiales especiales para invernaderos ha sido una limitante para el desarrollo de esta industria, encontrando en México algunos materiales para la construcción que han tenido que irse adaptando para poder desarrollar tecnología nacional.

El acero ha sido uno de los materiales más utilizados en sus diferentes formas: ángulos, solera, perfil tubular negro y galvanizado, perfil cuadrado y rectangular negro, zintro o galvanizado. En los años setentas, el perfil tubular de tipo industrial o tubo mecánico de cédula treinta, fueron los más utilizados, sin embargo, la falta de un mejor

acabado (galvanizado) provocó que fuera sustituido en los noventa por perfil tubular cuadrado y rectangular galvanizado calibre 14 (figura 8).

Figura 8. Perfil tubular de acero galvanizado



Fuente: Torres, 2007.

La facilidad del manejo, mejor acabado (galvanizado) y disponibilidad, hicieron del perfil tubular cuadrado y rectangular, una materia prima de uso común entre los constructores. Sin embargo, el inconveniente más importante para su uso podría ser la superficie de contacto entre las películas plásticas y las caras del material cuadrado, ya que al sobrecalentarse, la vida de dicha película tiende a reducirse por el proceso de cristalización que se lleva a cabo en las áreas de contacto.

Quizá el material con más futuro, sean los perfiles tubulares galvanizados, dado que estos permiten una superficie de contacto menor y se están desarrollando aleaciones de zinc-aluminio que permiten una mayor reflexión de la luz y existe menor calentamiento (Torres, 2007).

Otros materiales de acero empleados en la construcción de invernaderos son:

- Placa de acero al carbón para base de postes y barrenanclas.
- Placa de acero rolada en frío galvanizada para la manufacturación de abrazaderas.
- Láminas galvanizadas en calibres 16, 18, 22 y 26 para manufacturas de canaletas.
- Lámina galvanizada calibre 22 para la manufacturación de perfiles para sujetar plásticos.
- Soleras para la elaboración de nodos para sujetar tensores.

- Varilla corrugada para la elaboración de anclas.

Soldadura

La soldadura ha llegado a constituir uno de los métodos más importantes para la unión permanente de piezas entre sí, ya que aparte de ahorro de modelos y utillaje que supone, proporciona la ventaja de un bajo costo de materiales en comparación con las uniones de fundición o forjado. En un diseño concebido la pieza soldada puede ser hasta 50% más ligera que recurriendo a otros métodos de unión, sin disminuir su rigidez ni consistencia. Las uniones por soldadura se clasifican a tope, a solape o cubrejointa, en “T” y en ángulo.

El tipo de soldadura más usado actualmente para los perfiles de ventanería y puertas es la soldadura eléctrica 6013 de espesor de 1/8” y/o de 3/32”. Esta soldadura puede ser marca “Champion” o “Infra”, y requiere para su fundición, una corriente de 80-110 amperes, dependiendo del soldador, así como del calibre del perfil a soldar (Torres, 2007).

3.1.3. Materiales de Cubiertas

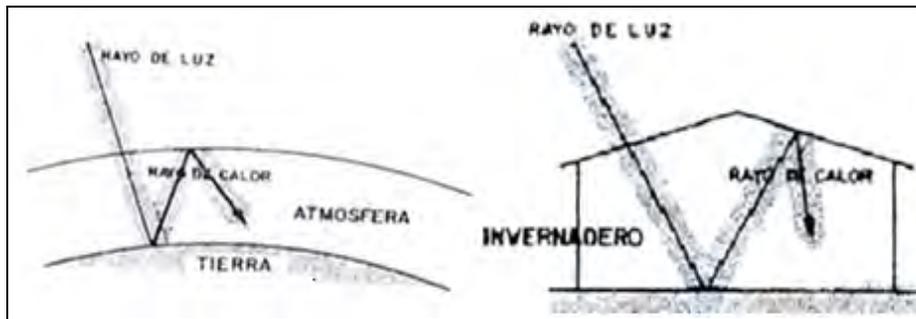
La cubierta de un invernadero permitirá conservar el clima en su interior para el buen crecimiento y desarrollo de los cultivos.

El material de recubrimiento de un invernadero estará determinado en función del proyecto y deberá programarse de acuerdo a la economía o inversión posible y estar en relación directa con el tipo de estructura que se usará, tanto en lo que se refiere a diseño, como al material propuesto.

El material a utilizar deberá garantizar que proporcione el llamado "efecto de invernadero" (figura 9), retención de calor, rendimiento térmico, transparencia a la radiación solar, capacidad de retención a las radiaciones de onda larga emitidas por el suelo durante la noche y bajo costo (Espinosa Robles y Espinosa Mendoza, 1996).

Hoy día, la gran mayoría de los invernaderos tienen cubierta de película de polietileno. Las películas hechas a partir de otras resinas, como el cloruro de polivinilo, el poliéster, etc., son raras excepciones.

Figura 9. Efecto invernadero



Fuente: Fuentes, 1996.

Los materiales rígidos, como el vidrio o los plásticos en doble pared o en plancha celular, que está formada por dos láminas paralelas unidas a intervalos regulares por otras pequeñas láminas perpendiculares a las mismas, tienen mucho interés en algunos países, pero son demasiado caros puesto que su vida no excede los 7 o 10 años y, además, necesitan estructuras muy fuertes y sistemas de sujeción muy sofisticados. Sin embargo, en pequeña escala, van introduciéndose en la horticultura, debido a sus mejores aptitudes para el control climático (Linares, 2004).

Cubiertas Plásticas (películas de polietileno)

Como se ha dicho anteriormente, el material básico para la mayoría de las películas de plástico utilizadas como material de cubiertas de invernaderos y abrigos es el polietileno. Mediante el uso de aditivos añadidos a la resina básica de polietileno se puede aumentar la duración del filme, modificar su transparencia a la radiación visible a la infrarroja corta, a la radiación solar y cambiar sus cualidades de absorción y reflexión del infrarrojo largo. Por consiguiente, es de interés para el horticultor conocer la naturaleza de los aditivos que se utilizan durante la extrusión de la lámina, aditivos que son diferentes en cada proceso de fabricación.

Polietileno de baja densidad: Las películas de polietileno lineal tienen mejor resistencia mecánica, pero son más elásticas (elongación reversible) y por consiguiente, la producción de películas de gran anchura es difícil. De aquí la dificultad de utilizar tal película como cubierta de polietileno en su estado puro. Sin embargo, se puede usar una mezcla que contenga del 20% al 30% de polietileno lineal. Para el caso de túneles

pequeños el polietileno lineal de 80-120 micras produce mejor resultado, debido a su resistencia mecánica que es muy superior a la del polietileno radicular de 120-150 micras de espesor. La duración de tales películas puede ser muy larga, cabe esperar que sean de 4 años, mientras que algunas no exceden de 3 años (FAO, 2002).

Polietilenos con acetato de vinilo (E.V.A.): La resina básica de polietileno es enriquecida con acetato de vinilo (AV), cuya propiedad es aumentar la absorción del infrarrojo largo sin reducir su transparencia al ultravioleta, a la radiación visible y al infrarrojo corto solar. Como contrapartida, esta transparencia inicial superior a la radiación solar que tiene el E.V.A., va desapareciendo poco a poco debido a que retiene el polvo con mayor facilidad que las otras películas de polietileno, especialmente en climas con bajas condiciones de lluvia.

Polietileno infrarrojo (IRPE o PE modificado): En este caso, la resina básica PE es enriquecida con metales pesados, por lo que el efecto térmico de la película es obvio, pero el uso extensivo de tales cargas térmicas tiene sus inconvenientes: las mezclas de estos metales aceleran el acortamiento de la vida de la lámina.

Polietilenos térmicos (EVA con aditivos): Si se toman separadamente las cargas de AV o de IR, ninguna de ellas ofrece una solución satisfactoria al problema de creación de película de larga vida de polietileno que absorba totalmente el IR largo. Esto ha llevado a la creación de una nueva generación de películas de PE, que de acuerdo con sus inventores debe tener las ventajas combinadas de los EVA y los IRPE y evitar sus inconvenientes (Linares, 2004).

Puntualizaciones: Los polietilenos con cargas presentan a menudo unas propiedades mecánicas inferiores a las del LDPE normal. Su uso como materiales de invernadero pueden representar algunas dificultades: su duración puede quedar reducida, una vez tensados sobre la estructura del invernadero. Por consiguiente, si se consideran dos láminas, una de polietileno normal y otra de polietileno cargado, formando una capa doble aislante, la mejor manera de instalarla es que el polietileno térmico quede dentro de la cara interior. De esta manera el material más frágil queda protegido.

Hoy día, las películas multicapas parecen tener un gran futuro. Se obtienen por coextrusión y combinan todas las cualidades requeridas, por ejemplo: la resistencia mecánica, la resistencia a la elongación, la duración, la antiadherencia del polvo del polietileno ordinario, el efecto térmico y la transmisión de la luz del EVA (FAO, 2002).

Cubiertas rígidas

Hasta ahora se han usado muy poco los materiales rígidos como cubiertas de invernaderos. Estos se fabrican en forma de plancha celular o paredes dobles y en paredes simples. Indudablemente las planchas celulares causan cierta reducción de la transmisión de luz, pero la absorción del infrarrojo largo es generalmente muy buena, como en el caso de los policarbonatos o incluso completa como en el caso del vidrio, poliéster y polimetacrilatos (Linares, 2004).

Vidrio: Todo el mundo conoce el vidrio de ventana y el vidrio difusor, también llamado catedral. Ambos productos se derivan del mismo material básico, pero difieren en aspecto. El primero es el denominado vidrio hortícola VH. Durante los últimos años se ha estudiado en profundidad el comportamiento de los dos materiales, como cubierta de invernadero, existiendo diversidad de opiniones sobre los dos tipos de vidrio que absorben completamente la radiación infrarroja y tienen buena transmitancia a la radiación solar, ambos producen sin duda el denominado efecto invernadero (FAO, 2002).

También se comercializan otras clases de vidrio. El vidrio denominado de baja emisividad (VH+) parece que responde bien en el clima mediterráneo con cielos claros y vientos moderados. Aceptando el costo mínimo adicional que supone el tratamiento de la superficie de este vidrio, sus propiedades aislantes son muy parecidas a las del vidrio doble, con la ventaja clara de que es mucho más económico y más ligero (Linares, 2004).

3.2. Antecedentes sobre diseño de invernaderos en zonas templadas de México

El tratar de resolver la problemática que existe sobre el diseño y construcción de invernaderos en México ha tomado gran importancia a partir de hace más diez años. Las principales razones por las que se le ha puesto interés, son los altos costos que implica

la instalación de un invernadero con tecnología extranjera, además que su diseño no responde a las necesidades climatológicas del país e incluso de los cultivos.

En México existen siete mil hectáreas de invernaderos, de las cuales 500 son de flores y el resto (6,500) de hortalizas; además de cinco mil hectáreas de túneles (Licona, 2007). Estos datos resaltan la importancia que tiene la industria del diseño, fabricación y construcción de invernaderos que va en crecimiento.

En México se hallan diversas empresas que ofrecen una variedad de estructuras y materiales, las cuales no siempre responden a las necesidades del productor agrícola.

Debido a la gran cantidad de diseños de invernaderos que han instalado diferentes compañías se ha ocasionado confusión en el diseño, el cual debe ser conforme a las características de cada región. La Asociación Mexicana de Constructores de Invernaderos, A.C. (AMCI) solicitó a la Universidad Autónoma Chapingo realizar un estudio que definiera las necesidades según el clima para cada región (Perea, 2007).

El resultado de este trabajo fue la definición de cuatro tipos de invernaderos para diferentes regiones del país. La Asociación Mexicana de Constructores de Invernaderos señala que el objetivo es recomendarlos para México de acuerdo con una investigación sobre los criterios agronómicos para el diseño y construcción de los invernaderos mexicanos.

Desde el punto de vista agronómico los aspectos que debe considerar un productor en el diseño de un invernadero, con un clima adecuado para el desarrollo del cultivo y con rentabilidad económica, son los siguientes: material y características de la cubierta, dimensiones (largo, ancho, alto), inclinación y forma de los techos, orientación, área de ventanas y su localización, distribución de las plantas y los pasillos (funcionalidad), definición de las cargas (vientos, tutoreo, etc.) y su diseño, definición y diseño de equipo para el control ambiental.

El diseño agronómico de los invernaderos está basado en un proceso de toma de decisiones con diferentes criterios, entre ellos definir qué cultivos se van a establecer, qué sistema se empleará y la calendarización de los ciclos de cultivo.

Otros aspectos que deberán tomarse en cuenta son las temperaturas mínimas, medias, máximas, extremas y mensuales en la localidad; frecuencia, duración e intensidad de

heladas por mes; dirección, frecuencia e intensidad del viento mensual; humedad relativa mínima, media y máxima por mes; radiación o luminosidad diaria (promedio mensual); días soleados, medio nublados y nublados por mes; precipitación mensual en la localidad; días con neblina, con granizo, con vientos de 50 km/h al año en la localidad; así como latitud y altura sobre el nivel del mar de la localidad. Es preciso recalcar que el diseño agronómico de invernaderos es entonces específico para cada caso y para cada localidad, pero se pueden hacer aproximaciones preliminares de diseño para un cierto cultivo en localidades representativas de climas específicos. Del estudio en cuestión se derivaron propuestas de diseño agronómico de invernadero para producir jitomate en sistema de producción anual, con plantas manejadas durante ciclos largos en cuatro tipos de climas diferentes y dos niveles tecnológicos, uno que podría llamarse de tecnología apropiada, el cual pone énfasis en el diseño, y otro denominado de alta tecnología, cuyas bases se encuentran más enfocadas al equipamiento.

Un nivel de tecnología apropiada para el diseño agronómico de invernaderos de producción de jitomate en forma exitosa en zonas templadas, valles altos, bajío, debe contar con lo siguiente:

- Polietileno térmico de alta dispersión de luz.
- Malla antiáfidos en ventanas con cortinas que se cierren lo más herméticamente posible.
- Anchos no mayores de 30 m con más de 25% de área de ventanas con relación a superficie cubierta (para garantizar las 30-90 renovaciones de aire/h).
- En general, con ventanas orientadas perpendicularmente a vientos dominantes o con ventanas frontales además de las laterales. Eventualmente, también se consideran ventanas cenitales en invernaderos de más de 20 m de ancho.
- Uso de encalados en primavera.
- Inclinaciones pronunciadas en techos (más de 20°) para que el agua de condensación escurra y no caiga sobre las plantas.
- Materiales con resistencia suficiente a vientos máximos en la región y a la carga por tuteo (de 20-25 kg/m²).

- Altura, al menos dos metros mayor que la máxima alcanzada por cultivo para el cual se diseña.
- Doble puerta de acceso con tapete sanitario.
- Eventualmente se pueden usar barreras rompevientos y rompevientos al norte del invernadero para contrarrestar vientos fríos.
- Doble cortina con espacio de aire entre ellas en el lado norte del invernadero.
- No producir cultivos sensibles al frío en las épocas de heladas (para la producción en noviembre o diciembre) o poner calefactores de combustión directa.
- Sistemas sencillos de riego en suelo o sustratos hidropónicos a base de cintilla o goteros integrados con preparación de solución en cisterna y automatización simple.

Las características climáticas generales de zonas templadas son:

- Bajas temperaturas nocturnas (sub-óptimas) de octubre a febrero.
- Heladas predominantemente radiactivas (algunas convectivas) con viento del norte.
- Primaveras calientes y secas, eventualmente con mucha insolación (propensión a desórdenes fisiológicos, ácaros y otras plagas).
- Vientos fuertes (hasta 80 km/h) en febrero, marzo y octubre.
- Condensación de agua en plástico y las hojas en los meses de otoño (propensión a enfermedades fungosas y bacterianas).
- Nublados variables de junio a octubre (Perea, 2007).

De forma general y de acuerdo con las características climáticas de las zonas templadas citadas anteriormente, se asume que las condiciones deseables para un invernadero en esta región son:

- Hermeticidad para evitar pérdidas de calor en noches frescas o frías.
- Calefacción suficiente si se piensa producir en invierno.
- Bien ventilados y con poca estratificación de temperatura, de 30-90 renovaciones de aire/h.

- Con posibilidad de reducir altas insolaciones pero sin sombras excesivas.
- Que no precipite agua que condensa en el techo para evitar enfermedades.
- Que actúen como verdadera barrera física para plagas.
- Que tengan una altura adecuada a la especie y sistema de cultivo.
- Resistentes a vientos fuertes y a la carga de tutoreo.
- Usar eventualmente barrera rompevientos y rompevientos al norte del invernadero para contrarrestar vientos fríos, o al menos, doble cortina con espacio de aire entre ellas en el lado norte del invernadero.
- Calefacción automática directa o liberación de gases de combustión al exterior apoyada eventualmente por pantallas térmicas, manejada con termostatos y/o sensores de humedad relativa.
- Sistemas con sustratos hidropónicos y soluciones nutritivas proporcionadas con inyectores automatizados y sectorización del riego con válvulas.

Con todo esto no debemos perder de vista que el diseño de un invernadero consiste en concebir nuevas ideas a partir de diferentes necesidades de los productores, teniendo como requisito aprovechar los materiales nacionales que existen en el mercado, los cuales le darán una característica única.

En México sólo existen 15 empresas dedicadas a la venta de invernaderos, según los datos de la AMCI.

Las empresas nacionales han estado estancadas durante varios años en el tema del diseño porque se dedican más a vender invernaderos y no se preocupan por diseñarlos, (Torres, 2007).

Los grandes productores tienden a importar toda la tecnología en invernaderos, mientras que los proyectos de productores pequeños, apoyados por instituciones como la Secretaría de Agricultura, Ganadería Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), utilizan la tecnología nacional (Antonio, 2006).

Gilberto Gómez Priego, presidente de la AMCI reconoce que la importación de tecnología y de invernaderos (que antaño representó 80%) procedente principalmente de

Europa: España, Israel, Francia, así como de Estados Unidos y Canadá, ha contribuido al desarrollo de los invernaderos en México (Licona, 2007).

Los invernaderos importados de España, Francia, Holanda, Estados Unidos o Israel están diseñados con materiales del país de origen, tecnologías de herrajes y condiciones totalmente diferentes a los nuestros. Las empresas extranjeras que se dedican a la venta de invernaderos se encargan de diseñar sus propias estructuras, modelos y técnicas para la instalación de invernaderos (Antonio, 2006). El utilizar esta tecnología en México resulta muy costoso, accesible sólo a grandes productores y asociaciones de diversos pequeños productores que se organizan para adquirirla y, como se ha señalado, el diseño que nos presentan no es adecuado al país.

Gómez Priego indica que en la agricultura protegida hay costos desde 30 hasta mil pesos el m², dependiendo del grado de tecnología que tenga el invernadero, o sea que el costo tiene que ver con la tecnología que se utilice (Licona, 2007).

Los costos de los invernaderos varían dependiendo del nivel tecnológico; un invernadero nacional cuesta alrededor de 370 pesos el metro cuadrado; incluye la construcción, el sistema de riego y la calefacción. Pero el precio puede variar según la empresa fabricante (Antonio, 2006).

En el diseño de estos invernaderos, se considera el uso de perfiles estructurales de acero y lámina con recubrimientos de zinc, lo que garantiza durabilidad a la estructura. Asimismo, se utilizan secciones tubulares cuadradas, troqueladas y estrechadas; tornillería y accesorios que facilitan el montaje de la estructura, reduciendo al máximo los costos. El análisis estructural considera las siguientes normas nacionales (Pacheco, 2008):

- IMCA Instituto Mexicano para la Construcción en Acero, el cual está basado en las normas del AISC (American Institute for Steel Construction).
- Manual de diseño de obras civiles de la CFE (Sección C-14), la cual define las condiciones de viento y sismo por considerar de acuerdo con la ubicación de la estructura dentro de la República Mexicana.

Ambos documentos (IMCA y CFE), complementados con las normas National Institute of Agricultural Engineering (del Reino Unido) y las normas UNE 76-208-92,

nos permiten lograr diseños y un nivel de análisis comparable al existente en países con mayor tecnología. Las herramientas de análisis utilizadas por el área de ingeniería son: STAAD III y SAP 2000, las cuales garantizan la eficiencia y seguridad estructural requerida. Cabe señalar que en el análisis para el diseño del invernadero debe tomarse en cuenta:

- Peso propio de la estructura.
- Viento de diseño de 120 km/h, el cual puede ser modificado de acuerdo con requerimientos específicos de la región.
- Peso del cultivo ($18-25 \text{ kg/m}^2$, o variable dependiendo del tipo de cultivo).
- Peso producido por granizo.
- Cargas durante el montaje de la estructura.
- Sismo (esto cuando se ubique en zona sísmica y contemple cultivo sobre tutoreo).

Como una alternativa para poder acceder a esta tecnología que permite reducir las mermas en la producción, los agricultores tienen la oportunidad de buscar apoyos institucionales mediante el programa Alianza de la SAGARPA, que aporta desde 30% hasta 70% de las necesidades de capital para la instalación de un invernadero o de una determinada tecnología. De manera particular los agricultores son beneficiados con el 50%, mientras que a las mujeres que realizan alguna actividad agrícola se les apoya hasta con el 70% (Antonio, 2006). La parte restante la pagan los propios productores de manera directa o mediante una entidad financiera.

3.3. Diseño

Diseñar es el proceso de creación y desarrollo para producir un objeto, proceso, servicio, conocimiento o entorno para uso humano. Requiere de consideraciones funcionales y estéticas, necesita de numerosas fases de investigación, análisis, modelado, ajustes y adaptaciones previas a la producción definitiva del objeto a diseñar.

Diseñar es la integración de requisitos técnicos, sociales y económicos, todo ello pensado e interrelacionado con el medio ambiente que envuelve al humano.

El diseño es el plan final resultado del proceso de diseñar como puede ser un dibujo, un plano, una maqueta, una descripción técnica o un proyecto.

El proceso de diseñar implica las siguientes fases:

Observar y analizar el medio en el cual se desenvuelve el ser humano, descubriendo alguna necesidad.

Planear y proyectar proponiendo un modo de solucionar esta necesidad, por medio de planos y proyectos adecuados, tratando de descubrir la posibilidad y viabilidad de la solución

Construir y ejecutar llevando a la vida real la idea inicial, por medio de materiales y procesos productivos.

Estas tres fases se hacen una tras otra, y a veces continuamente.

Evaluar para saber cuando el diseño está finalizado.

El diseño de invernaderos es una actividad donde el proyectista interrelaciona tres conceptos: clima, planta y construcción, en donde el clima funciona como un factor determinante, la planta como un elemento determinado y la construcción como un factor coadyuvante.

En el proceso de diseño el proyectista llevará a cabo un análisis particular del concepto determinante y determinado, para de esta manera generar una solución que regule los elementos del factor determinante de tal manera que permita la expresión del concepto determinado, en este caso la delimitación de un espacio por medio de una estructura metálica y una cubierta aislante del ambiente que permita tener condiciones ambientales adecuadas al cultivo de plantas (Torres, 2007).

Dentro del diseño funcional se realiza un estudio agroclimatológico de una serie de fenómenos climáticos que ocurren en el ambiente y a partir de los cuales surge la idea inicial del diseño por desarrollar.

Se debe detectar y detallar, con la ayuda de datos climatológicos, un entorno de desajuste entre el conjunto de elementos climáticos del sitio y los requerimientos determinados del cultivo que sea posible remediar con la intervención del diseño.

Como consecuencia de lo anterior en el diseño estructural, se realizan estudios y propuestas de diversas opciones de solución al entorno de desajuste detectado, eligiendo aquella que responda de mejor manera a las necesidades del cultivo; en esta parte en especial se diseña la estructura adecuada a las condiciones de la región.

Se prosigue en el desarrollo de la alternativa elegida para el sitio con el fin de que pueda ser realizada físicamente, entonces se elaboran los planos con las descripciones y ajustes al concepto de diseño seleccionado.

3.3.1. Diseño funcional del invernadero

En esta parte de la metodología se definen los factores: geográficos, climáticos y técnicos que se deben considerar en el diseño del ambiente de un invernadero y se describe la ubicación geográfica, las condiciones ambientales y las consideraciones técnicas del sitio en donde se planea diseñar el invernadero.

3.3.1.1. Factores geográficos

- Latitud

Este factor es fundamental al tomar decisiones para el diseño de invernaderos debido a que en cada latitud las condiciones climatológicas son específicas como: precipitación, radiación solar, humedad relativa y comportamiento del viento (figura 10).

- Altitud

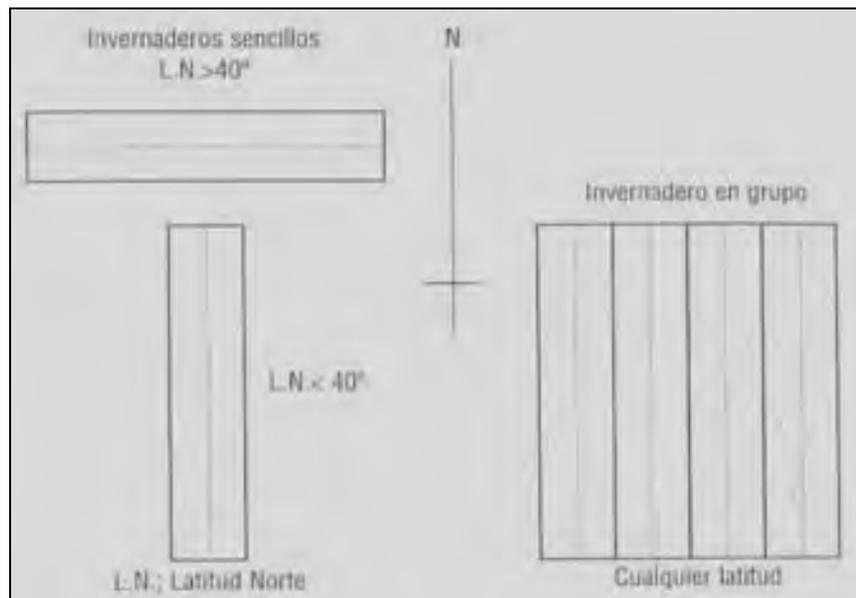
La altura sobre el nivel del mar está muy relacionada con la temperatura, pues tenemos que a nivel del mar hay una temperatura determinada en una época del año y esta tiende a ir disminuyendo conforme ascendemos hacia altitudes superiores, encontrando de esta manera diferentes climas según la altitud, debido a esto tendremos diferencias principalmente en la radiación solar, intensidad luminosidad, velocidad del viento y humedad relativa.

- Topografía

El relieve del terreno es un factor muy importante para el diseño de los módulos de una construcción, en regiones de topografía muy accidentada será difícil establecer un

módulo de dimensiones grandes, por esto deberán diseñarse acorde a las necesidades de espacio, orientación, ventilación, drenaje y operación. En relación con la pendiente, se recomienda buscar el terreno lo más plano posible y no necesariamente el diseño tiene que ser cuadrado ya que puede adecuarse. Además un suelo que no tenga solucionado su drenaje, tendrá resultados negativos cuando se instale en él un invernadero. Lo más adecuado es que el terreno esté libre de árboles para evitar el sombreado del invernadero y en consecuencia de las plantas (Torres, 2007).

Figura 10. Orientación en base a mayor aprovechamiento de radiación solar



Fuente: CENAMAR ,1981.

3.3.1.2. Factores climáticos

Para establecer un cultivo cualquiera es necesario tomar en cuenta el clima (ya sea templado, tropical, árido, etc.), pues es muy importante ya que se construirá el invernadero para mejorar las condiciones que existen en la región para el adecuado desarrollo del cultivo.

- Radiación solar

Es la cantidad de energía proveniente del sol, que en forma de ondas electromagnéticas llega a la tierra, juega un papel muy importante para todas las formas

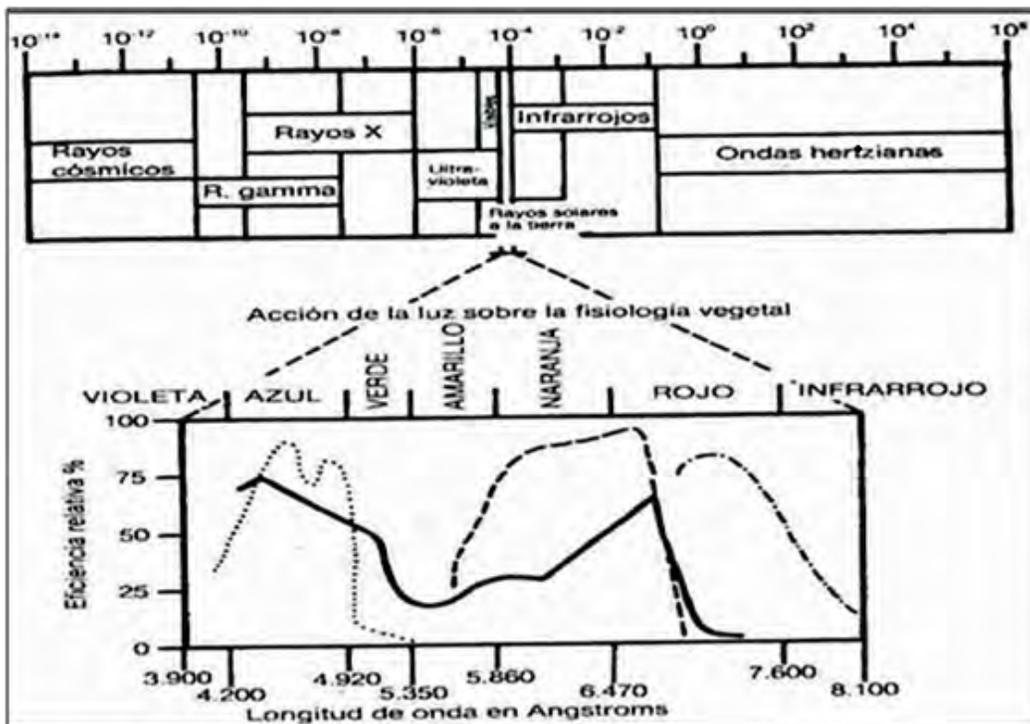
de vida terrestre. Gracias a esta energía se llevan a cabo los procesos tan importantes como la evaporación del agua de los mares, lagos y ríos, y en consecuencia la condensación de las nubes, lo que produce precipitación; además de los movimientos de grandes masas de aire (vientos). También de esta energía dependen la fotosíntesis y el fotoperiodo en las plantas (Mercado, 1993).

Calidad de la luz

Es una característica de la radiación electromagnética y se refiere a su composición respecto a la longitud de onda de que se compone.

La luz es la parte de la radiación que percibe el ojo humano, de origen natural o artificial, es de naturaleza electromagnética. En el espectro global de esta radiación (figura 11), la parte visible abarca solamente una faja angosta, comprendida entre las longitudes de onda de aproximadamente 400 a 760 nm (4000 a 7600 angstrom).

Figura 11. Esquema del espectro electromagnético y radiación visible



Fuente: Serrano, 2005.

Lo anterior también se define como Radiación Fotosintéticamente Activa que es la cantidad de radiación integrada por el rango de longitudes de onda que son capaces de producir actividad fotosintética en las plantas y otros organismos fotosintéticos como micro algas y bacterias. Este rango es el comprendido aproximadamente entre los 400 y los 700 nanómetros y se corresponde, también aproximadamente, con el espectro visible. Las unidades de medida de la Radiación Fotosintéticamente Activa son los microeinsteins/m²/s o micromoles de fotones/m²/s.

Esta faja está limitada por la región ultravioleta, de ondas más corta, y por la región infrarroja de ondas más largas.

Efectos de la radiación solar o electromagnética:

- Químicos: los rayos no son visibles y su longitud es menor de 400 nm.
- Térmicos: rayos no visibles y su longitud de onda es superior a los 760 nm.
- Luminosos: son rayos visibles al ojo humano, su longitud de onda va de 440 a 760 nm (Torres, 2007).

El hecho de considerar a la calidad de luz como un factor importante en el diseño de un invernadero radica en la relación planta-luz, en el proceso de selección de la cubierta para un techo, podemos permitir el paso de las bandas electromagnéticas que más se ajuste a las necesidades de la planta a cultivar (tabla 1).

Cantidad de radiación

Es la cantidad diaria de calor recibida por cm² en suelo horizontal, la cual varía según la época del año, esto es debido a que los rayos solares llegan a la superficie terrestre con distinta inclinación, según la época del año, también la duración del día es diferente según las épocas del año y además los días son más largos cuando los rayos solares son más perpendiculares. Estos tres fenómenos se presentan debido a que el eje de rotación de la tierra forma un ángulo de 23°27' con la perpendicular. La máxima cantidad de radiación solar en nuestro país se ha registrado en el mes de junio, alcanzando hasta 725 calorías/cm²/día en los estados de Chihuahua y Sonora. La mínima se tiene en el mes de enero, cuando sólo sobrepasan las 300 calorías/cm²/día (Torres, 2007).

Tabla 1. Calidad y efecto de la radiación solar sobre las plantas

Banda	Longitud de onda λ		Frecuencia (v) ondas x segundo	Sensibilidad espectral del ojo humano (%)	Efectos sobre las plantas
	(cm)	(Å)			
UV-A	2.8×10^{-5}	2800	1.1×10^{-15}	Invisible	Deterioro
UV-B	3.2×10^{-5}	3200	9.4×10^{-14}	Invisible	Deterioro
Violeta	3.7×10^{-5}	3700	8.1×10^{-14}		Deterioro
	4.4×10^{-5}	4400	6.8×10^{-14}	1	Fototropismos
Azul	4.4×10^{-5}	4400	6.8×10^{-14}	1	Cambios de viscosidad protoplasmática
	5.0×10^{-5}	5000	6.0×10^{-14}	21	Asimilación de CO ²
Verde	5.0×10^{-5}	5000	6.0×10^{-14}	21	Asimilación de CO ²
	5.5×10^{-5}	5500	5.5×10^{-14}	67	Asimilación de CO ²
Amarilla	5.5×10^{-5}	5500	5.5×10^{-14}	67	Asimilación de CO ²
	5.7×10^{-5}	5700	5.3×10^{-14}	98	Incremento en vigor, tamaño y calidad de los frutos
	5.9×10^{-5}	5900	5.1×10^{-14}	81	
Anaranjada	6.0×10^{-5}	6000	5.0×10^{-14}	57	Asimilación de CO ²
	6.3×10^{-5}	6300	4.8×10^{-14}	44	Germinación de semillas y crecimiento de plantas y brotes
Roja	6.3×10^{-5}	6300	4.8×10^{-14}	44	Germinación de semillas
	7.6×10^{-5}	7600	3.9×10^{-14}	8	Asimilación de CO ²
IR-A	1.4×10^{-4}	14000	2.1×10^{-14}	Invisible	Temperatura
IR-B	3.0×10^{-4}	30000	1.0×10^{-14}	Invisible	Temperatura

Fuente: Torres, 2001.

Cantidad de radiación solar que se recibe en cada una de las regiones del país:

- Región con 500 calorías/cm²/día: Los estados de Sonora, Chihuahua, Baja California Norte y Baja California Sur.
- Región con 450 calorías/cm²/día: Los estados de Sonora, Chihuahua, Durango, Zacatecas, Jalisco, Nayarit, Guanajuato, Querétaro, Sinaloa, Baja California Sur, Morelos, Puebla, Guerrero, Estado de México, Oaxaca y Aguascalientes.
- Región con 400 calorías/cm²/día: Parte de los estados de Coahuila, Zacatecas, San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Estado de México, Morelos, Tlaxcala, Puebla, Oaxaca, Chiapas, Guerrero, Michoacán, Colima, Jalisco, Nayarit, Sinaloa, Durango, Chihuahua, Tamaulipas, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo.

- Región con 350 calorías/cm²/día: Parte de los estados de Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Zacatecas, Querétaro, Hidalgo, Puebla, Veracruz, Tabasco, Oaxaca, Chiapas, Campeche, Yucatán y Quintana Roo.

Intensidad luminosa

Es la cantidad de luz recibida en una región determinada y ésta puede ser medida en lumen, luxes o en pie-candela (fc). Se considera que un fc es igual a 10.72 lux y que un cielo despejado en una hora de alta radiación tiene la cantidad máxima de 10,000 fc o 107,200 luxes. Sin embargo, los diferentes medios ecológicos, según sus condiciones climáticas, han permitido la determinación de plantas que requieren de altas, medianas y bajos requerimientos de intensidad luminosa, requerimientos que deben ser considerados para su cultivo comercial, la intensidad luminosa es diferente en cada región del país, y se ve influenciada principalmente por la ubicación geográfica y la orografía de la región. Así tenemos regiones de altas intensidades en la parte norte del país, regiones de bajas intensidades en las cordilleras orientales, occidentales y sur del país, siendo la nubosidad uno de los factores que interfieren en mayor medida en la infiltración de los rayos solares. La cantidad de luz que ingresa a una construcción también se ve determinada por la forma de los techos. Existen diferentes formas de controlar la intensidad en las instalaciones dedicadas a la producción como a los encalados, pintados, enmallados de 80%, 70%, 60%, 50% y 35%, dobles cubiertas, cubiertas traslúcidas o sombreadores de materiales naturales como ocofetate, y materiales reflejantes como las mallas a base de cintas muy finas de aluminio que reflejan la radiación (Torres, 2007).

La cantidad de luz que entra al invernadero está determinada por la duración del día, la nubosidad y la forma del invernadero. La posición y orientación también influyen pues se deben evitar los sitios que tienen sombra. Hay que tomar en cuenta que a mayor latitud existe menor cantidad de horas luz en el año y que los rayos de ésta llegan con mayor inclinación (tabla 2).

En términos generales existe mayor radiación luminosa en los estados del sur que en los del norte. Además todos los materiales plásticos usados como cubierta reflejan una fracción de la luz de entre el 20% y el 30%.

Los techos de forma cilíndrica o parabólica y semielíptica captan mejor la luz que los de tipo capilla y mientras más alta sea la estructura mejor es la captación de luz (figura 12). Además para tener una mayor luminosidad conviene hacer estructuras con postes delgados y con el menor número posible de ellos, para que no proyecten sombra (FAO-SAGARPA, 2007).

Tabla 2. Horas luz promedio por mes para México

LAT.	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
NORTE												
15°	11.21	11.53	11.91	12.35	12.71	12.89	12.80	12.49	12.07	11.64	11.28	11.11
16°	11.15	11.19	11.91	12.38	12.76	12.95	12.86	12.53	12.07	11.62	11.23	11.05
17°	11.09	11.46	11.90	12.40	12.81	13.01	12.92	12.56	12.08	11.59	11.18	10.99
18°	11.04	11.43	11.89	12.43	12.86	13.07	12.97	12.60	12.08	11.57	11.13	10.92
19°	10.98	11.39	11.88	12.45	12.91	13.14	13.03	12.63	12.09	11.54	11.07	10.86
20°	10.92	11.36	11.88	12.48	12.96	13.21	13.09	12.67	12.09	11.51	11.02	10.79
21°	10.86	11.32	11.87	12.51	13.01	13.27	13.15	12.70	12.09	11.49	10.97	10.73
22°	10.80	11.29	11.86	12.53	13.07	13.34	13.21	12.74	12.10	11.46	10.91	10.66
23°	10.74	11.25	11.86	12.56	13.12	13.41	13.27	12.78	12.11	11.43	10.86	10.59
24°	10.68	11.21	11.85	12.59	13.18	13.48	13.34	12.82	12.11	11.41	10.80	10.52
25°	10.62	11.17	11.84	12.61	13.23	13.55	13.40	12.86	12.12	11.38	10.74	10.45
26°	10.55	11.14	11.84	12.64	13.29	13.62	13.47	12.90	12.12	11.35	10.69	10.38
27°	10.49	11.10	11.83	12.67	13.35	13.69	13.53	12.94	12.13	11.32	10.63	10.31
28°	10.42	11.06	11.82	12.70	13.41	13.77	13.60	12.98	12.13	11.29	10.57	10.23
29°	10.35	11.02	11.81	12.73	13.47	13.85	13.67	13.02	12.14	11.26	10.50	10.15
30°	10.28	10.98	11.81	12.76	13.53	13.92	13.74	13.06	12.14	11.23	10.44	10.07
31°	10.21	10.93	11.80	12.79	13.59	14.00	13.81	13.11	12.15	11.20	10.38	09.99
32°	10.14	10.89	11.79	12.82	13.66	14.09	13.89	13.15	12.16	11.16	10.31	09.91
33°	10.06	10.85	11.78	12.86	13.73	14.17	13.96	13.19	12.16	11.13	10.24	09.33

Fuente: Torres, 2001.

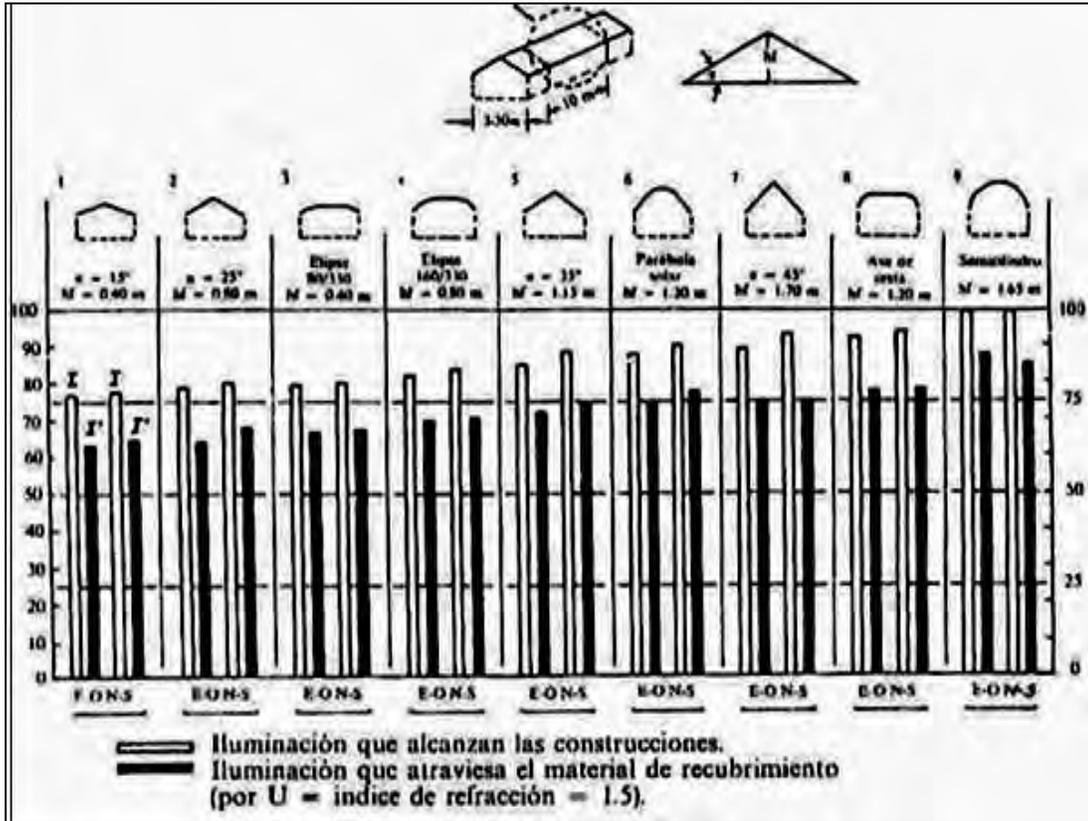
- **Temperatura**

La temperatura es el factor más importante a considerar en el diseño de invernaderos, debido a que al delimitar un espacio con las cubiertas plásticas, creamos un ambiente cerrado, en el cual entra la luz. Esta luz queda atrapada y los rayos caloríficos calientan el aire del interior, ocasionando altas temperaturas que, por consecuencia, elevan la evaporación del agua del suelo y la respiración de las plantas, aumentando la humedad relativa del espacio cerrado, el cual es impermeable al viento, único elemento que puede ser el factor de cambio en el ambiente del invernadero (Torres, 2007).

La temperatura es el factor más importante en el desarrollo de los organismos, pero cualquier extremo se convierte en un problema para la vida. Por eso el desarrollo de

ambientes debe estar relacionado íntimamente con el diseño de estructuras, ya que de la forma de éstas depende el intercambio de aire en el exterior e interior de tal manera que la temperatura sea adecuada.

Figura 12. Cantidad de luz recibida en un invernadero en relación a orientación y forma de la cubierta



Fuente: Tognoni, 2000.

La respuesta de los cultivos a la temperatura varía según la especie, variedad, estado nutricional, etapa fenológica y el proceso que se está desarrollando, así como la disponibilidad de agua, luz, CO₂ y humedad relativa.

Temperaturas diurnas: En general, las temperaturas diurnas en el interior de los invernaderos, siempre sobrepasan las temperaturas recomendadas, ya que se han llegado a registrar temperaturas superiores a 35°C, ocasionado por un diseño erróneo en cuanto a ventilación se refiere. Se sugiere que para mantener temperaturas diurnas adecuadas, el diseño del techo y las ventilas sea eficiente en el ingreso y desalojo del aire interior, de tal modo que permita el desalojo de aire húmedo, caliente y escaso en CO₂.

Temperaturas nocturnas: La manipulación de las temperaturas nocturnas, para controlar la producción y calidad de la mayoría de los cultivos es posible, a partir de que el diseño de invernaderos incluye la climatización. La instalación de equipos de calefacción durante la noche y la instalación de cubiertas que retienen durante mayor tiempo el calor, el cristal y el policarbonato. Las temperaturas óptimas nocturnas para el desarrollo de las plantas son fundamentales para mantener el equilibrio metabólico durante todo el ciclo.

Es muy importante para el diseño de invernaderos revisar las temperaturas medias, máximas y mínimas, que nos permitan evaluar el comportamiento de este factor a lo largo del año y así ser más precisos en el funcionamiento del invernadero.

La temperatura interna varía en forma directa con la cantidad de horas de energía radiante y de manera inversa con la altura del invernadero. Por lo anterior mientras más luz capte el invernadero mayor es la temperatura, pero mientras más alto sea el invernadero menor será la temperatura que alcance por el volumen de aire que se tiene que calentar. Siendo así, invernaderos altos de 4-5 m de altura en cumbre, son convenientes en las regiones cálidas, mientras que los invernaderos de 3.5-4 m de altura, pueden dar mejores resultados en las regiones templadas o frías (FAO-SAGARPA, 2007).

- Humedad relativa

La humedad relativa es una relación entre el peso de la mezcla de aire y la cantidad total de agua que puede ser retenida por unidad de volumen a una temperatura específica y a una presión determinada, expresada en porcentaje. Esta es importante por la incidencia de algunas enfermedades foliares y la transpiración de las plantas. Las enfermedades relacionadas con la humedad son un serio problema en los invernaderos durante la primavera y se incrementan durante los meses lluviosos.

Desde el punto de vista práctico el efecto de los cambios en la atmósfera, en presión o humedad relativa son escasos comparados con aquellos que tienen una presión constante que pueden ser tomados en cuenta. Una humedad relativa del 100% es cuando el aire está saturado y ya no puede retener más agua. Un volumen específico de aire, en el invernadero tiene cambio en el contenido de agua por efectos del calentamiento, la capacidad para retener el agua incrementa y la humedad relativa del aire se eleva.

La temperatura a la que ocurre la condensación es conocida como punto de rocío, esta temperatura marca solamente algunas vías para incrementar o disminuir la humedad relativa del aire dentro del invernadero, en este caso la ventilación con aire con bajo contenido de vapor es alguno de los métodos prácticos para reducir la humedad relativa. Y para incrementar esta humedad los sistemas de vapor de alta presión son muy efectivos (Torres, 2007).

Cuando los cultivos bajo invernadero están sometidos a una alta oscilación de las temperaturas durante el día y la noche, esto hace que muchas veces se tengan problemas de alta humedad por las tardes, particularmente en los meses de primavera.

En los meses calurosos (primavera y verano), el contenido de humedad del aire es muy alto, esto se debe a que por las mañanas las temperaturas del invernadero son similares a las temperaturas del aire libre y estas no son necesarias para calentar el aire húmedo que se encuentra dentro del invernadero. El alto contenido de humedad del aire exterior combinado con la humedad para la transpiración y evaporación de la planta en el invernadero produce condiciones de humedad que satura la entrada.

En ocasiones cuando la humedad relativa del invernadero es alta y por tratarse de recintos cerrados donde no entran insectos polinizadores, existen dificultades en el transporte de polen a los órganos femeninos; para resolver este problema se tiene que efectuar algún tipo de polinización manual (FAO-SAGARPA, 2007).

El problema de alta humedad no ocurre durante los meses de invierno, debido a las grandes diferencias que existen entre las temperaturas interiores y las exteriores. Estas diferencias en cuanto a temperatura causan continuos cambios en la infiltración. Sin embargo la humedad relativa del aire exterior puede causar saturación, este contenido de humedad es muy bajo. La temperatura de las hojas debería estar por debajo de la temperatura del aire que del calor de radiación necesario para el enfriado del vidrio (invernadero), pero la baja humedad relativa de la superficie de las hojas reduce la posibilidad de la extensión del rocío y no ocurre la condensación.

Con alta humedad relativa en el invernadero, el punto de rocío es alcanzado con escaso decremento de temperatura ocurriendo la condensación en la superficie de las hojas. Los calentadores de aire no son un método satisfactorio para reducir la humedad relativa. Con una diferencia pequeña de temperaturas interiores y exteriores, los rangos

de ventilación son extremadamente lentos, esto ocasiona reducciones en los cambios de humedad del aire. Una de las vías más efectivas para prevenir la condensación es mantener las ventilas permanentemente abiertas (Torres, 2007).

- CO₂

El dióxido de carbono, CO₂, también conocido como anhídrido carbónico, es un elemento de gran importancia para las plantas puesto que interviene en la fotosíntesis, proceso mediante el cual las plantas liberan oxígeno y asimilan carbono formando asimilados necesarios para alimentar a todas las células en desarrollo, formando las estructuras morfológicas. El CO₂ también se usa en la elaboración de diferentes productos de reserva que se almacenan en frutos, semillas, raíces, tallos, hojas y otras estructuras de los vegetales, dependiendo del tipo de cultivo. Estos órganos de reserva y almacenamiento son los que interesan en la producción agrícola. Algunos autores indican que el 45% del peso de las plantas es carbono, mismos que las plantas toman de la atmósfera (Sánchez, 2000).

La cantidad de gas carbónico presente en la atmósfera es de 0.03%, aproximadamente unas 300 a 350 ppm, variando de 200 ppm en atmósferas poco saturadas a 400 ppm en lugares donde existen altas concentraciones de CO₂. En los últimos 50 años se estima que el contenido de CO₂ atmosférico ha aumentado en un 10 % como resultado de la combustión de combustibles fósiles, la deforestación y las actividades agrícolas (Elías y Castellvi, 2001).

Bernart *et al*, señalan que el CO₂ dentro de un invernadero durante un día varía entre 200 y 500 ppm, con un valor promedio de 300 ppm. Valores que en general se consideran deficitarios para la mayoría de las plantas y constituye un freno para su desarrollo. Investigaciones realizadas en diversos lugares consideran que la mayoría de las plantas tienen su óptimo de fotosíntesis entre los 600 y 900 de CO₂ en el ambiente.

En invierno a medio día, el consumo normal de CO₂ es de 1.5 a 2 g CO₂ m⁻² h⁻¹ subiendo en primavera a valores medios de 3 g en la costa mediterránea. El umbral crítico de CO₂ por debajo del cual, el balance de carbono es negativo, la respiración supera a la fotosíntesis, es normalmente menor a 200 ppm (Castilla, 2005).

La concentración del CO₂ dentro de los invernaderos varía mucho, sobre todo si estos permanecen cerrados mucho tiempo. En las primeras horas de la mañana, en un día

despejado, la concentración de CO₂ dentro de un invernadero puede ser más alta que en la atmósfera exterior, alcanzando valores por arriba de 400 ppm. En las siguientes horas al aumentar la intensidad luminosa y ocurrir la fotosíntesis, se consume CO₂, y disminuye su concentración rápidamente hasta alcanzar niveles de 200 ppm. Esta situación puede durar varias horas mientras exista la intensidad luminosa suficiente para realizar la fotosíntesis. Cuando se nubla o disminuye la cantidad de luz, los niveles de CO₂ se recuperan y aumenta gradualmente su concentración, hasta alcanzar los niveles más altos un poco antes de que salga el sol para repetir nuevamente el ciclo.

Si el invernadero permanece cerrado o la circulación se dificulta dentro del mismo, situación que ocurre con cultivos densos y altos, la concentración de CO₂ disminuye debido a que es utilizado por las plantas y no es renovado desde el exterior. Por lo tanto, el CO₂ se convierte en un factor limitante para el desarrollo normal de las plantas y se hace necesario aportarlo como otro fertilizante más (Bastida, 2006).

Los niveles de CO₂ se pueden aumentar mediante aportes artificiales que pueden elevar su concentración de los niveles normales de 200 a 300 ppm a niveles de 1000 a 2000 ppm. Concentraciones muy altas pueden ser tóxicas para los cultivos (Elías y Castellvi, 2001).

La circulación continua del aire dentro del invernadero, permite la renovación del CO₂ que rodea a las plantas aportando el necesario para la fotosíntesis. Se recomienda que el aire de los invernaderos se renueve periódicamente, mínimo una renovación por minuto (Bastida, 2006).

- Precipitación

En invernaderos es necesario tener en cuenta la precipitación para diseñar una forma de techo que desaloje bien el agua de lluvia del techo, además que no es un problema la falta de agua como en un cultivo a cielo abierto, pues esta tecnología eficientiza al máximo este recurso.

- Vientos

El viento es el aire en movimiento, el aire caliente asciende y el aire frío ocupa su lugar. Este movimiento crea los vientos alrededor del globo terráqueo. El comportamiento del aire asociado al movimiento de la tierra provoca el Efecto Coriolis.

El movimiento del aire puede ser paralelo a la superficie vertical a ella, en sentido horizontal se debe a la tendencia a igualar las diferencias de presiones entre dos puntos de la superficie terrestre. La falta de aire que existe en el suelo y en las áreas de baja presión, debido al continuo movimiento ascendente del aire, tiende a ser compensado por el exceso de aire presente en las áreas de alta presión, donde a nivel de suelo el aire se encuentra comprimido. Por lo tanto, el aire se dirige de las altas a las bajas presiones. Cuanto mayor sea la diferencia de presiones entre dos puntos, mayor es la velocidad del viento. Otro factor que influye sobre el comportamiento de los vientos es el calentamiento irregular de la superficie terrestre.

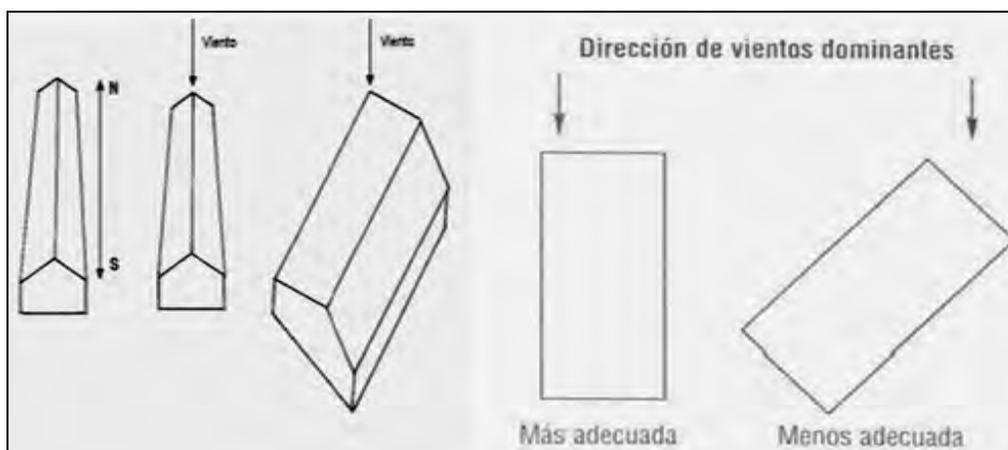
En México se observan diferentes efectos de esta circulación durante el año, estos fenómenos se manifiestan por su ubicación en las diferentes regiones del territorio. En verano, las masas de aire húmedo invaden el país de oriente a poniente durante los meses de julio a septiembre, teniendo como límite la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre del Sur, además de los vientos del Pacífico norte, siendo estos los que determinan el clima en el verano. En esta temporada, los ciclones se hacen presentes causando disturbios físicos en el ambiente, tales fenómenos son destructivos debido a que alcanzan velocidades de más de 120 km/h. Durante el proceso de diseño el efecto de estos fenómenos y su localización, deberán tomarse en cuenta, con el objeto de seleccionar los materiales, la forma, el sistema de armado y el anclaje.

Otro tipo de efecto del viento son las masas polares y los nortes, los cuales definen la estación invernal, en la que las temperaturas disminuyen por debajo de cero, causando efectos de helada, el diseño debe considerar el efecto del frío al interior de los invernaderos.

El viento presenta tres características: velocidad, dirección y frecuencia. La velocidad es importante por la presión dinámica que ejerce el aire sobre las construcciones y los efectos que puede provocar en estas. La dirección es una característica que es necesario considerar porque de esta depende el impacto del viento sobre las paredes de la construcción y a su vez el ingreso del aire al interior del invernadero (Torres, 2007).

La orientación se debe combinar con la dirección de los vientos de tal manera que el eje longitudinal de los invernaderos quede en el sentido de los vientos dominantes (figura 13).

Figura 13. Orientación que disminuye la resistencia a vientos dominantes



Fuente: Robledo y Martín, 1981.

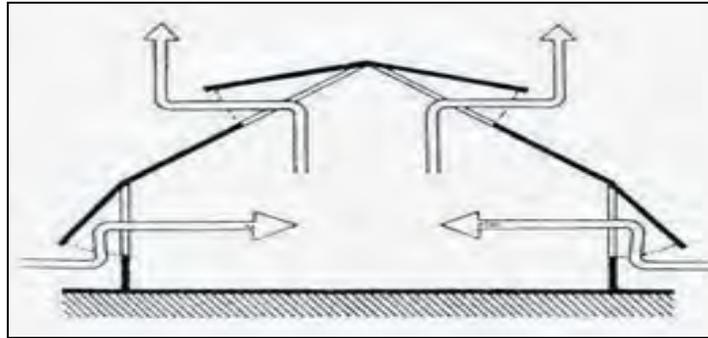
El viento es un factor elemental en la ventilación natural de las construcciones, por muchos años se han construido techos cerrados para evitar el efecto del viento en las cubiertas plásticas, sin embargo esto ha provocado que el control de las temperaturas y la humedad relativa en el interior sea deficiente. Se debe evaluar en forma local el comportamiento del viento, así como el volumen de aire que contienen las construcciones para que a partir de este análisis se determine la superficie de ventilas, así como la altura de las ventanas y su ubicación (Torres, 2007).

En invernaderos es importante resaltar que a mayor altura, el viento ejerce mayor presión dinámica, lo cual nos indica que para tener mayor ventilación, las ventilas de ingreso deben ubicarse a mayor altura, sin considerar las ventilas cenitales, las cuales son instaladas para sacar aire caliente y no para ingresar aire fresco.

La regulación de la temperatura y la humedad en el interior del invernadero se logra a través de la ventilación. La abertura cenital sirve para expulsar aire caliente del interior hacia fuera, en tanto que las ventilas laterales permiten la entrada de aire fresco (figura 14). La circulación del aire también permite la renovación del CO_2 necesario para la fotosíntesis, el cual puede bajar drásticamente su concentración en invernaderos cerrados con cultivos densos y altos. La mayoría de los expertos en el diseño de invernaderos indican que se requiere de 15% a 30% de ventila lateral por m^2 de superficie cubierta. En el caso de la abertura cenital esta relación baja hasta el 6%. Sin embargo, cuando se colocan mallas anti-áfidos la ventilación se reduce hasta un 80%. Si

es pequeña la abertura cenital, es mayor la cantidad de aire caliente que pasa en un minuto y también influye el movimiento de aire que existe en el exterior (FAO-SAGARPA, 2007).

Figura 14. Movimiento del aire dentro del invernadero



Fuente: Bernart *et al*, 1990.

3.3.1.3. Factores técnicos

- Vías de comunicación

El acceso a caminos se hace necesario para el abasto de insumos y salida de productos.

- Fuentes de energía

La energía eléctrica es la principal en las instalaciones para la operación de equipos y sistemas auxiliares.

- Disponibilidad de mano de obra

Es importante tener cerca de la construcción un núcleo de población para que los habitantes se puedan emplear y de esta manera podamos satisfacer la fuerza de trabajo necesaria para poder llevar a cabo la producción.

- Disponibilidad de agua

El contar con agua en cantidad, calidad y oportunidad requeridas es indispensable, ya sea para riego o para la limpieza de instalaciones o equipos (Rojas, 1993).

- Superficie

De forma general es necesario definir el espacio que se le va a destinar a la construcción.

- Especie a cultivar

En el proceso de diseño de invernaderos, el factor técnico más importante es la planta o bien, la especie que se desee cultivar. Todos los requerimientos para el desarrollo adecuado de la planta deben ser tomados en cuenta para determinar el largo, el ancho, la altura, el porcentaje de superficie a ventilar, la cantidad de luz que se dejara pasar, la forma del techo, la colocación de cada uno de los elementos constitutivos del sistema estructural, la instalación de los sistemas de control, eléctrico, de extracción de aire, de fertirrigación, de mallas auxiliares para el control de le excesiva radiación solar y los sistemas de cultivo como: macetas, camas, charolas, columnas de cultivo, sistemas hidropónicos y sistemas de tutoreo.

- Disponibilidad de materiales

Otro factor importante son los materiales de construcción pues son los elementos que el diseñador tiene a la mano para desarrollar sus proyectos por lo cual el conocimiento que se tenga de ellos es fundamental (Torres, 2007).

3.3.2. Diseño estructural para el invernadero

En esta parte de la metodología se definen los factores que se deben considerar en el diseño estructural del invernadero, se describen las condiciones eólicas, sísmicas y de precipitación como el granizo y los respectivos cálculos para el proyecto en cuestión de acuerdo con los parámetros establecidos por los citados factores.

Jiménez Moreno (1999) nos dice que dar forma a una estructura que cumpla una determinada función con un grado de seguridad razonable y que en las condiciones normales de servicio tenga un comportamiento adecuado y además, que su costo se mantenga dentro del límite aceptable, no puede obtenerse mediante un proceso

matemático rígido, donde se aplique rutinariamente un determinado conjunto de reglas y fórmulas.

Se considera dentro del diseño, el análisis estructural para el dimensionamiento general de elementos estructurales, la vigilancia del comportamiento de la estructura durante las etapas de construcción, su vida de servicio, así como efectuar modificaciones o reparaciones durante estas etapas.

En el análisis para dimensionar los elementos de la estructura se proponen las dimensiones generales de la estructura, analizando las cargas o acciones a la que va a estar sujeta para determinar las dimensiones que ha de tener cada elemento estructural, tomando en consideración las características del material que se vaya a usar en su construcción.

El grado de precisión que se trate de obtener, depende de la importancia de la estructura y de la posibilidad de conocer todas las acciones que obran realmente sobre ella. Un vicio frecuente es el de obtener un exceso de minuciosidad en casos en que la importancia del problema no lo amerita, en que el conocimiento de las acciones es solamente aproximado, y en que el ahorro que puede obtenerse gracias al refinamiento en el análisis, no lo justifica.

También se considera como un método de diseño, aquél en el que no se lleva a cabo un análisis estructural en gabinete para llegar al dimensionamiento; mediante este método, se construye una estructura a escala natural para comprobar si su comportamiento ante las cargas que actúan sobre ella es satisfactorio. Aún en la actualidad, muchos de los sistemas constructivos tradicionales están basados en la experiencia acumulada a través de los años, por ejemplo, el albañil puede construir una casa con su seguridad razonable, sin haber recurrido a un análisis estructural. Evidentemente que este método tiene algunos inconvenientes como son: su costo que puede no encontrarse dentro de los límites razonables, el tiempo necesario para obtener resultados y la incertidumbre de seguridad. Aún cuando se haga un análisis estructural profundo, existen acciones en las que su magnitud máxima es impredecible, como las fuerzas de sismos y aún del viento.

3.3.2.1. Cargas o acciones

Para el diseño de toda estructura, es necesario considerar todas las cargas o acciones que se suponen van a actuar sobre ella durante su vida útil, para situarla dentro de un

margen de seguridad. En la determinación de la magnitud de estas acciones, se presenta cierto grado de incertidumbre, principalmente en las acciones variables y accidentales, por lo que en el mejor caso la magnitud es aproximada. Según la duración con que actúan sobre la estructura, las acciones se clasifican en: acciones permanentes, acciones variables y acciones accidentales (Jiménez, 1999).

- Acciones Permanentes

Actúan en forma continua sobre la estructura, su localización y magnitud no se modifican con el tiempo.

Carga muerta

Incluye el peso propio de la estructura y el de todos aquellos elementos que actúan de manera permanente sobre ella. En invernaderos se incluye el peso de la estructura, peso de la cubierta y equipos de iluminación artificial, calefacción, ventilación y humidificación, en los que su peso descansa directamente y de manera permanente sobre la estructura.

La carga ejercida por los equipos antes mencionados, no debe tomar valores por debajo de los 15 kg/m^2 cuando dichos equipos se encuentran uniformemente distribuidos (Robledo y Martín, 1981).

Considerando que para algunos casos el valor antes citado pudiera estar sub o sobrestimado, es aconsejable manejarlo con exactitud, siempre y cuando sea posible su conocimiento con anterioridad, para obtener mejores resultados.

- Acciones variables

El periodo de tiempo que actúa sobre la estructura es variable:

Carga viva

Incluye todas las cargas gravitatorias que sus características mecánicas pueden variar durante la utilización de la estructura. En invernaderos se consideran como cargas vivas, la fuerza que ejerce el entutorado de algunos cultivos, así como cualquier equipo que se instale temporalmente (Jiménez, 1999:64).

Robledo y Martín, (1981) reportan que la carga que ejerce el entutorado tiene un valor comprendido entre los 14 y 16 kg/m², este valor es útil para fines de diseño.

- Acciones Accidentales

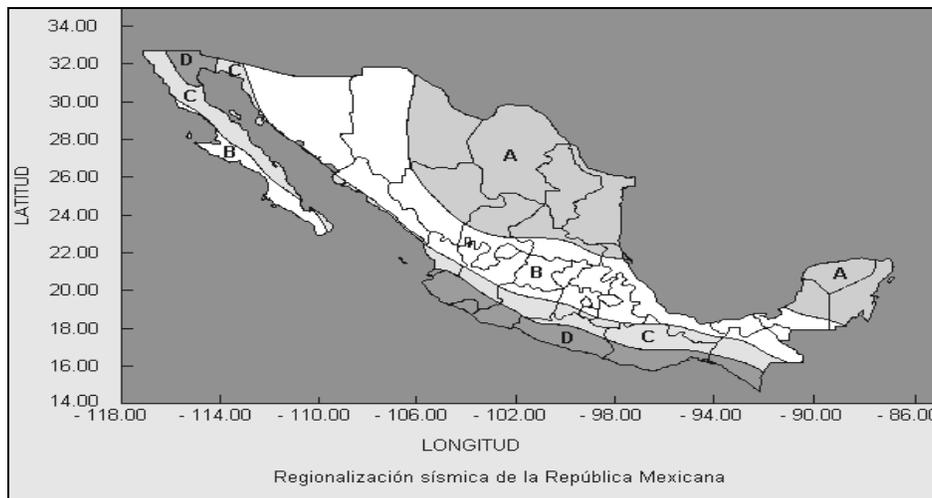
Se caracteriza porque se desconoce el momento en el que van a actuar sobre la estructura, su intensidad puede ser superior a la de cualquier valor conocido, representan un accidente en la vida de la estructura y su control queda fuera del proyectista.

Cargas por Sismo

Las cargas por sismo son consideradas en el diseño de cimentación. Los sismos pueden ser trepidatorios y oscilatorios, siendo los segundos los más peligrosos, ya que además de aumentar las compresiones producen empujes horizontales que causan esfuerzos de tensión, mientras que los primeros, sólo actúan esfuerzos de compresión en los apoyos. La importancia de los empujes horizontales es una función del peso de la estructura y el grado de intensidad del mismo (Castro, 1974).

La República Mexicana se encuentra dividida en cuatro zonas sísmicas (figura 15). Estas zonas son un reflejo de que tan frecuentes son los sismos en las diversas regiones y la máxima aceleración del suelo a esperar durante un siglo.

Figura 15. Regiones sísmicas de México



Fuente: Manual de diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo de la C.F.E.

La zona A es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores. La zona D es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad. Las otras dos zonas (B y C) son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo. Aunque la Ciudad de México se encuentra ubicada en la zona B, debido a las condiciones del subsuelo del valle de México, pueden esperarse altas aceleraciones (S.S.N., Servicio Sismológico Nacional).

Cargas por Viento

Castro, (1974) señala que la presión del viento sobre la superficie del techo depende de su velocidad, dirección, orientación y pendiente de la superficie del techo. Se supone que el movimiento del viento es horizontal y que la presión del mismo contra una superficie plana normal a su dirección, está dada por la fórmula:

$$P_h = 0.0075 V^2$$

P_h = Presión sobre una superficie plana y normal a la dirección del viento, en kg/m^2 .

V = Velocidad del viento, en km/h .

La velocidad del viento en el diseño, se toma como el máximo valor de velocidad registrado en la región.

Para calcular la presión del viento sobre superficies inclinada se usa la siguiente fórmula:

$$P_h = 2 P_n \text{ Sen } A / (1 + \text{sen}^2 A)$$

P_n = Presión normal del viento, en kg/m^2 de superficie (o de techo).

P_h = Presión del viento sobre una superficie vertical, o sea presión horizontal, en kg/m^2 .

A = Ángulo de inclinación del techo (o superficie) sobre el plano horizontal, en grados.

Si el viento actúa sobre una superficie que no sea plana, la presión depende de la forma de dicha superficie, siendo mínima para una superficie convexa y máxima para una superficie cóncava. En las siguientes tablas se resumen algunas intensidades y sus correspondientes presiones horizontales sobre una superficie vertical y presiones normales sobre superficies de techo de varias pendientes.

Tabla 3. Velocidades del viento

Velocidades del viento y sus correspondientes presiones horizontales					
Velocidades de viento (km/h)	50	75	100	125	150
Presión horizontal (kg/m^2)	18.75	42.19	75.00	117.19	168.75

Fuente: Jiménez, 1999.

Tabla 4. Cargas normales del viento

Cargas normales del viento (en kg/m^2) en función de la presión horizontal y la inclinación del techo								
Presión horizontal (kg/m^2)	Inclinación del techo ($^\circ$)							
	10	15	20	25	30	35	40	45
18.75	6.3	9.1	11.5	13.5	15	16.2	17.1	17.7
42.19	14.2	20.4	25.8	30.3	33.8	36.5	38.4	39.8
75.00	25.3	36.5	35.9	53.7	60.0	64.8	68.1	70.7
117.19	39.5	57.0	71.8	84.1	93.9	102.2	106.5	110.5
168.75	56.9	82.0	103.5	121.0	134.8	145.6	156.5	163.8

Fuente: Jiménez, 1999.

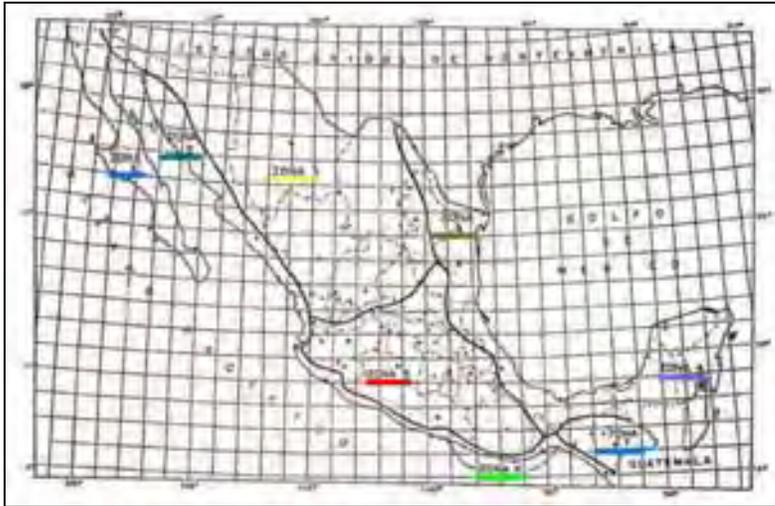
En la figura 16 se observa que la república mexicana está zonificada en 7 regiones de impacto de viento, las cuales reciben velocidades que van de 80 hasta 160 km/h.

Cargas por Granizo

En México el problema más presentado es el peso del granizo, este produce un efecto similar a la nieve al depositarse. En general, las cantidades de granizo no suelen ser de cuidado en una lluvia del mismo, además, el granizo se desliza y para considerar sus efectos más desfavorables, conviene saber que tiende a depositarse en las depresiones formadas entre los techos de invernaderos conectados (Llamas, 1995).

Los valores propios de la carga de granizo deben estimarse tomando como base 30 kg/m en canalón, lo cual es tomado de la norma mexicana NMX-E-255-CNCP-2008, Invernaderos-Diseño y Construcción-Especificaciones.

Figura 16. Regiones eólicas de México



Zona eólica	Velocidad (km/h)
1	90
2	125
3	115
4	160
5	80
6	150
7	80

Fuente: Manual de diseño de Obras Civiles de la C.F.E.

3.3.2.2. Armaduras

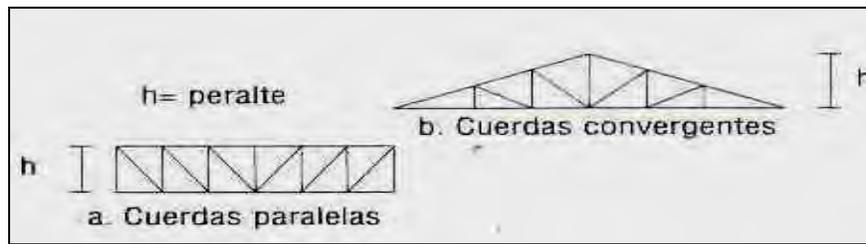
Es el principal tipo de estructura que se usa en ingeniería, la cual proporciona una solución práctica y económica.

Son elementos formados por un conjunto de barras articuladas en sus extremos y unidas de tal manera que se forma un conjunto de triángulo prácticamente indeformable, las cargas exteriores aplicadas en sus juntas producen solamente esfuerzos directos (axiales) en dichas barras (De Buen *et al.*, 1987).

La única figura geométrica que no se deforma sin que sus lados alteren es el triángulo que constituye la forma básica de la disposición de los elementos de una armadura (figura 17).

Las armaduras sencillas substituyen a las vigas cuando las largas y los claros demasiado considerables para permitir el empleo económico de las secciones corrientes de vigas. Otra ventaja de las armaduras, es que sus piezas se pueden unir entre sí de tal manera que se pueden ajustar a la forma de cualquier techo (Castro, 1974).

Figura 17. Tipos de armaduras según su forma



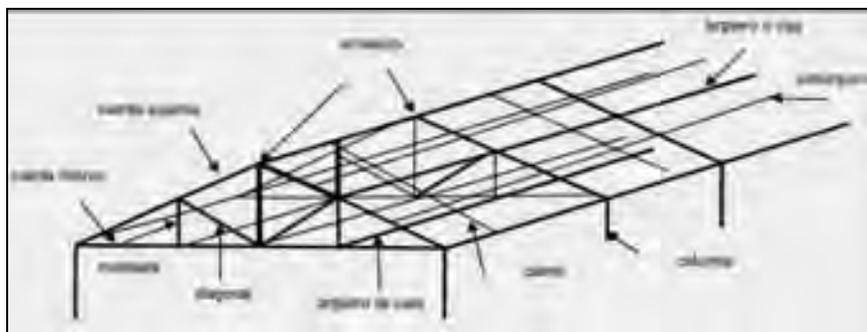
Fuente: Jiménez, 1999.

En estructuras para invernaderos, el uso de armaduras es funcional, ya que los claros son grandes y la viga de alma llena deja de ser económica, debido a la magnitud que alcanza la carga muerta. La sección que se obtiene con el uso de vigas es tal, que el peso propio de las mismas es el factor más importante que interviene en su diseño (De Buen *et al.*, 1987).

En el caso de invernaderos, la carga de la cubierta se apoya sobre largueros de sección más esbelta que las vigas de alma llena, esos transmiten la carga a las armaduras en sus articulaciones o nudos.

Las partes que conforman una armadura y un techo son diversas, las principales son las siguientes (figura 18):

Figura 18. Partes de una estructura



Fuente: Jiménez, 1999.

- Cuerdas: se llama cuerda superior e inferior a las piezas superior e inferior respectivamente, de una armadura.

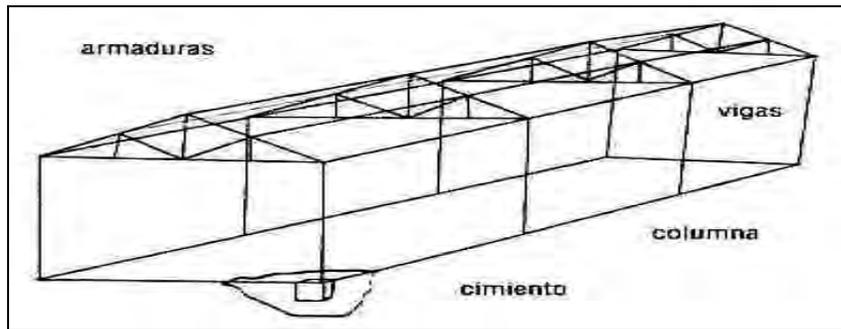
- Piezas de alma: éstas son las que se localizan entre las cuerdas superior e inferior, pueden estar sujetas a esfuerzos de tensión o de compresión. Los montantes están sometidos a fuerza de compresión y los diagonales a fuerza de tensión o tracción.
- Panel: se llama panel o longitud de panel a la distancia entre dos juntas adyacentes a lo largo de la cuerda superior o de la inferior. El espacio cuadrangular cruzado por una pieza inclinada (diagonal) del alma, también se dice que es un panel de la armadura.
- Crujía: se llama crujía a la parte del tejado comprendida entre dos armaduras adyacentes.
- Pórtico: se llama así al conjunto de armadura y columnas, cuando la primera está apoyada en sus extremos en columnas.
- Largueros: se llama así a las vigas apoyadas en la cuerda superior, que van de armadura a armadura y soportan la carga de la cubierta, generalmente se apoyan en las articulaciones.
- Largueros de cielo: se llama así a los largueros que van armadura en armadura apoyados en las cuerdas inferiores para soportar el cielo; en lo posible se colocan de tal manera que transmitan los esfuerzos a las articulaciones. Los largueros de techo en invernaderos tendrían la función de soportar y transmitir a la armadura las cargas por el tutorado, así como posibles equipos de iluminación artificial y calefacción.
- Cubierta: se llama así a lo que constituye la superficie exterior del invernadero.
- Estructura de la cubierta: se llama así a la estructura que queda encima de los largueros. Está compuesta por cabríos (piezas paralelas a las armaduras y apoyadas en los largueros), y sublargueros (piezas paralelas a los largueros y apoyadas en los cabríos). La utilización o no de estos elementos está determinada por el claro que existe entre armaduras y largueros (principales), y las dimensiones y resistencia del material de cubierta. Cuando se trata de claros muy grandes y el material de cubierta a usar es polietileno, es necesario el uso de cabríos y sublargueros para evitar daños mecánicos a la cubierta por acción del viento, lluvia o granizo.
- Cimientos: la cimentación, aunque no se considera como un elemento estructural, tiene la función de recibir o soportar el peso de toda la estructura comunicado por las columnas, y a su vez, transmitir esa fuerza a un estrato del terreno, dando seguridad

contra fallas del suelo y evitando el hundimiento. También debe limitar la tendencia al volteo ante la acción de cargas laterales como el viento, sirviendo prácticamente de anclaje de la estructura al suelo y eliminando posibles perjuicios a la estructura.

Elementos estructurales

Se menciona a continuación las características principales de los elementos estructurales y la manera en que participan en la formación de la estructura. Esta, se forma por elementos simples que ya en conjunto comunican propiedades de resistencia, rigidez, etc. a la estructura. Es necesario seleccionar estos elementos estructurales y combinarlos entre sí eficientemente para constituir una estructura óptima (Jiménez, 1999).

Figura 19. Elementos estructurales principales y su disposición

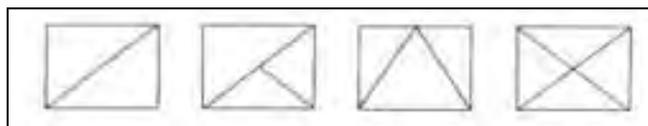


Fuente: Jiménez, 1999.

Elementos sujetos a tensión: Tensores o contravientos

Los contravientos son elementos que trabajan fundamentalmente a tensión, aunque en algunos casos estas fuerzas están combinadas con flexión. El acero, por sus propias características mecánicas, es el material que mejor se comporta cuando se encuentra sometido a tensión, ya que desarrolla esfuerzos muy altos (De Buen *et al.*, 1987).

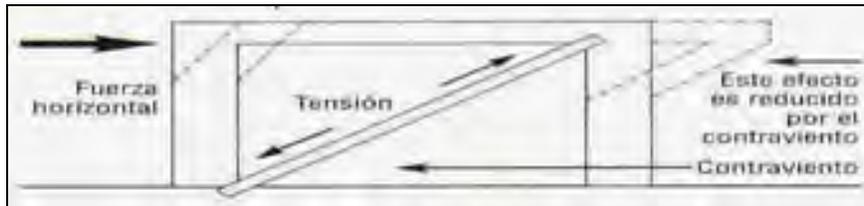
Figura 20. Disposición de contravientos en marcos rígidos



Fuente: Jiménez, 1999.

Estos elementos tiene la función de contrarrestar cualquier fuerza horizontal a la estructura, principalmente por viento, además, restringen el desplazamiento lateral del marco al que se encuentran anclados, lo cual incrementa la rigidez.

Figura 21. Rigidez de un marco con contraviento



Fuente: Jiménez, 1999.

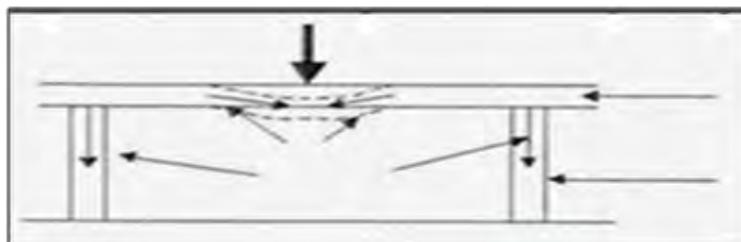
Elementos sujetos a compresión: columnas

Las columnas dan el soporte o apoyo de una estructura, su función es la de recibir las cargas verticales o gravitacionales que actúan sobre ella y transmitir las a la cimentación. Son elementos sujetos a fuerzas de compresión que son transmitidas en algunos casos por las vigas o largueros, y en otros por la armadura.

Elementos sujetos a flexión: vigas o largueros

Las vigas son elementos estructurales que están sometidos fundamentalmente a flexión, bajo la acción de cargas o pesos perpendiculares a su eje, aunque también tienen puntos sometidos a compresión.

Figura 22. Representación esquemática de fuerzas de compresión y flexión, en columnas y vigas respectivamente



Fuente: Jiménez, 1999.

Características del procedimiento de cálculo de la estructura de acero

La consideración básica a tomar en cuenta para diseñar estructuras de fierro o acero es, definir los aspectos fundamentales que se toman en cuenta para el diseño de cada elemento estructural (Jiménez, 1999).

Para el diseño de toda estructura, el análisis de carga que actúa sobre ella, es de la forma siguiente:

Cubierta→ Estructura de la cubierta→ Largueros→ Armaduras→ Columnas→ Cimientos.

a) Cubierta. Las cargas ejercidas por la cubierta son:

- Peso propio de la cubierta. Esta carga es posible obtenerla mediante la densidad del material, es aconsejable utilizar el dato que el fabricante especifique para cada material.

- Carga por viento. La carga por viento está determinada por la formula: $P_h = 2 P_n \text{ Sen } A / (1 + \text{sen}^2 A)$, mediante la cual se puede calcular la presión normal ejercida por el viento sobre superficies inclinadas, en este caso sobre el techo.

Igualmente es recomendable aplicar la teoría del manual de diseño por viento del Distrito Federal, ya que el procedimiento anterior se basa en techos planos a dos aguas.

-Carga por granizo. Como se mencionó anteriormente la carga de granizo debe estimarse tomando como base 30 kg/m lineal en canalón según la norma NMX-E-255-CNCP-2008.

b) Estructura de la cubierta. Está formada por cabríos y sublargueros, estos elementos pueden o no considerarse en el diseño de la estructura para invernaderos, dependiendo de la magnitud del claro existente entre armaduras y largueros, y las características dimensionales y de resistencia del material de cubierta. Si se considera además que estos elementos restan luminosidad en el interior, solo será justificable su uso cuando las condiciones lo ameriten.

c) Largueros. Las cargas que actúan sobre los largueros son:

- o peso propio de la cubierta

- carga por viento
- carga por granizo
- estructura de la cubierta

La carga ejercida por el propio peso de la estructura de la cubierta, puede determinarse mediante las especificaciones de peso por unidad de longitud de los diferentes materiales de fierro y acero que se usan en la construcción.

Las características físicas de los materiales de acero más comúnmente usados en la construcción de estructuras, se encuentran o son dadas a conocer por compañías dedicadas a la industria del acero en sus manuales de especificaciones mecánicas y físicas. Estos datos del material para construcción, son necesarios para facilitar el diseño de la estructura.

Para el caso de largueros de cielo (que son los que soportan la carga por entutorado y de equipos de calefacción e iluminación), el procedimiento de diseño es el mismo que el descrito para largueros de techo, sólo que en el caso de largueros de cielo, la carga unitaria (kg/m) está determinada por la carga total (entutorado y equipos de calefacción e iluminación) dividida entre la longitud del claro del larguero.

La separación entre largueros está determinada por la separación entre articulaciones o nudos de la armadura, ya que sobre ellas descansan los largueros.

d) Armaduras. La separación entre armaduras es generalmente 0.5 veces la separación entre columnas (o ancho del invernadero), así mismo, la separación entre montantes es en forma simétrica con respecto a la cuerda inferior (Heinen y Gutiérrez, 1975).

Castro, (1974) menciona que la determinación de esfuerzos en una armadura cualquiera, está regida en los principios de equilibrio estático. La armadura en conjunto, debe quedar en equilibrio bajo la acción de las cargas que sobre ella actúan y de las reacciones. También debe permanecer en equilibrio bajo la acción de las fuerzas exteriores, aplicadas en los extremos de las piezas, una parte cualquiera de la armadura tomada por separado del resto y considerada como cuerpo libre.

Las tres ecuaciones fundamentales del equilibrio que deben verificarse son:

- Suma de todas las componentes horizontales de todas las fuerzas, igual a cero.

- Suma de todas las componentes verticales de todas las fuerzas, igual a cero.
- Suma de los momentos de todas las fuerzas con relación a un punto cualquiera, igual a cero.

Las dos primeras ecuaciones de equilibrio estático, comprenden la descomposición de fuerzas y se pueden resolver algebraicamente; la tercera ecuación comprende los momentos de las fuerzas, tanto exteriores como interiores y también puede resolverse por procedimientos algebraicos o gráficos.

Las cargas totales que obran sobre la armadura y descansan en sus articulaciones o nudos son las siguientes:

- Cargas que actúan sobre el larguero de techo
- Peso propio del larguero del techo
- Cargas que actúan sobre el larguero de cielo
- Peso propio del larguero de cielo

El peso propio de largueros de techo y largueros de cielo, pueden determinarse a partir del peso por unidad de longitud de material.

Es esencial que cualquier producto, máquina o estructura sea segura y estable bajo las cargas ejercidas sobre aquellas durante cualquier uso previsible, y el análisis y diseño de estos dispositivos o estructuras, debe garantizar esta seguridad (Mott, 1999).

En el diseño y construcción de cualquier estructura, se debe determinar el material (madera, aluminio, acero, concreto reforzado, etc.) y las dimensiones de su sección transversal de tal manera que se pueda garantizar con un factor de seguridad adecuado, que la misma no se romperá ni se deformará excesivamente.

Es necesario entonces conocer primero las fuerzas internas (más exactamente los esfuerzos internos) que intentarán romperla y deformarla, y posteriormente comparar estos resultados con la resistencia y rigidez propias del material que se empleará. La resistencia de materiales tiene dos partes bien diferenciadas: la parte teórica que analizando diagramas de cuerpo libre, estableciendo sus condiciones de equilibrio y

aplicando determinados modelos matemáticos determina las fuerzas internas y los esfuerzos actuantes sobre los elementos; y una parte experimental que mediante ensayos de probetas del material determina la resistencia y rigidez de los mismos, entre otras características y que son los que le permitirán al elemento oponerse a la rotura y a las deformaciones causadas por los esfuerzos actuantes (Salazar, 2001).

3.3.2.3. Esfuerzo

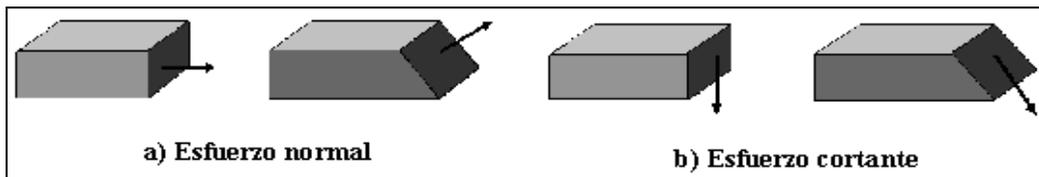
Esfuerzo es la resistencia que ofrece un área unitaria (A) del material del que está hecho un miembro para una carga aplicada externa (fuerza F):

$$\text{Esfuerzo} = \text{fuerza} / \text{área}$$

$$\sigma = F / A$$

Dependiendo de que la fuerza interna actúe perpendicularmente o paralelamente al área del elemento considerado, los esfuerzos pueden ser normales (fuerza perpendicular al área), cortantes (tangenciales, debido a una fuerza paralela al área), como se muestra en la figura 23.

Figura 23. Tipos de esfuerzos

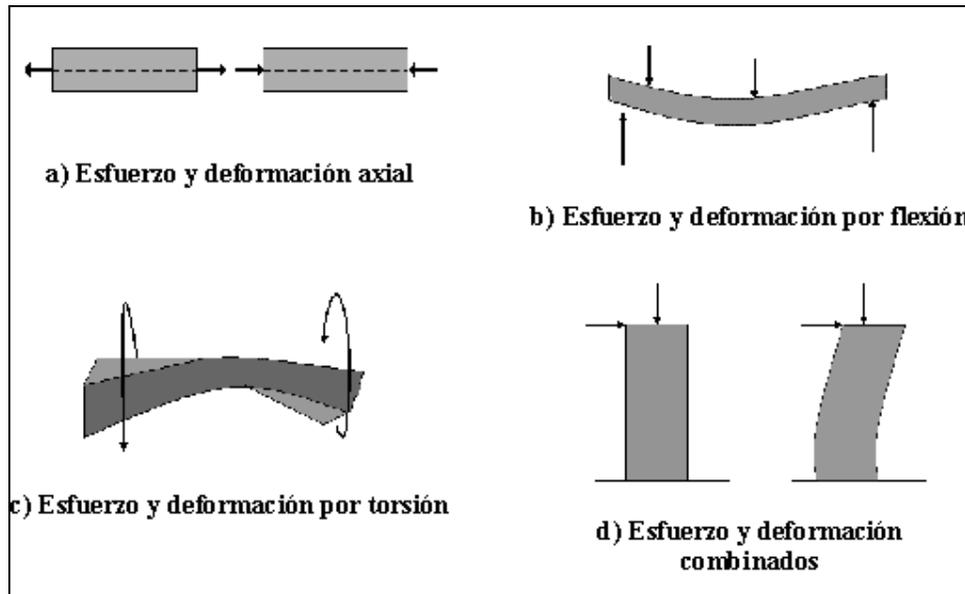


Fuente: Salazar, 2001.

En algunos casos, como en el esfuerzo normal directo, la fuerza aplicada se reparte uniformemente en la totalidad de la sección transversal del miembro; en estos casos el esfuerzo puede calcularse con la simple división de la fuerza total por el área de la parte que resiste la fuerza, y el nivel del esfuerzo será el mismo en un punto cualquiera de una sección transversal cualquiera. En otros casos, como en el esfuerzo debido a flexión, el esfuerzo variará en los distintos lugares de la misma sección transversal, entonces el nivel de esfuerzo se considera en un punto (Mott, 1999).

Dependiendo de la forma cómo actúen las fuerzas externas, los esfuerzos y deformaciones producidos pueden ser axiales (a), por flexión (b), por torsión (c), o combinados (d), como se muestra en la figura 24.

Figura 24. Tipos de esfuerzos y deformaciones

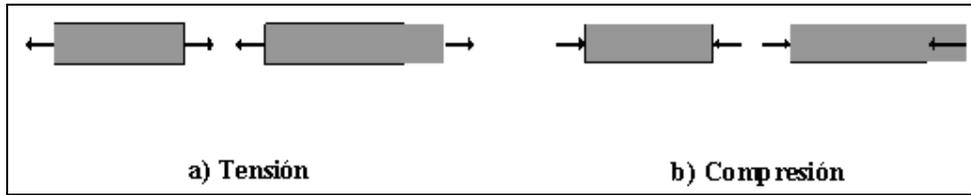


Fuente: Salazar, 2001.

Esfuerzos normales axiales

Esfuerzos normales, son aquellos debidos a fuerzas perpendiculares a la sección transversal. Esfuerzos axiales, son aquellos debidos a fuerzas que actúan a lo largo del eje del elemento. Los esfuerzos normales axiales por lo general ocurren en elementos como cables, barras o columnas sometidos a fuerzas axiales (que actúan a lo largo de su propio eje), las cuales pueden ser de tensión o de compresión. Además de tener resistencia, los materiales deben tener rigidez, es decir tener capacidad de oponerse a las deformaciones puesto que una estructura demasiado deformable puede llegar a ver comprometida su funcionalidad y obviamente su estética. En el caso de fuerzas axiales, de tensión o compresión, se producirán en el elemento alargamientos o acortamientos, respectivamente (figura 25).

Figura 25. Deformación debida a los esfuerzos normales axiales



Fuente: Salazar, 2001.

Esfuerzos cortantes

Las fuerzas aplicadas a un elemento estructural pueden inducir un efecto de deslizamiento de una parte del mismo con respecto a otra. En este caso, sobre el área de deslizamiento se produce un esfuerzo cortante, o tangencial. Análogamente a lo que sucede con el esfuerzo normal, el esfuerzo cortante se define como la relación entre la fuerza y el área a través de la cual se produce el deslizamiento, donde la fuerza es paralela al área. El esfuerzo cortante (τ) se calcula como (Salazar, 2001):

$$\tau = F / A$$

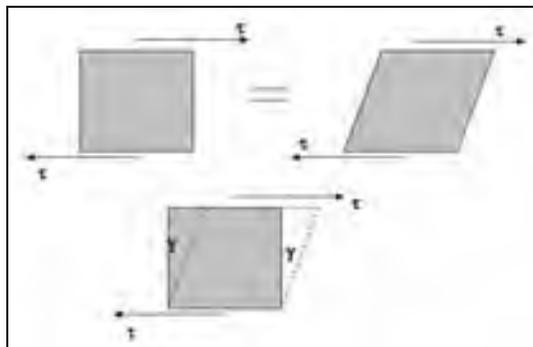
τ : es el esfuerzo cortante

F: es la fuerza que produce el esfuerzo cortante

A: es el área sometida a esfuerzo cortante

Las deformaciones debidas a los esfuerzos cortantes, no son ni alargamientos ni acortamientos, sino deformaciones angulares γ (figura 26).

Figura 26. Deformación debida a los esfuerzos cortantes



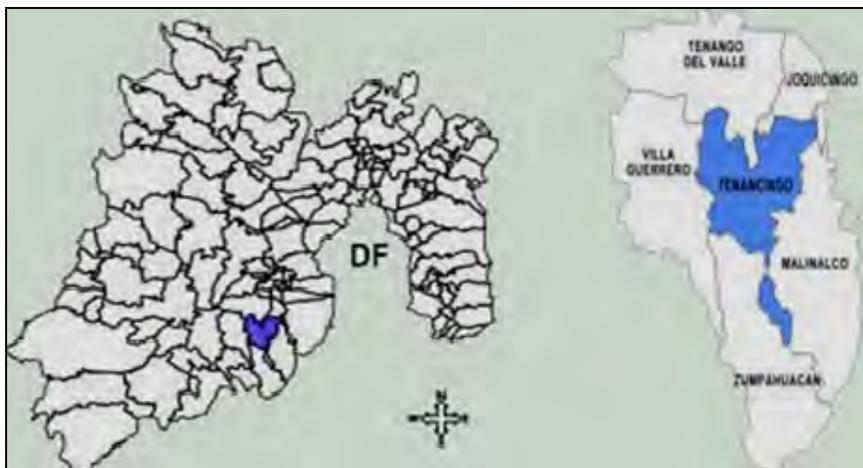
Fuente: Salazar, 2001.

3.4. Estudio Socioeconómico del municipio de Tenancingo, Estado de México

3.4.1. Ubicación

El municipio de Tenancingo, Estado de México, se ubica, según el Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Tenancingo, 1997-2000, entre la Latitud norte $18^{\circ} 53' 15''$ y Latitud norte $19^{\circ} 02' 25''$, con una altitud de 2,490 msnm en su parte norte, hasta 2,060 msnm donde se encuentra la cabecera del municipio, según la Enciclopedia de los Municipios de México, 2005 (figura 27). El municipio está situado sobre las faldas de los cerros La Cantera y La Malinche. Topográficamente, el 35% del territorio presenta zonas semiplanas con pendientes de 5% a 15%, las cuales se ubican hacia el norte y el sur. Además se localizan terrenos con pendientes mayores al 25% en la Peña Colorada, cañada de El Salto y los cerros Tepetzingo y Santa Cruz. Las zonas más planas con pendientes menores a 5%, comprenden a la mayor parte de las localidades integradas en el centro de población.

Figura 27. Ubicación geográfica de Tenancingo, Estado de México.



Fuente: Enciclopedia de los Municipios de México, Estado de México, 2005.

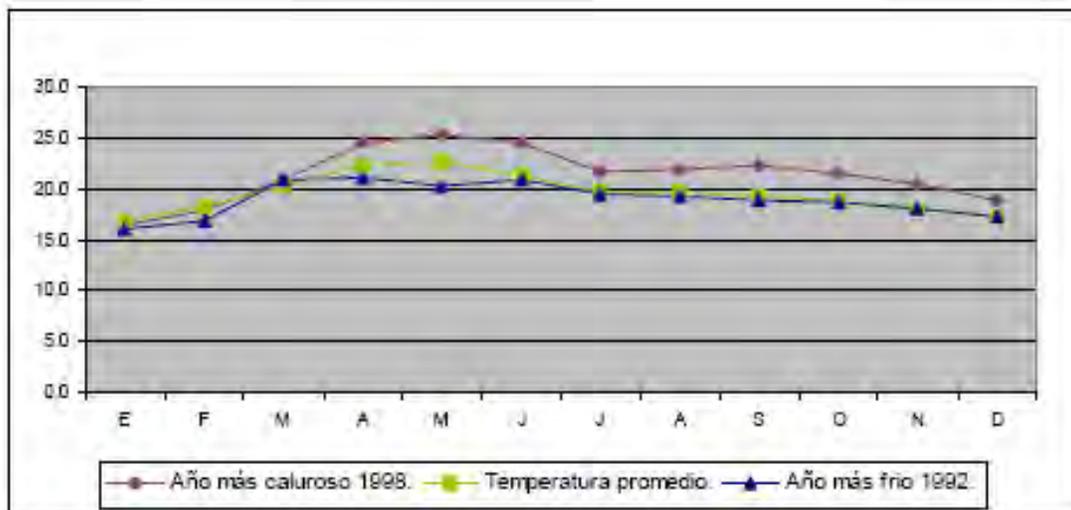
3.4.2. Características Climáticas

El clima que se presenta en el municipio es C (w), templado húmedo con lluvias en verano (Enciclopedia de los Municipios de México, 2005). La radiación solar que recibe el municipio es de 400 a 450 calorías/cm²/día, porque en latitudes de 20° norte, la duración del día oscila entre 10 y 13 horas a lo largo del año, según explica Torres

Navarro (2007) en cuanto a la cantidad de radiación solar que se recibe en cada una de las regiones del país.

La temperatura promedio que se presentó de 1979 a 1998, fue de 19.6 °C (gráfica 1). La media anual del año más frío (1992) fue de 19.1 °C y la del año más caluroso (1998) fue de 21.4 °C, datos que reporta la estación meteorológica Coatepequito en el Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Tenancingo, 1997-2000.

Gráfica 1. Temperatura promedio



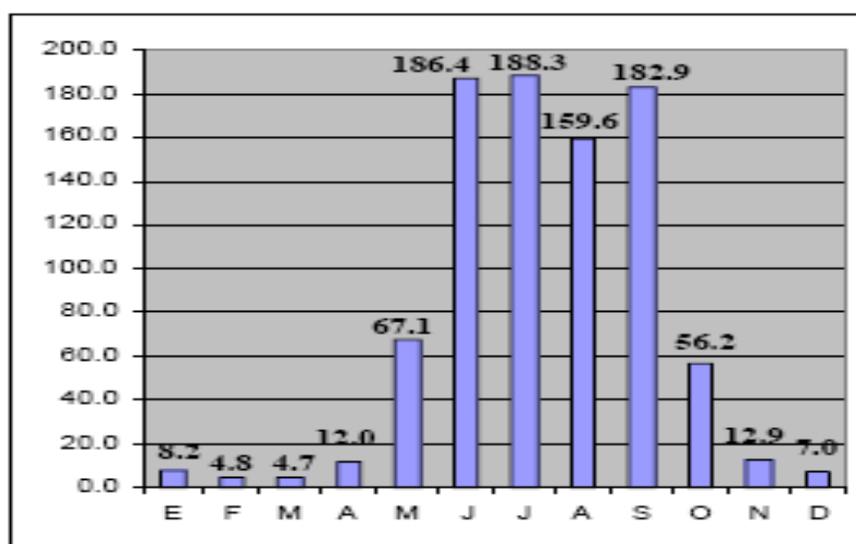
Fuente: Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Tenancingo, 1997-2000.

La precipitación promedio que se presentó en el periodo 1979 a 1998 fue de 889.5 mm (gráfica 2). La máxima incidencia de lluvias se presenta en los meses de junio, julio, agosto y septiembre. La precipitación del año más seco (1983) fue de 639.3 mm y la del año más lluvioso (1991) fue de 1,132.6 mm (Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Tenancingo, 1997-2000).

Se presenta una humedad relativa baja en primavera, aproximadamente entre 30% a 40%; en verano de regular a alta, entre 50% a 95% y en otoño e invierno es intermedia (Cabezas, 2002).

De acuerdo con la regionalización eólica de la CFE el municipio se encuentra en la zona 5 y presenta vientos máximos de 80 km/h provenientes del norte.

Gráfica 2. Precipitación promedio



Fuente: Enciclopedia de los Municipios de México, Estado de México, 2005.

3.4.3. Características Edáficas

Según el Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Tenancingo, 1997-2000, la constitución litológica del municipio y el tipo de clima determinan la presencia de siete tipos de suelo en los que domina el Vertisol pélico, Feozem háplico y el Andosol húmico. Con base en la carta de suelos (cuadro 2), se puede indicar que existen las siguientes unidades de suelo:

Cuadro 2. Tipos de suelo

TIPO DE SUELO	DESCRIPCIÓN
$\frac{Vp + Hh}{3}$	VERTISOL PÉLICO ASOCIADO A FEOZEM HÁPLICO, DE CLASE TEXTURAL GRUESA.
$\frac{Hh + l}{2L}$	FEOZEM HÁPLICO ASOCIADO A LITOSOL DE CLASE TEXTURAL MEDIA QUE PRESENTA UNA FASE LÍTICA ENTRE 10 Y 50 CENTÍMETROS DE PROFUNDIDAD
$\frac{Hh + Be + Re}{2L}$	FEOZEM HÁPLICO ASOCIADO A CAMBISOL CRÓMICO Y A REGOSOL EÚTRICO, DE CLASE TEXTURAL MEDIA, QUE PRESENTA UNA FASE LÍTICA ENTRE 10 Y 50 CENTÍMETROS DE PROFUNDIDAD.
$\frac{Th + To + Hh}{2}$	ANDOSOL HUMÍCO ASOCIADO A ANDOSOL ORTICO Y A FEOZEM HÁPLICO DE CLASE TEXTURAL MEDIA.

Fuente: INEGI, carta edafológica de Tenancingo, escala 1:50,000.

El Vertisol pélico es un suelo muy arcilloso que presenta grietas anchas y profundas en época de sequía y con la humedad se vuelve pegajoso, es de color negro o gris oscuro

y casi siempre muy fértil, pero su manejo ofrece ciertas dificultades ya que su dureza dificulta la labranza, además presenta problemas de inundación por mal drenaje. Para el crecimiento urbano también presenta limitantes por el proceso de expansión-comprensión al que se ve sujeto dependiendo de las condiciones de humedad. Este tipo de suelo se localiza al sureste de la cabecera municipal, donde se ubican las localidades de la Ciénega, San Isidro, en las orillas de la carretera que va hacia San José Tenerife, Cruz Vidriada y San Nicolás.

El Feozem háplico se caracteriza principalmente por su capa superficial oscura y suave, rica en materia orgánica y nutrientes. Desde el punto de vista económico, en la agricultura pueden servir para cultivos de riego y de temporal, en el caso de Tenancingo, estos suelos se encuentran en laderas o pendientes, por tanto pueden aprovecharse para el pastoreo o la ganadería. Este suelo se ubica al este cabecera municipal, a su vez se encuentra en las comunidades de San Diego, el Salitre y en la zona oeste de Atotonilco. El potencial que tiene para uso urbano es apto, sin embargo, se deben analizar a fondo las condiciones topográficas del terreno, debido a que son susceptibles a la erosión eólica y pluvial, lo que implica peligro por deslaves.

El Cambisol crómico es un suelo joven, poco desarrollado que se caracteriza por su color rojizo o pardo oscuro y por tener una alta capacidad para retener nutrientes. El suelo antes mencionado se sitúa principalmente al norte, al noroeste y al noreste de la cabecera municipal, y en las inmediaciones de las localidades de Rinconada de Santa Teresa y Rinconada de Atotonilco. Su potencial económico se concentra en la actividad agropecuaria, ya sea por medio de pastos naturales, inducidos o cultivados; en tanto que para la agricultura tiene vocación para cultivos de granos, pero es susceptible a la erosión, para usos urbanos tiene aptitud, presenta en términos de desarrollo urbano las mismas características que el Feozem Háplico.

El Litosol es un suelo con menos de 10 cm de profundidad, limitado por roca, tepetate o caliche duro. Respecto a su uso agrícola, esta condicionado por la presencia de abundante agua, en caso contrario se erosionan, por la naturaleza rocosa de la zona, tiene poco horizonte de excavación, de tal forma que su vocación para uso urbano se encuentra condicionada por la pendiente y la tipo de roca, debido a que los costos de introducción de infraestructura se elevan. Esta unidad edafológica se halla

especialmente al oeste de la cabecera municipal, y se conforma como una franja a lo largo del río Tenancingo hacia el sur hasta llegar al municipio de Zumpahuacán.

El Regosol eútrico es un suelo formado por material del aluvial reciente, como dunas, cenizas volcánicas o playas. No presenta capas distintas, frecuentemente es somero y pedregoso. En usos agrícolas, su fertilidad está condicionada a su profundidad para el caso particular del municipio tienen potencial para cultivarse granos y para usos forestales, el grado de erosión que pueden ser objeto es variable de acuerdo a la vegetación existente. Estos suelos no son aptos para el desarrollo urbano. Representan una mínima parte, y se localiza al sur de la comunidad de Pueblo nuevo y al este del Cerro de Santa Cruz.

El Andosol húmico y el Andosol órtico son suelos derivados de cenizas volcánicas, muy ligeros y con alta capacidad de retención de agua, el primero tiene una capa superficial oscura o negra, rica en materia orgánica, pero muy ácida y pobre en nutrientes, el segundo presenta una capa superficial clara, pobre en nutrientes.

El suelo más abundante es el andosol, el cual soporta la cubierta forestal, hacia el sureste del municipio se encuentra el feozem que es apto para la agricultura.

3.4.4. Actividades Agropecuarias

La ubicación geográfica de Tenancingo, así como su potencial de recursos naturales ha configurado una actividad agrícola creciente, orientada fundamentalmente durante la última década a la producción de flor altamente especializada, para el mercado regional, nacional y de exportación. En el censo ejidal y ganadero se tienen identificadas 4,294 unidades de producción agropecuaria, que destinan su superficie a la producción de flor, legumbres, cereales, frutas y forrajes. El potencial del sector agropecuario para detonar el crecimiento económico del municipio se ve disminuido por factores como la escasa tecnificación que se observa todavía en grandes extensiones en cultivos como la flor y a la carencia de programas de asesoría técnica, que permitan aumentar la competitividad de esta actividad.

Tradicionalmente la actividad comercial ha sido importante. Por su posición geográfica Tenancingo ha funcionado como un centro de intercambio comercial entre

los municipios de Malinalco, Joquicingo, Villa Guerrero y Zumpahuacán. Sin embargo, la infraestructura para la comercialización es muy limitada. Sólo se cuenta con un mercado municipal con 200 locales con un alto nivel de deterioro. Asimismo, los días jueves y domingo se instala el tradicional tianguis, lo que agrava los problemas de saturación en la zona. El rastro municipal de igual forma presenta altos niveles de obsolescencia y es insuficiente para dar atención a la demanda, lo que fomenta el sacrificio clandestino. Además funciona un mercado de ganado ubicado en un predio rentado sin infraestructura donde la intervención del H. Ayuntamiento se reduce a la recaudación de los derechos por la facturación a terceros que intervienen en las transacciones comerciales

También se encuentra en construcción un mercado para la comercialización de la flor, pero cuyo proceso constructivo ha sido tan lento (lleva 6 años), que el proyecto ya resulta insuficiente para dar atención a la demanda de espacios tanto de los productores del municipio, como de los de municipios de Villa Guerrero, Coatepec Harinas, Ixtapan de la Sal, Zumpahuacán e inclusive del estado de Puebla (Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Tenancingo, 1997-2000).

Uso actual del suelo

El municipio de Tenancingo ocupa una superficie de 16,020 has, de las cuales se distribuyen en usos agrícola, pecuario, urbano, forestal, erosionado, cuerpos de agua, y otros usos. El uso agrícola es el de mayor extensión territorial, ocupa una superficie de 8,662 has y representa el 54.06% del total municipal, en las cuales se siembra principalmente el maíz grano, avena, avena forraje, fríjol, hortalizas y flores.

La agricultura se practica en una extensión de 6,129 has, que representan el 38.2% del territorio municipal, dentro de esta actividad destaca la producción de flor tanto por su importancia económica como por la extensión destinada a su cultivo: 2, 145 has que representan el 35% de las destinadas a este uso.

3.4.5. Infraestructura para la producción

Infraestructura Hidrológica

Según el Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Tenancingo, 1997-2000 el municipio forma parte de la Región Hidrológica número 18, denominada “Río Balsas”,

cuenca Río Grande de Amacuzac (18F). Cuenta con 22 manantiales, 21 arroyos de corriente intermitente, 7 acueductos y un río de corriente permanente denominado río Tenancingo, que en sus orígenes es llamado río Tenango, y nace en los manantiales que existen en el pueblo de San Pedro Zictepec perteneciente al municipio de Tenango del Valle, corre hacia el sur hasta pasar al norte de la escuela normal de Tenería, donde se desvía hacia el sur pasando por la ciudad de Tenancingo; continua su cauce hacia el sur pasando al oeste por las localidades de La Merced y San Jerónimo, después penetra por la abarranca de San Gaspar con el nombre de río San Jerónimo; posteriormente se pierde en los terrenos de el Resumidero y sigue un cauce subterráneo a través de las grutas de Cacahuamilpa, para salir a la superficie en el Estado de Guerrero donde se convierte en afluente del río Balsas.

El escurrimiento superficial más importante en el centro de población es el arroyo San Simonito, su cauce se ubica al sur del centro de población, fluye en dirección poniente y sobre él se encuentra una caída de agua denominada “El Salto” de unos 25 metros de altura. Este arroyo junto con su afluente El Salado, presentan un alto nivel de contaminación debido a que la red de drenaje del centro de población y de la industria PROQUIFIN vierten sus desechos en ellos sin tratamiento previo.

En la localidad de Chalchihuapan, ubicada al norte del centro de población, existe una presa llamada Ahuehuete, que funciona como vaso regulador del sistema de escurrimiento del pozo de San Juan Tetitlán y como área recreativa para la población local, presenta un bajo nivel de contaminación, a sus alrededores se ubica una de las zonas de asentamientos irregulares, y es frecuentado por la población local para uso recreativo y de esparcimiento.

En la localidad de La Cienega existe otro cuerpo de agua (jagüey), cuyas aguas son utilizadas para irrigar parcialmente algunas parcelas, presenta un alto nivel de asolvamiento, casi el 100 % está cubierto por lirio acuático y tule, también a su alrededor se ubica una de las zonas de asentamientos irregulares, la cual está prácticamente consolidada.

En la cabecera municipal el abastecimiento de agua potable se realiza, principalmente, a través de los manantiales de Monte de Pozo y Atotonilco, ubicados en la sierra Peña

Colorada y de los pozos Alameda ubicado en el parque del mismo nombre y del pozo Acatzingo IV localizado al sur de la cabecera municipal. Aprovechando la geografía, las características del suelo y la infraestructura natural de los mantos freáticos, lagos, ríos y manantiales, la mayoría de la población se abastece de pozos artesianos, aprovechando la poca profundidad del nivel freático.

Vías de comunicación

Según el Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Tenancingo, 1997-2000 el municipio cuenta con 95 km de carreteras, de las cuales 11 son federales y 44 estatales pavimentadas, 11 estatales revestidas y 28 caminos rurales. A través de ésta red de vías de comunicación, Tenancingo tiene interrelación directa con las poblaciones de Zumpahuacán, Villa Guerrero, Tonicato e Ixtapan de la Sal, Coatepec Harinas, Tenango del Valle y principalmente con las ciudades de Toluca y México D. F.

Detallando esta red de vías de comunicación, el área urbana de Tenancingo está comunicada al norte con el municipio de Tenango del Valle y Toluca a través de la carretera federal No.55, esta entronca con la Avenida Los Insurgentes, es de doble sentido y cuenta con dos carriles para cada uno. Al oeste el centro de población mantiene un enlace directo con Villa Guerrero e Ixtapan de la Sal, a través del entronque de la carretera Villa Guerrero-Ixtapan con la Avenida Hidalgo. Al suroeste el área urbana se comunica con el municipio de Zumpahuacán a través de la carretera Tenancingo-Zumpahuacán, la cual entronca con la Avenida Paseo de los Insurgentes.

3.5. Antecedentes y estudios técnicos de la producción de chile manzano

En los últimos diez años se ha mostrado un interés creciente en el estudio del chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.), también debido a la creciente demanda de este tipo de chile en México y en los Estados Unidos de América. En particular, en México se ha desarrollado un sistema de producción intensivo para su cultivo, con el fin de obtener un producto que garantice cantidad, calidad y oportunidad para productores y consumidores.

En México se cultivan unas 1,500 has de chile manzano, que posee ciertas particularidades como su forma y apariencia que lo hacen atractivo para el consumidor,

por lo que incluso se exporta. El cultivo se localiza en la sierra norte de Puebla; en Coatepec de Harinas, Estado de México; en Zongolica, Veracruz, y en Tacámbaro, Michoacán (Antonio¹, 2006).

El chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.) es el único tipo de chile que se cultiva en la zonas templadas y frías de México; esta planta se caracteriza por tener semillas negras rugosas y las hojas peludas, crece como arbusto grande y puede llegar hasta los 3 m, su fruto es esférico, verde en estado tierno y va adquiriendo tonos de rojo, amarillo y naranja al madurar. Se considera una planta perenne ya que existen huertas de hasta 10 años de antigüedad, el periodo de producción estimado es entre 5 y 7 años aproximadamente (Consejo Nacional de Productores de Chiles, S.C., 2007).

Es originario de las zonas altas de Sudamérica, principalmente de Bolivia, Perú y Chile. No se tienen detectadas variedades y existe una variedad considerable de fenotipos. En México se introdujo a principios del siglo XX y actualmente se cultivan variedades criollas heterogéneas, adaptadas a altitudes de entre 1700 y 2400 m (Pérez y Castro, 1998). En estas poblaciones los frutos varían ampliamente en su color, forma y tamaño; los frutos amarillos y con forma de manzana (3 a 4 lóculos) son preferidos a los anaranjados o rojos o con forma de pera (1 a 2 lóculos).

El chile manzano es cultivado en condiciones de temporal. En consecuencia la producción se concentra en los meses de agosto a diciembre. Los máximos precios del fruto se alcanzan de febrero a junio. Una alternativa de producción para alcanzar los precios altos es la producción intensiva (Pérez, 2007).

El sistema de producción intensivo propuesto para los valles altos de México, se caracteriza por el cultivo en invernadero con fertirrigación, con control de la radiación en alta densidad de población (20,000 plantas/ha) y las plantas individuales crecen en macetas con tezontle rojo como sustrato. En contraste, el cultivo en campo abierto se lleva a cabo en baja densidad de población (3,000 plantas/ha), sin control de la nutrición, plagas o enfermedades. Aunque se controla parcialmente la incidencia de radiación mediante la asociación con árboles avejentados de aguacate (*Persea americana* Mill) y durazno (*Prunus persica* L.), que sombrean a las plantas de chile manzano, en campo abierto el rendimiento de fruto es bajo (7 a 8 t/ha), y su calidad también es baja.

Los climas idóneos para el desarrollo del chile manzano son los de transición, es decir, aquellas zonas de sombra donde se mezcla el aire caliente con el viento frío, es por ello que en campo abierto se le siembra bajo la sombra de árboles como el pino, aguacate o durazno. La temperatura óptima para su crecimiento se encuentra entre los 18° y 20°C, por eso cuando se cultiva en invernadero debe emplearse un plástico lechoso que proporcione 50% de sombra a las plantas (Antonio, 2008).

Una vez que se realiza la siembra en charolas, la planta tarda en emerger entre 7 y 10 días. Cuando tiene dos hojitas se mantienen en la charola (de 200 cavidades) y luego se pasa a vasos cafeteros del número 2 y se trasplanta. Cuando alcanza 8-10 hojas verdaderas ya se traspasa a la maceta en el invernadero. Este proceso dura 70 días. El primer corte se realiza a los cinco meses, se obtiene la primera cosecha y después se mantiene floreciendo y produciendo dos años.

Cada semana se hace un corte y al mes se obtiene en promedio una tonelada, en 1,500 m. Hay una distancia de 1.60 m entre surcos y 50 cm entre plantas, con 1,800 plantas en 1,500 m². Si eso lo traspolamos a una ha tenemos una producción de 65 a 80 t/ha al año. La ventaja es enorme, porque a campo abierto lo máximo que se produce son 15 toneladas, con un promedio nacional de siete a ocho toneladas.

El problema de este cultivo es que si llega a haber heladas la planta muere; además, hay un hongo (*Phytophthora capsici*) que daña particularmente a este cultivo, es semiacuático y se puede presentar cuando hay mucha humedad relativa o constante en el sustrato, lo cual propicia el desarrollo de la enfermedad y la muerte de las plantas (Antonio¹, 2006).

El sistema intensivo de producción de chile manzano en invernadero trata de evitar que esto suceda, ya que existe un sustrato limpio (tezontle), el agua contiene una solución nutritiva adecuada y se emplean pequeñas macetas para evitar el contacto con el suelo a fin de proteger a la planta del hongo, para lo cual adicionalmente se le coloca un poco de cal que modifica el pH, la hace más alcalina y ya no crecen hongos.

Los invernaderos cuentan con sus mallas antiáfidos para que no penetren las mosquitas o mariposas grandes que provocan gusano. La cubierta plástica deja pasar el 50% de radiación, lo cual permite la máxima fotosíntesis y la hoja se pone activa. Por

ejemplo, si afuera hay unos 1,500 μ moles de radiación adentro disminuye a una tercera parte.

La calidad del fruto en invernadero es superior en comparación con campo abierto, ya que cuando llega al mercado va limpio y uniforme, en tanto a la intemperie está sujeto al temporal y si la lluvia es irregular se presenta fluctuación en el contenido de agua, por lo que al fruto le crecen pequeñas costras, debido al rompimiento de la epidermis del fruto por esas fluctuaciones de agua. Cuando se cosecha el fruto por ahí penetran los hongos y las bacterias y se pudre más rápido, por lo que tiene poca vida poscosecha. En cambio en invernadero puede durar 15 a 20 días sin refrigeración (Antonio¹, 2006).

Costos de producción

El costo de producción por kg es de cinco pesos. El precio más bajo al que se comercializa el kg ha sido de seis pesos y el más alto de 40 pesos. Los precios más altos al productor se alcanzan de febrero a mayo y llegan hasta 60 pesos, es cuando a campo abierto hay muy poco, porque con el invierno la planta deja de florear y disminuye la producción. En agosto, septiembre y noviembre se incrementa la producción de temporal, con poca tecnología, y bajan los precios.

En un estudio realizado hace tres años por investigadores de la Universidad Autónoma Chapingo, se calculó que la relación costo-beneficio de cultivar chile manzano bajo invernadero era de 1 por 1.5, es decir, por cada peso invertido se obtienen 1.5 pesos, vendiendo en el mercado a 14 pesos el kg, como precio más bajo y a 30 pesos por kg, como precio más alto (Antonio, 2008).

Desarrollo del cultivo de chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.)

De acuerdo con Ramírez (1997) el cultivo de chile manzano requiere, para su desarrollo, las siguientes condiciones:

- Temperatura. La temperatura óptima para el desarrollo del cultivo del chile manzano se encuentra entre 16.2° y 21.5° C, la temperatura umbral mínima es de -4° C y la máxima es de 38° C.
- Luz. Dentro del género *Capsicum* el chile manzano es de los que requieren menos cantidad de luz, por lo que se desarrolla bien en lugares sombreados de un 70% hasta

antes de la floración, y un 30% después de la misma. Un sombreado total provoca alargamiento de entrenudos retrasando la floración. Para que el desarrollo de la planta sea adecuado se necesita de 8 a 12 horas de luz al día.

- Humedad. El cultivo de chile manzano si se le proporciona humedad adecuada (70 %), puede estar en producción durante todo el año.

- Suelo. Se ha encontrado que el chile manzano se desarrolla en diferentes tipos de suelo como son: andosoles, luvisoles, feozem, cambisoles, regosoles y acrisoles. Las texturas van desde finas hasta gruesas.

3.5.1 Proceso de producción

De acuerdo con Pérez y Castro (1998) el proceso de producción de chile manzano es el siguiente:

Producción de plántula

Antes de llevar a cabo la siembra es conveniente remojar la semilla en agua simple durante 12 a 24 horas para reblandecer la testa y la germinación ocurre en aproximadamente 12 días. También puede darse un tratamiento químico con soluciones de ácido sulfúrico o ácido giberélico (Activol) en concentración de 200 a 300 ppm. Es recomendable aplicar 10 g de Captán por kg a la semilla para prevenir el posible daño de enfermedades fungosas. Las charolas recomendables para la producción de plántulas son las de 200 cavidades, hasta cuando las plántulas tengan cuatro hojas verdaderas. Posteriormente deben ser trasplantadas a vasos de unicel del número ocho.

El sustrato que ha dado mejores resultados para producir plántula es una mezcla de turba (Growing Mix no. 2, Phyto plant y Peat Moss) y agrolita, en proporción 3:1 v/v. También pueden emplearse mezclas de tierra de monte con agrolita y es conveniente hacer una desinfección del sustrato. Durante la fase de de plántula debe mantenerse un 80% de humedad en el sustrato.

En la fase de almácigo es necesario proporcionar un 70% de sombra, lo cual se logra colocando malla sombra oscura del 70% o bien plástico negro de calibre 200, colocado a 1 m de altura sobre el nivel de las plantas.

Cuando las plántulas son pequeñas se les debe aplicar un fertilizante como el producto comercial Petter plus (9-5-5 y microelementos). Este se mezcla 1 g L de agua y se aplica cada tercer día. Esta fertilización debe complementarse con la aplicación de algún foliar (Bayfolan forte, Nitrofoska, Greenzeet o Grogreen) disueltos en agua.

Preparación del suelo

La preparación del suelo es como la de cualquier cultivo anual. El tamaño de cepas recomendable es de 20 cm cada lado (ancho, largo y profundidad). Para disminuir el riesgo de daño por ataque de nematodos y otras plagas del suelo como el gusano de alambre y la gallina ciega, se debe desinfectar el suelo aplicando 5 g de un insecticida nematocida, como el carbofurán o terbufos en el fondo de la cepa.

En invernadero de forma intensiva, cuando el cultivo se produce en macetas, en el fondo de éstas debe colocarse una capa de tezontle que ocupe como máximo un tercio de su volumen y el resto debe llenarse con una mezcla compuesta de suelo, agrolita y turba o de tierra de monte en proporción 1:1:1.

Trasplante

Las plántulas deben trasplantarse cuando presenten 12 hojas verdaderas o cuando aparezca la primera bifurcación en el tallo, lo cual ocurre aproximadamente a los 70 días después de la siembra.

Fertilización

Debe aplicarse una solución nutritiva a través del sistema de riego por goteo. La solución nutritiva se prepara con los fertilizantes y en el orden en que se presentan en el cuadro 3.

En los primeros 20 días después del trasplante aplicar la solución nutritiva diluida en una concentración de 25%; durante los siguientes 30 días debe aumentarse su concentración a 50%; en los siguientes 50 días será de 75% y el resto del ciclo aplicarla al 100%. Los riegos deben aplicarse de manera independiente a la solución nutritiva. En los primeros 20 días a cada maceta debe aplicarse 0.5 L de agua en dos riegos y 250 ml de solución nutritiva; en los siguientes 30 días será de 1.0 L de agua en dos riegos y 1.0 L de solución nutritiva; posteriormente, durante los siguientes 50 días aplicar 1.0 L de

agua y 1.5 L de solución nutritiva; finalmente, aplicar 1.0 L de agua en tres riegos y 2.0 L de solución nutritiva y mantenerlo así por el resto del ciclo.

Cuadro 3. Cantidad de fertilizantes utilizados para preparar 1,000 litros de solución nutritiva

Fuente	Cantidad
Ácido fosfórico 70%	100.0 ml
Sulfato de potasio	870.0 g
Sulfato de magnesio	1,230.0 g
Nitrato de potasio	750.0 g
Nitrato de calcio	2,600.0 g
Sulfato ferroso	50.0 g
Sulfato de manganeso	5.0 g
Sulfato de zinc	2.0 g
Sulfato de cobre	2.0 g
Bórax	10.0 g

Fuente: Pérez y Castro, 1998.

Manejo de sombra

En invernadero las plantas deben distribuirse a medio metro de separación entre ellas y a un metro entre hileras, con lo que se obtiene una densidad de población de 20,000 plantas por ha. Bajo estas condiciones el sombreado puede proporcionarse a través de una malla sombra de 50%, colocada durante los primeros 50 días del ciclo a 1 m de altura y después a 2.5 m sobre las plantas.

Riegos

La forma de proporcionar el agua y la solución nutritiva a las plantas es mediante el riego por goteo. El gasto de los goteros debe ser de 4.0 L/ha y las mangueras de 12 mm de diámetro.

Control de plagas:

Mosquita blanca (*Bemisia tabaci*). Debe hacerse un control integrado que consiste en colocar cintas de polietileno amarillo a medio metro de altura alrededor del cultivo e impregnarlas con un adherente que puede ser aceite comestible, grasa transparente o el producto comercial Biotac, también se puede realizar la aplicación de extractos de plantas como el producto conocido como Protek a razón de 2.0 ml/L de agua. Una opción más de controlar mosquita blanca es aplicar Confidor (*Imidaclopril*) a razón de 1.0 ml/L de agua, en el cuello de la planta a los 10 días después del trasplante.

Pulgón (*Mysus persicae*). Ataca durante todo el ciclo del cultivo. Para su control deben hacerse aplicaciones de insecticidas sistémicos de diferentes grupos toxicológicos y hacer aplicaciones del hongo *Bauveria sp.* que parasita esta plaga.

Frailecillo (*Macrodactylus mexicanus*). Se alimenta de las hojas de los cultivos. Su control se realiza con productos piretroides y organofosforados.

Gusano del fruto (*Heliothis zea*). Se alimenta de los frutos. Para su control se recomienda utilizar productos químicos a base de Metomilo y piretroides (permetrinas y cipermetrinas), que son de bajo poder residual, pudiendo cosechar los frutos después de tres días de la aplicación.

Araña roja (*Tetranychus sp.*). Esta plaga succiona la savia de las hojas y produce un manchado rojizo al inicio y posteriormente las hojas se vuelven amarillentas y se caen con facilidad. Para prevenir esta plaga se debe evitar las altas temperaturas y baja humedad relativa en invernadero y realizar aplicaciones de productos como el paratión etílico y Agrimec a razón de de 1.5 y 0.5 ml/L de agua, respectivamente.

Control de enfermedades:

Secadera del chile (*Phytophthora capsici*). Las prácticas culturales como levantar surcos, remover el suelo y aplicar riegos ligeros, juegan un papel muy importante para su control, incluso más que la aplicación de fungicidas.

Nemátodos (*Nacobus serendepitecus*). Se manifiesta como nodulaciones en la raíz. En ataques severos causan inicialmente un amarillamiento y después una marchitez que provoca la muerte. Para su control son necesarias las aplicaciones de productos insecticidas-nematicidas granulados al suelo, antes de trasplantar. Esta medida

preventiva debe complementarse con aplicaciones de carbofurán líquido a razón de 4.0 a 5.0 ml/L de agua, haciendo la aplicación al suelo de la planta a intervalos de 15 días.

Sistema de tutoreo

En campo el sistema de tutoreo consiste en colocar un par de varas a cada 2.5 m de distancia a lo largo del surco de las plantas y se colocan hilos de rafia a diferentes niveles a 20 cm de separación entre ellos. En invernadero es semejante a lo anterior pero se complementa con poda de brotes y ramas. Se conduce a la planta para hacer uso eficiente de la radiación disponible. Ésta práctica es fundamental debido a que los frutos se ubican en fitómeros. En cada orqueta o bifurcación se cuenta con una hoja y al menos un fruto. Dicha hoja tiene que estar con la radiación óptima para alimentar a dicho fruto.

Poda

La poda de los brotes y las ramas es necesaria, con el fin de evitar un crecimiento excesivo de la planta, así como para la calidad del fruto en tamaño y grosor del pericarpio. Esta actividad consiste en eliminar los tres primeros brotes debajo de la primera bifurcación del tallo principal y todas las ramas que salen arriba de la novena o décima bifurcación.

Cosecha

La cosecha inicia cuando los frutos adquieran el color característico del tipo de chile que se está cultivando (rojo, amarillo o naranja). Normalmente, se requieren 100 días de trasplante a cosecha.

IV. PROYECTO DE INVERNADERO

4.1. Ubicación

El terreno en el que se ubicará el proyecto se encuentra a un costado de la carretera Tenancingo-Malinalco en el km 8, por lo que se cuenta con la facilidad de llegar al centro de la cabecera, Tenancingo de Degollado, en 20 minutos. Debido a esta cercanía, el terreno tiene servicio de energía eléctrica para poder llevar a cabo las operaciones de los equipos necesarios; en caso de falla eléctrica se cuenta con una planta generadora de energía eléctrica a partir de gasolina. También por la cercanía a la cabecera municipal, es de común acceso el servicio de agua potable, pero además el lugar cuenta con tres pozos de entre cuatro y cinco m³ cada uno. Al establecer la estructura del invernadero, el terreno destinado debe estar delimitado y nivelado para poder llevar a cabo su instalación sin inconvenientes.

Las condiciones ambientales, se ajustan con la estación climática del S.M.N., de San Simonito, para lo cual, la tabla 5 muestra claramente datos elementales como la temperatura diaria y mensual, precipitación, entre otros elementos del clima necesarios para el diseño del invernadero que protegerá al cultivo.

Tabla 5. Datos de Normales Climatológicas 1971-2000

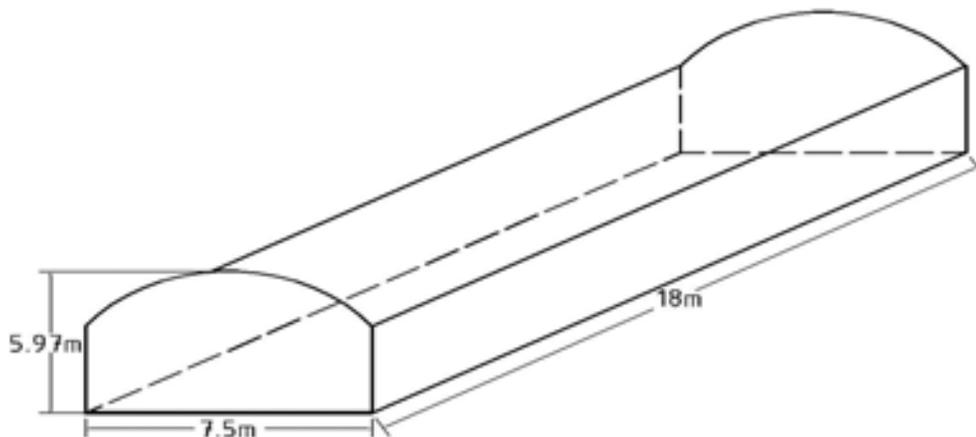
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
Temp. Máx.	20.5	21.7	23.1	25.3	25.1	22.8	21.9	21.7	22.5	21.2	21.4	21.1	22.4
Temp. Med.	11.7	12.7	13.7	15.5	16.4	16.6	15.6	15.4	16.1	14.3	13.3	12.5	14.5
Temp. Mín.	2.8	3.6	4.2	5.7	7.7	10.3	9.4	9.1	9.7	7.3	5.2	3.8	6.6
Precip	8	6.9	10.5	35.7	72.4	225.7	206	253.1	209	97.1	26	10.5	1,160.9
Días lluvia	0.8	1.5	1.7	4.4	9.1	16.6	18.5	19.8	17.7	8.8	3	1.3	103.2
Grani zo	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0.1

4.2. Diseño del invernadero

En el diseño del invernadero para una producción familiar, se considera una superficie de 7.5 m de ancho por 18 m de largo, dándonos un total de 135 m² (figura 28). Con esta superficie se proyecta tener un manejo adecuado y controlado del cultivo y del invernadero en general, para posteriormente acceder a un invernadero de grandes dimensiones.

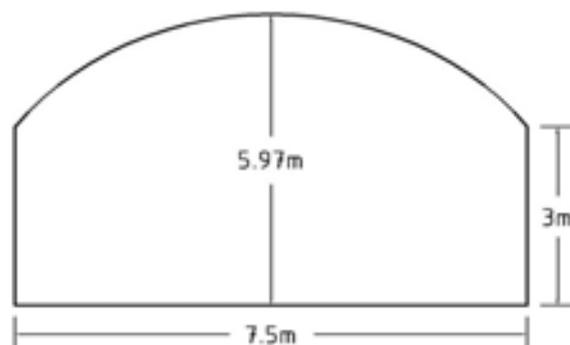
Por la presencia de vientos existentes en la zona que están en una época del año alrededor de 80 Km/hr, es necesario utilizar un invernadero tipo túnel, sin embargo, estos disminuyen áreas de trabajo en las partes laterales además de ser muy calientes, por tanto se considera que un tipo túnel modificado, cubre las expectativas, que disminuyan la acción del viento sobre la estructura e incrementen la superficie aprovechable de producción y obtener buena ventilación. Asimismo, la proyección a futuro es el crecimiento de la estructura de producción, de tal forma, el invernadero de tipo túnel modificado permite aumentos consecutivos tanto a lo largo como a lo ancho.

Figura 28. Dimensiones: largo, ancho y altura



La altura del invernadero se ajustará conforme al sistema de producción del chile manzano, considerando colocarlo en tutorado a una altura máxima de 2.5 m, por tanto, la altura cenital será comprendida a 5.97 m (figura 29), dejando la trabe de carga y largueros a 3 m a partir de la superficie del suelo; con esto se logra obtener una cumbrera con suficiente espacio para el movimiento del aire

Figura 29. Dimensiones: ancho y altura



Siguiendo las recomendaciones de Pérez (2007) para el acomodo del cultivo, las plantas estarán en bolsas negras con capacidad de 8 L, con lo cual se tienen contenedores de 20 cm de diámetro y 26 cm de altura. En este punto se ha decidido que el sustrato más factible es arena de tezontle, debido a la accesibilidad y cercanía de una mina ubicada en Villa Guerrero.

Habrà una distancia de 95 cm entre hileras y de 50 cm entre plantas. Por el acomodo anterior, se tendràn dos pasillos laterales que seràn de 77 cm, y dos transversales de 85 cm. Con este acomodo obtendremos 6 hileras a lo ancho del invernadero, y en cada hilera a lo largo del invernadero, 24 plantas, lo que nos da un total de 144 plantas y una superficie de producción (àrea de crecimiento màs pasillos internos o hileras) de 96.98 m² (figura 30). Con tales cifras obtendremos aproximadamente 576 kg, ya que una planta puede producir alrededor de 4 kg, cosechando durante cuatro meses (Pérez, 1998).

4.3. Control ambiental dentro del invernadero

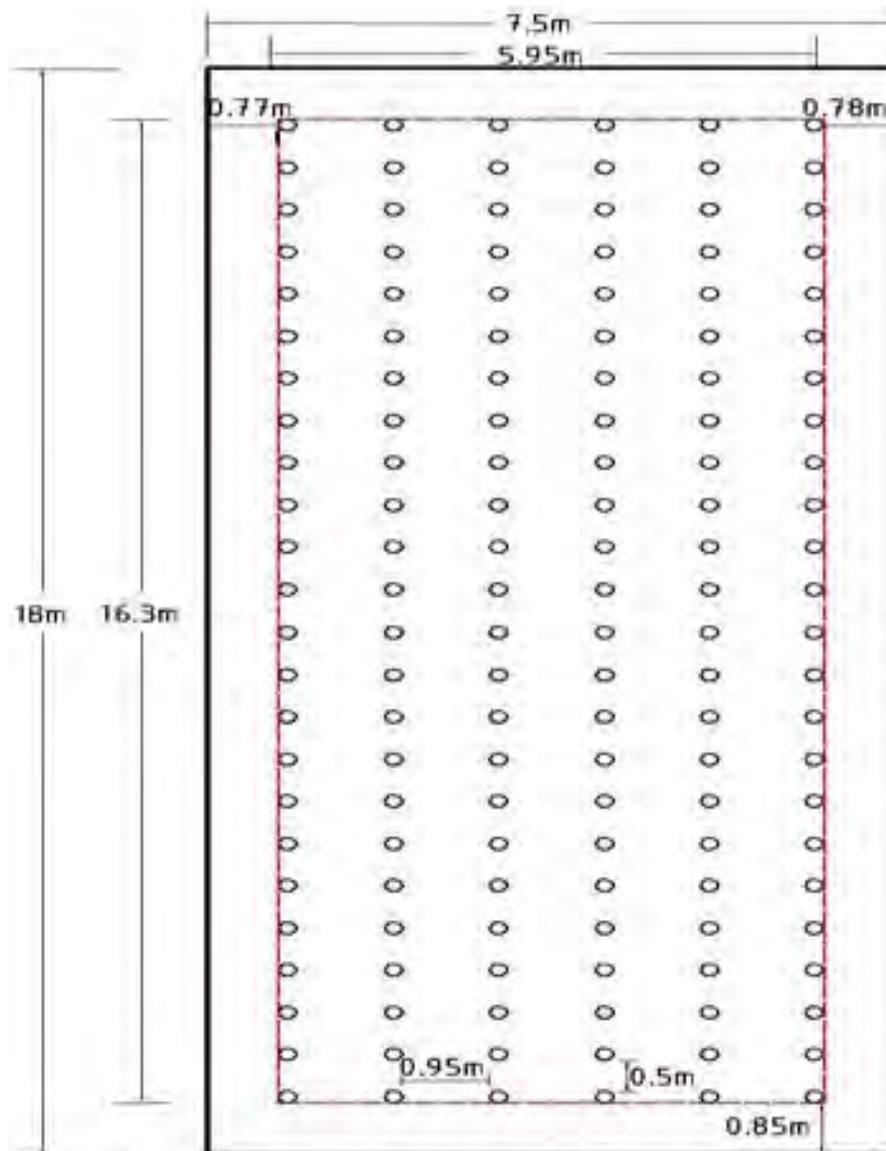
En este proyecto se enfatiza la idea de la factibilidad técnica, es decir, con los criterios de diseño para invernadero se puede hacer una estructura que permita producir chile manzano o cualquier otro cultivo; tomando en cuenta el lugar en el que se producirà, el tipo de cultivo y las condiciones climáticas.

Los principales factores que deben ser controlados con el manejo del invernadero son la luminosidad, la temperatura, la humedad ambiental y la concentración de CO₂. Estos

factores son interdependientes entre sí, y cuando se modifica uno de ellos los otros resultan afectados. Se realizará el monitoreo tanto de la temperatura y de la humedad relativa con un termómetro de máximas y mínimas y un higrómetro respectivamente.

También se llevarán a cabo distintas estrategias y prácticas agronómicas, con la finalidad de no utilizar equipamientos adicionales como calefactores, extractores, ventiladores, iluminación artificial y nebulizadores; lo cual permitirá no elevar el costo, a excepción del equipamiento del sistema de riego.

Figura 30. Acomodo del cultivo



4.3.1. Sistema de iluminación

Para el manejo luz, es necesario considerar dos aspectos: la calidad de luz que se refiere a los rayos de onda corta que son tomados para realizar procesos fisiológicos y biológicos en el cultivo, como la fotosíntesis, fototropismo, etc.; y la cantidad de luz que se refiere principalmente al número de horas-luz que un cultivo necesita.

Es importante considerar que en zonas templadas como ésta, se presentan primaveras calientes y secas con bastante insolación, lo cual puede generar desórdenes fisiológicos y problemas con ácaros en el cultivo.

Para el diseño del cultivo de chile manzano, se debe tomar en cuenta sus requerimientos en cuanto a radiación se refiere, se debe considerar que es un cultivo de media sombra y que en campo se establece bajo árboles como el aguacate. De tal forma, la producción intensiva de este cultivo se debe manejar un 50% de iluminación, para ello, con la finalidad de disminuir costos, solo se considera controlar la luz con el tipo de cubierta plástica, la cual debe reunir las siguientes características:

1. Transparencia: dejar pasar la luz.
2. Refracción: no dejar salir el calor.
3. Luz difusa: que distribuya la luz en todas partes y en todas direcciones dentro del invernadero.

Por tanto, se considera la utilización de un plástico opaco blanco difusor de alta dispersión de luz, con una transmitancia de luz del 50%, el cual también permite una buena difusión de luz para que no se generen sombras dentro del invernadero y la luz llegue, por consiguiente, a todas partes y en todas direcciones. Aunado a la utilización de plástico lechoso, con la finalidad de reducir el gradiente de intensidad de luz, es conveniente observar el comportamiento del cultivo y si fuese necesario, considerar la colocación de mallas sombras.

También es importante considerar el fotoperíodo del cultivo, siendo su necesidad óptima entre 8 a 12 horas luz, lo cual no tiene ningún problema en la región de Tenancingo, pues por su ubicación latitudinal se tiene en promedio de 10 a 13 h durante todo el año (ver tabla 2). Comparando este número de horas con el rango que necesita el

chile manzano de 8 a 12 h al día. Asimismo, con la finalidad de tener una buena iluminación, el invernadero será orientado conforme lo señala CENAMAR (1981), el cual recomienda que en latitudes Norte menores a 40°, el eje longitudinal de invernadero sea dirigido en dirección Norte-Sur, para tener un mejor aprovechamiento de la radiación solar en lo que se refiere a una mayor uniformidad de luz captada por el invernadero y así por el cultivo.

Por lo expuesto, la adecuada iluminación de un invernadero depende diversos factores como son la orientación y el material de cubierta; sin embargo, es importante la forma de la estructura del invernadero para aprovechar en mejor forma la incidencia de la luz; por ello, se considera que un túnel modificado permite una mayor uniformidad de la radiación solar, pues al contar con techo curvo, permite mayor captación de luz. Esta forma de invernadero recibe hasta un 85% del flujo luminoso de la luz total, y una fracción del 65% al 70% podrá pasar a través de la cubierta (ver figura 12).

Es necesario no olvidar el estado atmosférico del sitio donde se construirá el invernadero, particularmente el número de días con nublados, pues puede modificar la radiación solar transmitida al interior del invernadero, puesto que en un día despejado entra, tanto luz directa, como luz difusa del cielo, mientras que en días nublados sólo se presenta luz difusa. Para evitar esta situación se considera la colocación de ground cover color blanco, en los pasillos a manera de cubierta de suelo, con la finalidad de reflejar mayor luz en temporada lluvias, las cuales se presentan, en Tenancingo, durante el verano. De tal manera, se asegura una buena iluminación de las plantas en condiciones de alta nubosidad y, adicionalmente se proporcionará luz difusa en el envés de las hojas para aumentar la fotosíntesis.

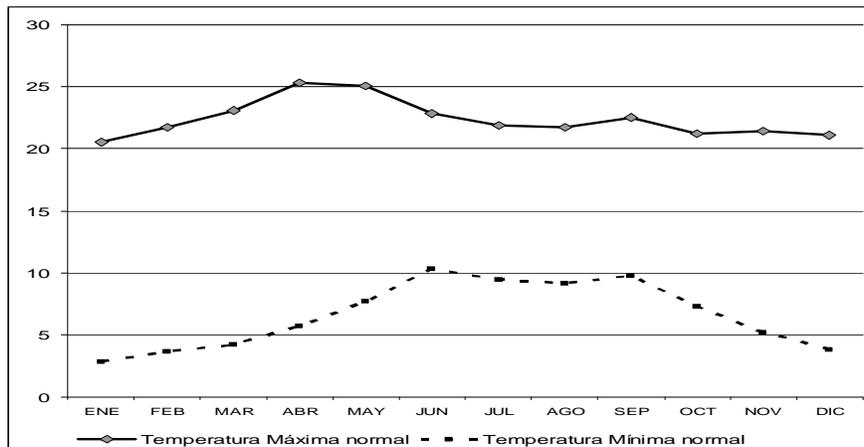
4.3.2. Sistema térmico

Dado que la temperatura ejerce gran influencia sobre el crecimiento y metabolismo de las plantas, es necesario su control dentro del invernadero, para tal fin es necesario tener un diseño de implementación de sistema de control de temperatura, el cual debe considerar los rangos reportados para el cultivo, siendo para el caso de chile manzano mínimas por arriba de -4°C y máximas por debajo de los 38°C; con una óptima en una oscilación entre 16.2°C y 21.5°C. Sin embargo, el chile manzano es una especie que

puede adaptarse a lugares fríos y tolerar heladas de baja intensidad, pudiendo florecer y fructificar entre 5°C y 15°C. Esta información indica que en el rango extremo por debajo de los 0°C hasta los 5°C, la planta soporta este ambiente frío pero sin producir y se corre el riesgo de perder el cultivo si no se tiene el cuidado necesario, de igual forma sucede en el otro extremo, en un ambiente con demasiada temperatura, cuando se llega un rango de 38°C y por arriba de este, la actividad de la planta decrece e incluso se empiezan a destruir tejidos enzimáticos, con la consecuente muerte de la planta.

Para el estudio de la temperatura en el control ambiental del invernadero se toma en cuenta el promedio de las temperaturas máximas y mínimas por mes que se presentan en el lugar, para esto se utiliza la información que reporta la estación meteorológica ubicada en San Simonito (gráfica 3), que es una población cercana al sitio donde se proyecta el invernadero.

Gráfica 3. Climograma: temperaturas máximas y mínimas normales por mes



Las temperaturas que se reportan tienen una máxima sobre 21° C, la cual es sostenible prácticamente todo el año, siendo marzo el mes que presenta una máxima de 25° C, las cuales no afectan al cultivo, pero al considerar la cubierta plástica existe un incremento considerable debido a la transformación de la radiación solar a unidades calor, por ello, se decide reducir la radiación solar con el uso de una cubierta de plástico blanco difusor que disminuya 50% la radiación solar y con ello disminuir la conversión de unidades calor dentro del invernadero.

Sin embargo, el uso de la cubierta no es suficiente para descender la temperatura diurna que se genere dentro del invernadero, por ello se llevará a cabo el manejo a través de ventilación, mediante la entrada de aire frío por medio de ventanas laterales y la salida del aire caliente con ventana cenital. A este respecto las ventanas se orientarán perpendicularmente a vientos provenientes del norte que son los dominantes en el sitio donde se ubicará el invernadero.

Si bien la ventana cenital no se recomienda para invernaderos menores de 20 m de largo, se implementará, para tener un mejor control de las variaciones térmicas en su interior, ya que el cultivo chile manzano al ser de porte alto, puede reducir el índice de ventilación hasta 30%, además la colocación de malla anti áfidos para controlar plagas, disminuye la ventilación hasta 80%, de tal forma, con la ventila cenital se asegura la liberación del aire caliente generado dentro del invernadero.

Se recomiendan anchos no mayores de 30 m, y que tales invernaderos tengan más de 25 % de área de ventanas con relación a la superficie cubierta, para garantizar las 30 a 90 renovaciones de aire por hora. De acuerdo a lo anterior, y considerando los 135 m² que se proyectan para este invernadero, se contará con 68% de ventilación distribuida entre ventanas laterales y cenital, que corresponde a 91.8 m², los cuales se dividirán entre laterales de 2 m de ancho por 18 m de largo (figura 31), dándonos en cada lateral 36 m² de ventana. La ventana cenital se ha considerado a 1.10 m de altura que, multiplicada por los 18 m de largo del invernadero, nos da un total de 19.8 m² (figura 32).

Figura 31. Ventilación lateral

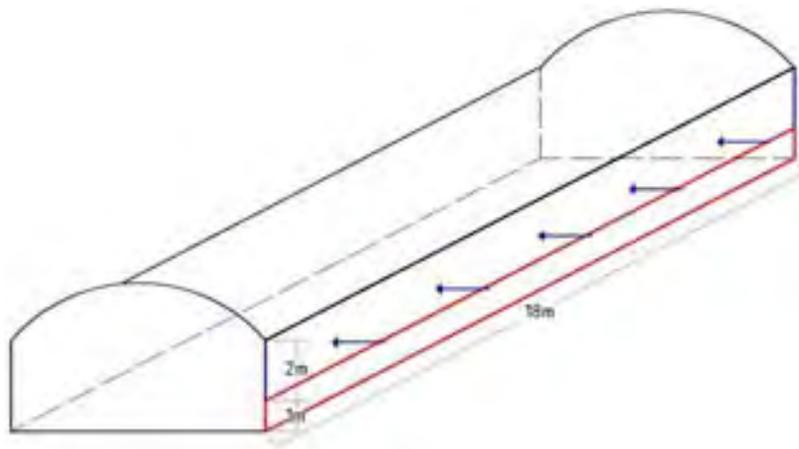
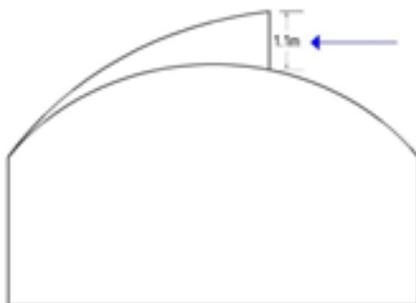


Figura 32. Ventilación cenital



Con 68% de ventilación se controla correctamente la temperatura en el interior del invernadero y además el exceso de humedad relativa, principalmente en la temporada de lluvias comprendida de junio a septiembre en el sitio, y se evita la reducción del CO₂. Tal reducción no debe pasar las 30 ppm respecto al contenido normal del aire, que es de alrededor de 350 ppm. De acuerdo a lo anterior, Bastida (2006) explica que la ventilación para reducir la temperatura, que suele tener tasas de 20 a 30 renovaciones por hora, suele ser suficiente para mantener niveles de CO₂ adecuados, ya que, a partir del 30% de área de ventanas, obtenemos de 30 a 90 renovaciones de aire por hora.

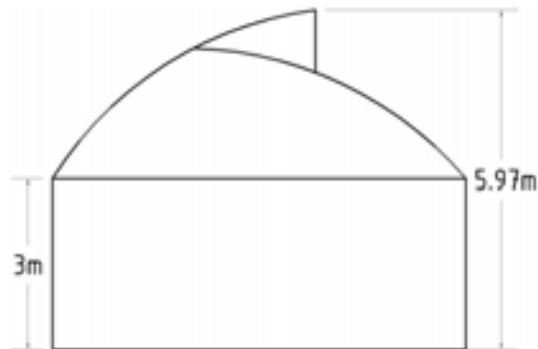
Uno de los mayores inconvenientes que se visualiza para la producción de chile manzano en la zona, en lo que se refiere al manejo de temperatura, es la mínima que se presenta mensualmente, siendo en promedio de 6.6°C, reportándose las temperaturas más bajas en diciembre, enero, febrero y marzo, con 3.8°C, 2.8°C, 3.6°C y 4.2°C respectivamente (gráfica 3), durante este periodo crítico el cultivo detendría su desarrollo y no produciría, se observa que estas mínimas afectarían al chile manzano aun cuando se sabe que puede soportar heladas de baja intensidad; los demás meses se presenta una temperatura mínima mensual por arriba de los 5°C, hasta los 10°C en junio.

Al considerar que el invernadero puede contar con un incremento de temperatura nocturna de por lo menos 5°C con relación a la exterior, se establece un rango térmico entre 7.8°C y 15°C durante el lapso de tiempo que se presentan las más bajas temperaturas, así que no existe inconveniente para el desarrollo del chile manzano, pero puede ocasionar una disminución de la producción por no contar con las óptimas referidas entre 16.2°C y 21.5°C; para contrarrestar las temperaturas bajas, la cubierta

plástica que se colocará será de polietileno térmico, para que evite al máximo la pérdida de calor. Durante el periodo crítico para el cultivo se colocarán plásticos negros de un metro de altura en las paredes internas, para que estos absorban más calor durante el día y que por la noche lo disipen, para que se mantenga el mayor tiempo posible una temperatura más elevada que la externa. Además se incluirá calefacción automática de bajo costo desde la última semana de noviembre hasta la primera semana de abril mediante 6 calentadores eléctricos de los que se utilizan para los hogares y se activan automáticamente a la temperatura deseada, estos se distribuirán de forma equidistante en el interior, dos en cada pared lateral y uno en cada pórtico (delantero y trasero).

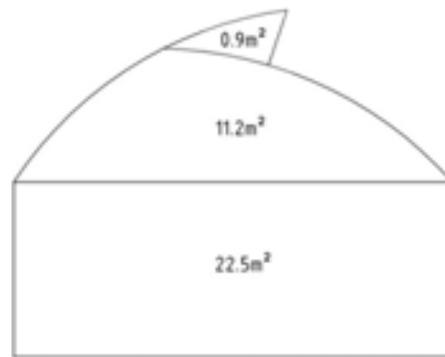
Por la forma del invernadero (figura 33), se obtendrá un mejor desplazamiento del aire caliente y de la humedad relativa, siendo mayor la dinámica entre aire frío y caliente en el interior, esto debido a la altura máxima del mismo que será de 5.97 m.

Figura 33. Altura máxima y altura de las columnas



El volumen total del invernadero se establece en más de 600 m^3 , lo cual se obtiene sumando las áreas del marco, arcos y ventila (figura 34): $0.9 \text{ m}^2 + 11.2 \text{ m}^2 + 22.5 \text{ m}^2 = 34.6 \text{ m}^2$ x 18 m de largo = 622.8 m^3 . A este respecto Jiménez (1999), nos refiere que la relación volumen/superficie para considerar la estabilidad térmica del invernadero debe estar entre 2.75 a $3 \text{ m}^3/\text{m}^2$ o más, en este caso tenemos $622.8 \text{ m}^3/135 \text{ m}^2 = 4.61 \text{ m}^3/\text{m}^2$, en esta relación obtenemos un valor mayor al referido, el cual permite una mayor estabilidad térmica en el invernadero.

Figura 34. Área del marco, arco y ventila cenital del invernadero



4.3.3. Sistema de humedad

El requerimiento de humedad para la producción de chile manzano, debe cuidarse de forma adecuada durante todo el ciclo de producción; de tal forma hay que considerar que en el sitio del proyecto se cuenta con una humedad relativa baja en primavera, aproximadamente entre 30% a 40%; en verano de regular a alta, entre 50% a 95%; y en otoño e invierno se mantiene entre 60% y 70%, lo cual es apropiado para el cultivo. Sin embargo, en primavera, es necesario incrementarla, lo cual se logrará por medio del uso de aspersión de agua en el piso de los pasillos.

Por otra parte, para resolver la alta humedad relativa debida a las lluvias que se presentan en verano, se controlará mediante la ventilación lateral y cenital, aparte de revisar constantemente la humedad del sustrato de junio a septiembre, pues se pueden presentar problemas fitosanitarios, particularmente de tipo fungoso, de las cuales la conocida como secadera del chile (*Phytophthora capsici*) es la más importante, siendo favorecida por el exceso de sombra y alto contenido de humedad en el suelo y en el ambiente, según reporta Pérez Grajales (1998).

En cuanto a la humedad necesaria que debe tener el sustrato del cultivo, se establecerá un sistema de riego en forma controlada y conforme a los requerimientos del cultivo, asimismo, con el agua de riego se aplicarán los fertilizantes mediante una solución nutritiva a través de ferti-irrigación. De tal forma, se utilizará el sistema de riego por goteo, el cual permite obtener un uso eficiente del agua, riegos uniformes en el cultivo, aplicación de fertilizantes solubles en agua, e incluso el control de plagas y

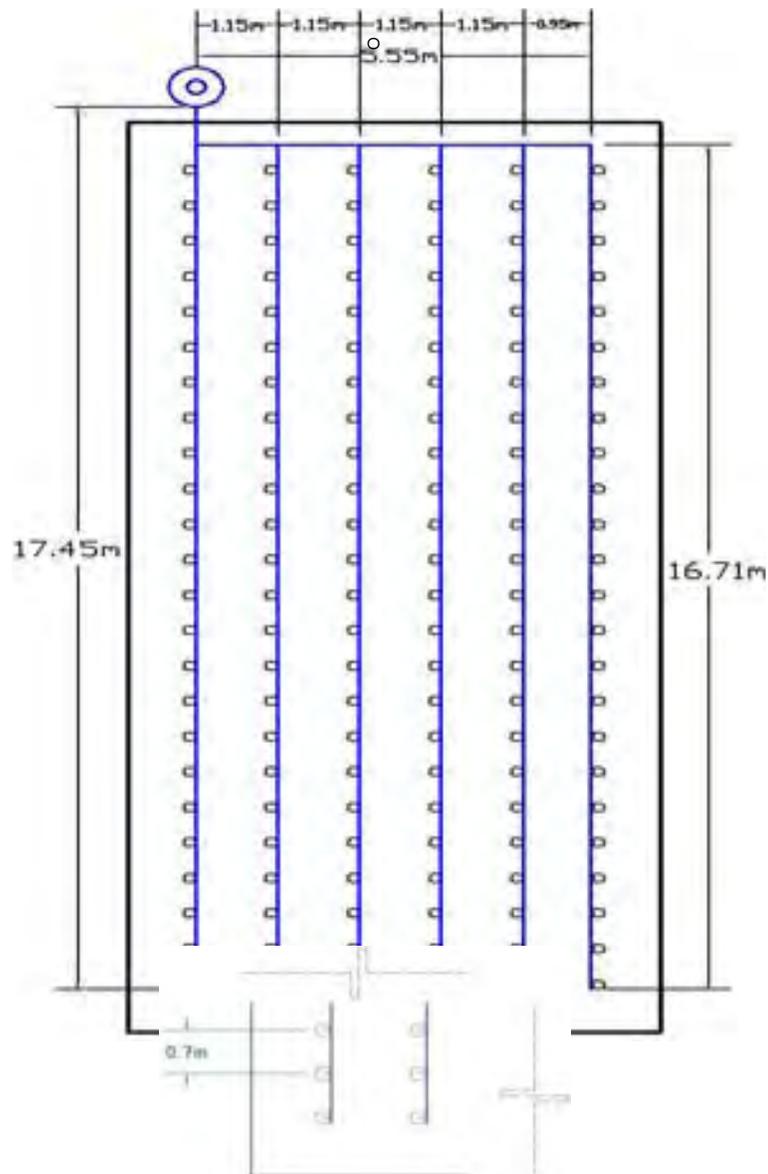
enfermedades mediante el uso del equipo. Este riego consiste en aplicar a cada planta mediante un emisor o gotero provisto de una salida de bajo caudal para que el agua fluya gota a gota, con caudales inferiores a 16 litros de agua por hora, por puntos de emisión o por metro lineal de manguera de goteo. Este sistema, también conocido como riego localizado, es uno de los métodos más utilizados en cultivos hidropónicos en sustratos y ferti-riego en el suelo. Conforme a las recomendaciones específicas que Pérez Grajales (1998), hace para el chile manzano, se determinan riegos aplicados de manera independiente a la solución nutritiva, siendo el gasto de los goteros de 4.0 L/ha. Como emisores o difusores se emplearán estacas para hidroponía, colocando una por planta, con lo cual se dará el requerimiento de agua o de la solución nutritiva en forma superficial o a pocos centímetros de profundidad, mojando sólo el volumen necesario para el desarrollo de las raíces. Como son sistemas de baja presión y alta frecuencia, se pueden aplicar varios riegos de poca intensidad por día, creando un ambiente de humedad óptima en el suelo o sustrato, a este respecto.

De esta manera se ha elegido un sistema de riego sencillo pero completo, en el que, dentro de sus componentes, encontramos de forma general un depósito de la solución nutritiva, bomba, tuberías y mangueras de conducción de agua y goteros o emisores en cada planta para regar en forma mecánica, llevando a cabo el funcionamiento de la bomba cada que sea necesario. El sistema de riego se integrará de manera general por diversos elementos que en conjunto intervienen en el proceso de llevar agua y nutrientes hasta las raíces del cultivo:

- **Fuente de abastecimiento de agua:** el lugar de donde se tomará el agua para operar el sistema de riego, será un de un pozo ubicado a 50 m de distancia del invernadero, para extraer el agua del pozo se utilizará una bomba sumergible de 1 HP y se empleará una línea de conducción de polietileno de alta resistencia para transportarla a un tanque de 1100 L situado al frente del invernadero. En este mismo tanque se realizará la mezcla de fertilizantes requerida para el cultivo y del cual se tomará a través del cabezal para distribuirla.
- **Cabezal:** ya que es una superficie pequeña se empleará una bomba de ½ HP para administrar la potencia necesaria y enviar los riegos al cultivo; además con la finalidad de evitar la obstrucción de la red de distribución se colocará un filtro de polipropileno de mallas de 120 mesh (número de orificios por pulgada lineal a partir

del centro de un hilo) que aportan 35 gpm (galones por minuto), de 1" para que los goteros no se tapen con partículas; también se instalará una válvula de apertura para controlar el flujo del riego, y por ultimo, el total de conexiones del cabezal y de la línea de distribución principal será de tubo PVC.

Figura 35. Líneas de distribución del sistema de riego por goteo



Detalle de la distancia entre goteros

- **Línea o red de distribución:** se debe identificar, según la figura 35, la distribución de la línea principal y líneas finales necesarias para el riego por goteo de acuerdo al

acomodo del cultivo, en dicha figura la línea horizontal que corre a partir del tanque de preparación de solución, corresponde a la línea principal de tubos de PVC, teniendo una longitud de 5.55 m, la cual distribuye el agua desde el cabezal a las líneas verticales en la disposición del cultivo, que corresponden con las líneas finales o regantes, mismas que dan paso a los goteros, dichas líneas serán de material de polietileno de 16 mm de diámetro y un largo de 16.71 m cada una; generando un flujo nominal de 4 L/h.

- **Emisores o goteros:** La distancia a la que deben estar colocados los emisores, compuestos por goteros auto compensantes, tubing y estacas para hidroponía que se colocan en cada bolsa para dosificar la cantidad de agua en forma homogénea a cada planta, es de 70 cm, pues corresponde con la mitad de la bolsa que es donde está colocado el tallo de la planta.

4.4. Cubierta plástica

De acuerdo con el control ambiental necesario para el invernadero, se instalará el plástico blanco difusor trifilm 703 de 3.5 años de duración con una transmitancia de luz solar del 50%, que además cuenta con las propiedades adicionales de termicidad, antigoteo, anti-polvo y anti-virus, entre otras, que permite lo siguiente:

- *Antigoteo.* Por la caída de la temperatura durante la noche, se tiene un aumento rápido de la humedad relativa del aire y condensación de agua en superficies más frías, como la parte interna de la cubierta. El efecto antigoteo disminuye estas gotas, permitiendo una entrada mayor de luz por la mañana, periodo que es más favorable para que la planta realice la fotosíntesis. Con esta cualidad de la cubierta, también se evita la caída de las gotas sobre las plantas, disminuyendo la incidencia de enfermedades.

- *Antiniebla.* La neblina es más nociva para las plantas, aún más que las gotas de agua, porque las hojas de las plantas están sometidas a una capa delgada de humedad por arriba y por abajo. Además la neblina puede bloquear los rayos del sol en las primeras horas de la mañana.

- *Difusión de luz.* Esta cualidad permite eliminar las sombras en el interior del invernadero, es decir, nos da una distribución más uniforme de la luz dentro del mismo,

aumenta la calidad de la luz en las hojas inferiores y la disminución del exceso en las hojas superiores; como consecuencia, tenemos un nivel mayor de fotosíntesis en la planta, y por lo tanto, una planta más vigorosa y un aumento de la humedad relativa en el invernadero.

- *Antipolvo*. El polvo es atraído por el plástico debido a la electricidad estática, éste es perjudicial cuando se acumula porque obstruye el paso de la luz. Uno de los métodos que se pueden usar para reducir o eliminar la electricidad estática es incrementar la conductividad superficial de los polímeros mediante agentes antiestáticos que se incorporan al plástico o en la superficie del material.

- *Térmico de larga duración*. Esta característica no permite la salida de las radiaciones caloríficas, ya que tiene una permeabilidad del 18 % a las radiaciones de longitud de onda larga en grosores de 800 galgas, con esto se anula casi en su totalidad la inversión térmica y hace que las temperaturas mínimas absolutas sean de 2°C o 3°C más elevadas a las registradas en cubiertas de polietileno normal.

Por ultimo, para el mantenimiento del plástico, en cada cambio de cubierta, se recubrirán las partes de la estructura de acero en contacto con el plástico, con pintura blanca acrílica base agua, con lo cual se evita el calentamiento y el deterioro apresurado del filme.

4.5. Cálculos de la estructura

De acuerdo a las especificaciones que se recomiendan para la construcción, es necesario un material que resista a la humedad ambiental, y que sea de fácil armado para lograr rapidez en el montaje. En el mercado mexicano existen diferentes tipos de perfiles, entre ellos los zintro, en dos presentaciones: cuadrada y rectangular, de seis metros de largo, que ofrecen productos galvanizados con una chapa de zinc, y un acabado especial en color verde tenue que proporciona protección contra la corrosión y una mayor adherencia de la pintura. En este caso, los calibres van del 14 al 20, todos con numeración par. Las dimensiones de los perfiles cuadrados, van de 1.3 a 6.4 cm, con ocho tamaños diferentes y teniendo una longitud de 6 m. Cada tamaño presenta de 2

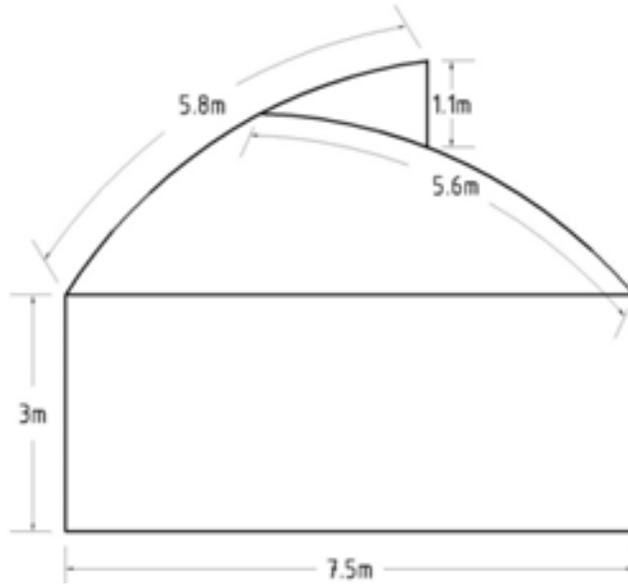
a 4 calibres distintos, por lo tanto, el peso y la resistencia de una pieza variará en función del calibre.

Por lo tanto, se utilizará el perfil de acero galvanizado, que aunque es más caro que el de acero negro, su vida útil es mayor. La galvanización se realiza en caliente por inmersión de las piezas para galvanizar con una capa de zinc en la parte interna, y así evitar su corrosión. La galvanización no está presente en los invernaderos construidos con perfiles de acero negro, lo cual disminuye la vida de estos. El acero galvanizado tiene características de resistencia a cargas, calibres, diámetros y facilidad de construcción y montaje similares e incluso mejores a los perfiles de acero negro.

Para la conformación del invernadero se realizará el troquelado del perfil, con el cual se comprime (troquelado plano) y/o hacen pliegues (troquelado hendido), además se perforará para poder hacer las uniones con tornillos y no tener que fabricar herrajes especializados que conllevan a un aumento de material y mayor costo. Se realizará el rolado para darle forma curva a los materiales, principalmente los arcos; posteriormente se realizará un punzonado, para marcar los lugares donde se hará alguna perforación sobre el material; y por último cortes a los perfiles para lograr una medida precisa en la construcción del invernadero como las columnas. Además se tendrá que utilizar la soldadura en algunas piezas como las abrazaderas que unen distintos elementos estructurales de diferente espesor, por ejemplo la unión de largueros con columnas.

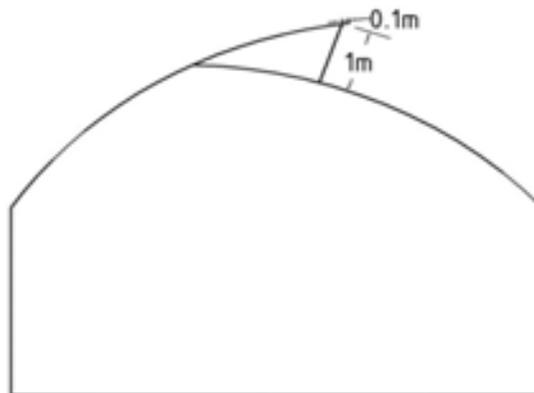
Teniendo presente todo lo anterior, la forma del invernadero permite aprovechar lo mejor posible el material como vemos en la figura 36, contando con dos arcos de 5.8 m y 5.6 m, esto debido a que se tendrá por ejemplo una unión a la columna y al arco superior de 20 cm con dos tornillos, es decir, la fabricación de los arcos se llevará a cabo con un solo tubo para cada elemento; por otro lado tenemos columnas de 3 m que son fabricadas simplemente realizando un corte a la mitad de cada tubo de 6 m y haciéndoles además perforaciones para unirlos con los demás elementos estructurales. También se observa que existe un claro o trabe de a carga de 7.5 m, la cual se completará una pieza de 6 m agregándole un corte de 1.5 m de otra pieza de 6 m para lograr la extensión del claro; el restante se ocupará de la misma forma, pues 6 m de material permiten fabricar cuatro claros.

Figura 36. Forma del invernadero y medidas de los elementos estructurales



Considerando las figuras 36 y 37, se observa que existe una diferencia en la ventila cenital, pues se planea una abertura cenital de 1.10 m, pero al inclinar el elemento y recorrerlo 10 cm por debajo del arco superior e inferior, con la finalidad de optimizar el material, resulta una pieza de 1 m, para que los 5 m restantes de un perfil de 6 m se puedan ocupar de esa misma forma, no obstante, la abertura cenital no cambia y sigue siendo de 1.10 m.

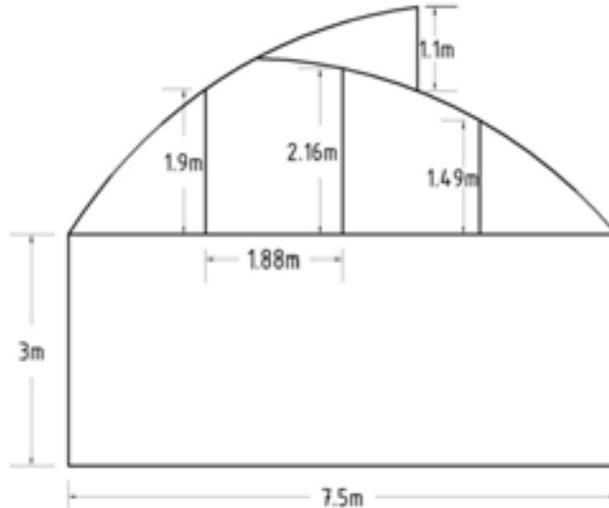
Figura 37. Inclinación de la ventila cenital



Para conformar una armadura más resistente a las cargas a las que estará expuesta la estructura, se implementan montantes o tensores (figura 38), los cuales se ubicarán entre los arcos y la trabe de carga, con una separación equidistante de 1.88 m, siendo la suma

de sus longitudes igual a 5.55 m; de tal forma que con un solo tubo de 6 m se puede cubrir el requerimiento de material de estos elementos y así optimizar el material.

Figura 38. Ubicación y longitud de los montantes o tensores



4.5.1. Determinación de las cargas en la estructura

En esta parte se estiman todas las cargas que estarán actuando sobre la estructura del invernadero que se ha proyectado, como el propio peso de la estructura, peso del plástico, carga por tutoreo, carga por viento, carga por granizo y por sismo, a este respecto no se tomará en cuenta la carga generada por los equipos ya que en el control ambiental no se han incluido. En la estimación, aunque existen cargas que deben considerarse como permanentes, variables y accidentales, todas éstas deben sumarse en un total e incluirlas todas juntas en la capacidad que la estructura soportará de forma permanente, por lo tanto deben estar contempladas desde un principio. A continuación se hace la estimación de las distintas cargas que soportará el invernadero.

Peso de la estructura

Considerando el tipo de material utilizado para cada elemento estructural, es decir, de acuerdo a la dimensión, calibre y longitud, es necesario hacer una estimación del peso aproximado que tendrá cada elemento. Para poder analizar las cargas es necesario

visualizar una parte del invernadero que sea representativa, y en este caso debemos considerar de qué manera está compuesta la armadura: arcos, trabe de carga o claro y montantes o tensores principalmente, puesto que este conjunto de elementos o armadura es la que soportará todas las cargas que luego serán distribuidas a las columnas, ya que la armadura y sus cargas descansan sobre éstas. Para la estimación, se determina cada elemento de la armadura y su longitud, con base a la figura 39, para luego estimar el calibre y dimensión con ayuda de la tabla 6.

Figura 39. Elementos del invernadero

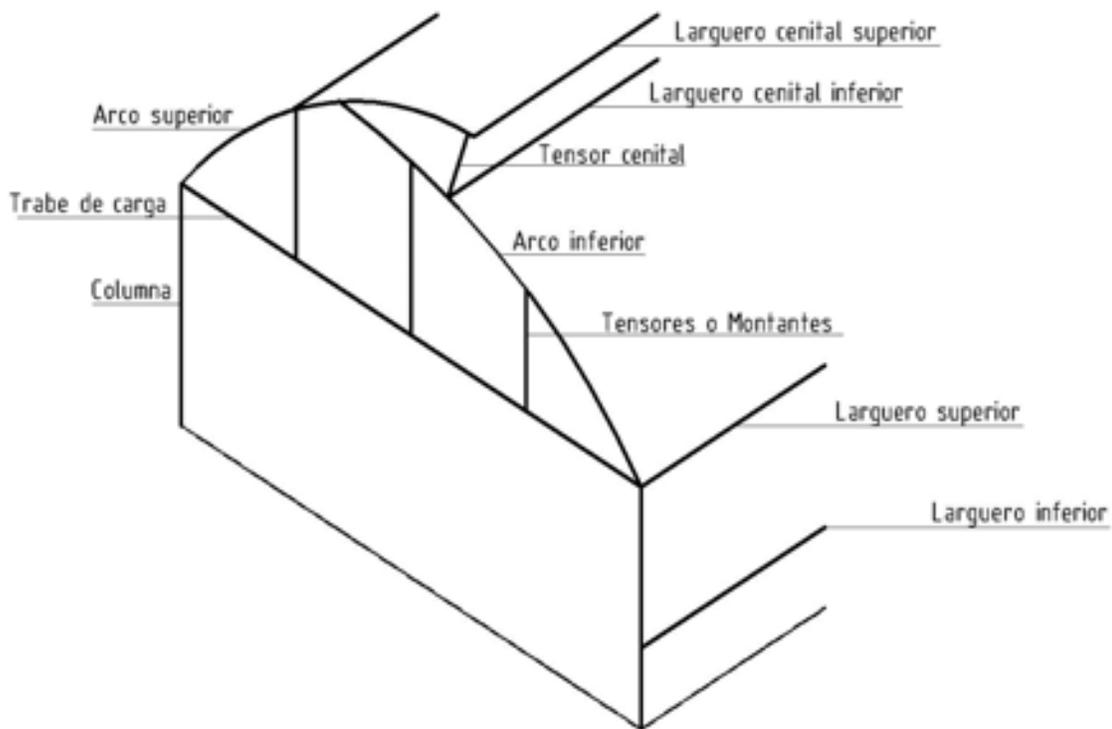
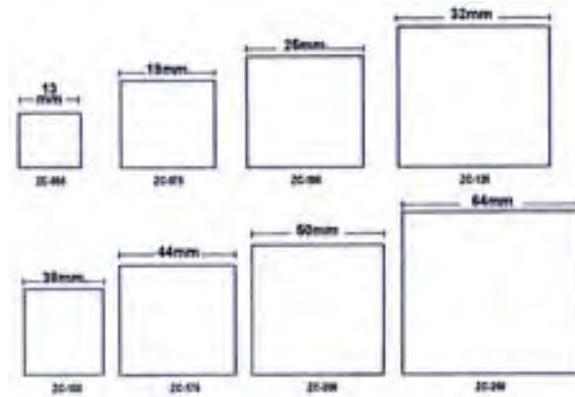


Tabla 6. Pesos, dimensiones y calibres perfil cuadrado ZC cal. 14

Producto	Calibre	Largo (m)	Peso/m (kg/m)	Peso/pza (kg)	Piezas p/atado	Peso/atado (kg)
ZC100	14	6.00	1.447	8.685	10	86.847
ZC125	14	6.00	1.873	11.236	8	89.886
ZC150	14	6.00	2.234	13.407	1	13.407
ZC175	14	6.00	2.599	15.596	1	15.596
ZC200	14	6.00	2.961	17.767	1	17.767



Fuente: Perfiles Comerciales Cuautitlán S.A. de C.V.

De los datos anteriores se realizó el cuadro 4 de estimación del peso de la armadura, en el cual se resume el tipo de material a utilizar para la parte representativa del invernadero que se analizaron, como calibre y dimensiones, al igual que la longitud y la estimación en kg del peso de cada elemento de la armadura. Asimismo, se incluyen: el tensor cenital, ubicado en la parte superior de la armadura uniendo a los dos arcos y de igual forma existen otros elementos llamados largueros y cortinero cenitales, que aunque no forman parte de la armadura descansan sobre ella; asimismo los cortineros laterales están incluidos porque la armadura también soporta su peso.

Cuadro 4. Estimación del peso de la armadura

Elemento	Material	Long.	Kg/m	Total (Kg)
Arco superior	Perfil 2" x 2" cal. 14	5.8 m	2.961	17.17
Arco inferior	Perfil 2" x 2" cal. 14	5.6 m	2.961	16.58
Trabe o claro	Perfil 1 ¹ / ₂ " x 1 ¹ / ₂ " cal. 14	7.5 m	2.234	16.75
Tensor central	Perfil 1 ¹ / ₄ " x 1 ¹ / ₄ " cal. 14	2.16 m	1.873	4.04
Tensor izquierdo	Perfil 1 ¹ / ₄ " x 1 ¹ / ₄ " cal. 14	1.9 m	1.873	3.55
Tensor derecho	Perfil 1 ¹ / ₄ " x 1 ¹ / ₄ " cal. 14	1.49 m	1.873	2.79
Tensor cenital	Perfil 1 ³ / ₄ " x 1 ³ / ₄ " cal. 14	1 m	2.599	2.599
Larguero cenital sup.	Perfil 1 ¹ / ₄ " x 1 ¹ / ₄ " cal. 14	3 m	1.873	5.61
Larguero cenital inf.	Perfil 1 ¹ / ₄ " x 1 ¹ / ₄ " cal. 14	3 m	1.873	5.61
Cortinero cenital*	Tubo de 1 ¹ / ₄ "	3 m	1.51	4.53
Cortinero lateral izq.*	Tubo de 1 ¹ / ₄ "	3 m	1.51	4.53
Cortinero lateral der.*	Tubo de 1 ¹ / ₄ "	3 m	1.51	4.53
Peso total				88.289

* Nota. Los datos corresponden a las especificaciones del catálogo de productos Aceros Flores S.A. de C.V.

De tal forma se obtiene una estimación del peso total de 88.289 kg que soportará la armadura.

Peso de la cubierta

El peso de la cubierta se debe determinar cuidadosamente por el calibre del plástico basándose en datos del fabricante; por tanto, se utilizará un polietileno de calibre 720, de 182 g/m^2 con el cual se trabajará. Tomando sólo la estimación de una sola armadura de todo el invernadero. La armadura soportará la carga de ambos lados, es decir de 3 m, 1.5 m a cada lado, porque la siguiente armadura soporta otros 3 m y así sucesivamente.

Para determinar el peso de plástico se realizaron las operaciones siguientes:

Arco superior x superficie x peso de plástico: $5.8 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 0.182 \text{ kg/m}^2 = 3.16 \text{ kg}$

Arco inferior x superficie x peso de plástico: $3.78 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 0.182 \text{ kg/m}^2 = 2.06 \text{ kg}$

Ventila cenital x superficie x peso de plástico: $1.10 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 0.182 \text{ kg/m}^2 = 0.60 \text{ kg}$

Ventila lateral x superficie x peso de plástico: $2 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 0.182 \text{ kg/m}^2 = 1.09 \text{ kg}$

Total: 6.91 kg

De tal forma se tiene una carga de plástico de alrededor de 7 kg por cada armadura del invernadero.

Carga por tutoreo

Antes que nada es necesario plasmar la distribución del cultivo de forma gráfica para que se facilite ubicar las cargas que estarán ejerciendo sobre la armadura. En las figuras 40 y 41, tanto a lo ancho como a lo largo respectivamente, se observan principalmente las filas de macetas y la rafia tendida de forma vertical utilizada como soporte de la planta, además se ha eliminado la planta en las figuras para apreciar mejor la distribución del cultivo.

Figura 40. Distribución de las plantas a lo ancho (vista de frente y lado)

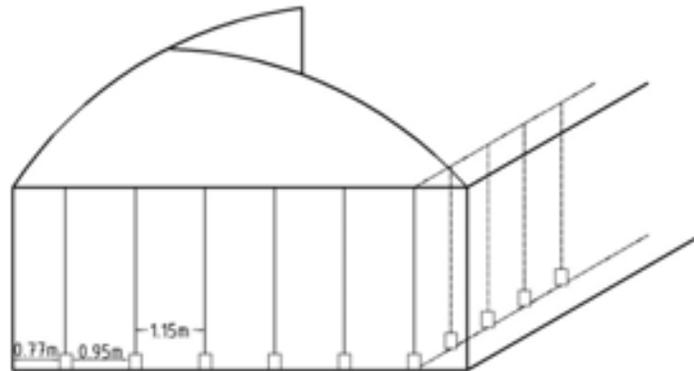
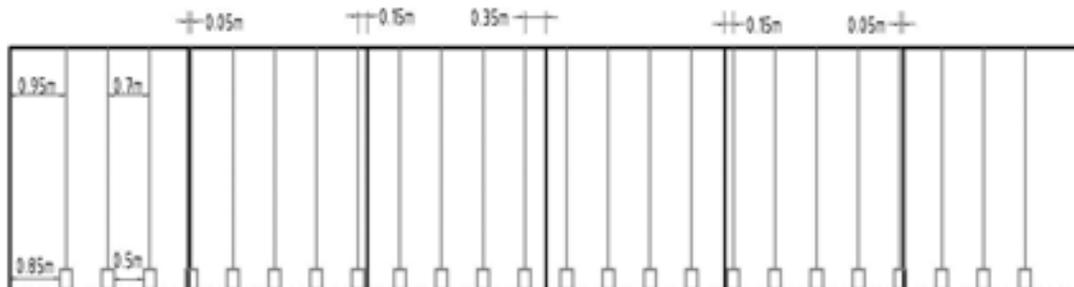


Figura 41. Distribución de las plantas a lo largo (vista de lado)



El tutoreo ubicado, de acuerdo al acomodo de las plantas de chile manzano, está formado por las líneas de alambre calibre 10 que cruzan a lo largo del invernadero (figura 41) y de las cuales se sujetan los hilos de rafia que dan soporte y guía a la planta. Estas líneas de alambre están apoyadas en la trabe o claro de la armadura.

Con base en las figuras anteriores se observa una distribución de plantas, la cual presenta cargas uniformemente distribuidas tanto a lo ancho como a lo largo del invernadero. De tal forma se considera la formación de 6 filas de plantas, es decir 6 líneas de alambre equidistantes entre sí de 1.15 cm (figura 40), siendo importante distinguir a lo largo del invernadero (figura 41), que cada armadura y columnas están soportando el peso de 4 plantas, dos de un lado y dos del otro lado mediante la línea del cable de tutoreo, esto se debe a que las plantas apoyan su peso en la rafia, que la transmite al alambre, y éste a su vez a la armadura.

De acuerdo con lo anterior es indispensable considerar el peso que ejercen las plantas en una sola armadura. La planta de chile manzano, al ser de un porte alto, presenta un tallo largo que puede bifurcarse en 2 o 3, generar ramas y abundante follaje que suele ser podado, generando un peso aproximado de 6 kg y si a esto se agrega que, de acuerdo a Pérez Grajales (1998), se producen 4 kg de fruto, se hace una estimación por planta de alrededor de 10 kg. Si se suman las 4 plantas repartidas en una sola línea de cable de 3 m, puesto que solo se está considerando la carga para una armadura, se obtiene un total de 40 kg, a este valor se deben sumar las otras 5 líneas de cable que también transmiten su carga hacia la armadura, es decir $40 \text{ kg} \times 6 \text{ líneas} = 240 \text{ kg}$; una sola armadura estaría soportando esta carga más el peso de las 6 líneas de cable de 3 m, cada uno de $\frac{1}{4}$, el cual tiene un peso de 180 g/m (tabla 7), es decir $3 \text{ m} \times 0.180 \text{ kg/m} \times 6 \text{ líneas} = 3.24 \text{ kg}$, en total se obtiene una carga por tutoreo de 243.24 kg.

Tabla 7. Especificaciones del cable de acero galvanizado

Número de Artículo	Diámetro	Número de hilos	Diámetro de cada hilo	Carga mínima de ruptura por tensión	Contenido mínimo del recubrimiento de zinc	Peso total aproximado
	mm (pulg)		mm	kN	g / m ²	kg / km
J411	6,35 (1/4)	7	2,03	21,140	366	180,06

Fuente: Catálogo de productos Viakon.

Robledo y Martín 1981, refieren que la carga que ejerce el tutoreo en la armadura se encuentra entre 14 y 16 kg/m², aunque actualmente se han llegado a tomar criterios de diseño por tutoreo de 20 a 25 kg/m². En este caso se tiene una carga por tutoreo de 10.81 kg/m², ya que si se toma en cuenta al ancho de 7.5 m por 3 m que corresponden a una sola armadura, se obtiene una área de 22.5 m², dividiendo este valor entre la carga ya estimada de 243.24 kg, se consiguen 10.81 kg/m². Este valor podría aumentar si se colocaran las plantas más juntas entre sí, para acercarse a los valores de las referencias citadas, pero en este proyecto se siguen las indicaciones del cultivo que han desarrollado los especialistas en chile manzano.

Carga por Viento

La carga que ejercerá el viento será determinada por las normas técnicas complementarias para diseño por viento del Distrito Federal (2008).

Determinación de la velocidad de diseño, V_D

Los efectos estáticos del viento sobre la estructura o componente de la misma se determinan con base en la velocidad de diseño, dicha velocidad de diseño se obtendrá de acuerdo con la ecuación:

$$V_D = F_{TR} F_{\alpha} V_R$$

Donde:

F_{TR} = factor correctivo que toma en cuenta las condiciones locales relativas a la topografía y a la rugosidad del terreno en los alrededores del sitio de desplante (sin unidades).

F_{α} = factor que toma en cuenta la variación de la velocidad de viento con la altura (sin unidades).

V_R = velocidad de viento regional según la zona que le corresponde al sitio en donde se construirá la estructura (m/s).

Se recurre a las tablas 13, 14, 15 y a las figuras 52 y 53 de los anexos para obtener los datos necesarios y sustituir en la fórmula anterior:

$F_{TR} = 1$ porque el sitio es campo abierto, asimismo es un terreno tipo 1.

$V_R = 1$ porque la altura del invernadero es menor de 10 m ($z \leq 10$ m).

$F_{\alpha} = 22.22$ m/s porque en la región se tienen vientos de 80 km/h.

$$V_D = (22.22 \text{ m/s}) (1) (1)$$

$$V_D = 22.22 \text{ m/s} = 80 \text{ km/h.}$$

Determinación de la presión de diseño, P_z

La presión que ejerce el flujo del viento sobre una construcción determinada P_z , en kg/m^2 , se obtiene tomando en cuenta su forma y está dada de manera general por la expresión:

$$P_z = 0.048 C_p V_D^2$$

Donde:

C_p = coeficiente local de presión (kg/m^2).

V_D = velocidad de diseño para una altura dada (sin unidades).

Con el propósito de analizar todas las caras del invernadero en donde golpea el viento, se calculan los coeficientes de presión de acuerdo con la tabla 17 de los anexos, de donde se obtienen los coeficientes:

$$C_{p\text{BAR}} = 0.8$$

$$C_{p\text{SOT}} = -0.4$$

Se calcula $r = a / d$ de la figura 3xx de los anexos:

$$r = 2.97/7.5 = 0.396$$

De acuerdo con la figura 54 de los anexos y a la forma curva del techo del invernadero, se tomará en cuenta toda la longitud del arco superior como la zona A y toda la longitud del arco inferior como la zona C, mismas que se contrarrestan entre si más adelante, de este modo se obtienen los siguiente coeficientes de la tabla 16:

$$C_{p\text{zona A}} = 1.42 r = (1.42) (0.396) = 0.562$$

$$C_{p\text{zona C}} = -0.5$$

Sustituimos los coeficientes obtenidos en $P_z = 0.048 C_p V_D^2$:

$$\text{Cara de barlovento: } P_z = 0.048 (0.8) (22.22)^2 = 18.84 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Cara de sotavento: } P_z = 0.048 (-0.4) (22.22)^2 = -9.5 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Para zona A: } P_z = 0.048 (0.562) (22.22)^2 = 13.29 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Para zona C: } P_z = 0.048 (-0.5) (22.22)^2 = -11.82 \text{ kg/m}^2$$

De la figura 55 de los anexos se calcula $b/10$ para la zona 2: $b/10 = 7.5/10 = 0.75 \text{ m}$

Ya que el área tributaria del invernadero, es decir el área que se está estudiando, es de 22.5 m^2 y de acuerdo a la tabla 18 se obtienen los coeficientes para la zona 1 y 2:

$$\text{Zona 1} = 1.15 \quad \text{Zona 2} = 1.3$$

Se toma 1.3 para concluir P_z en las zonas A y C, correspondientes con los arcos del invernadero:

$$P_z = (13.29) (1.3) = 17.27 \text{ kg/m}^2$$

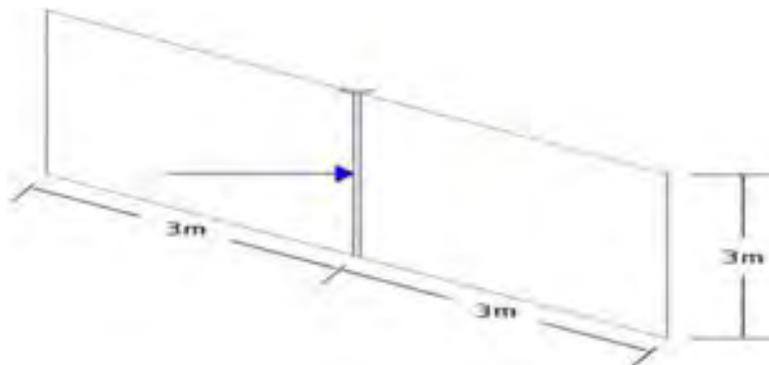
$$P_z = (-11.82) (1.3) = -15.36 \text{ kg/m}^2$$

Cálculo de las áreas

Ahora que se tienen las presiones ejercidas sobre las paredes, se realiza la determinación de las áreas sobre las que ejercerá el viento la fuerza de empuje.

Para la cara de barlovento y sotavento se observa en la figura 42 que se aísla una columna del centro donde el viento golpea al 100%, de este modo el área de la columna que soporta la presión horizontal del viento, es la mitad de la distancia entre las columnas de ambos lados y se multiplica por la altura de la columna.

Figura 42. Área de influencia por la fuerza del viento por columna



Se estima de la forma siguiente:

$$\text{Pared de barlovento: } A_{\text{BAR}} = (3 \text{ m}) (3 \text{ m}) = 9 \text{ m}^2$$

$$\text{Pared de sotavento: } A_{\text{SOT}} = (3 \text{ m}) (3 \text{ m}) = 9 \text{ m}^2$$

Para determinar las áreas en los arcos es necesario apoyarse gráficamente con las figura 43 y 44, posteriormente se procede a multiplicar la longitud del arco por la longitud correspondiente a la distancia entre las columnas de ambos lados (3 m).

Figura 43. Área de acción del viento en el arco superior

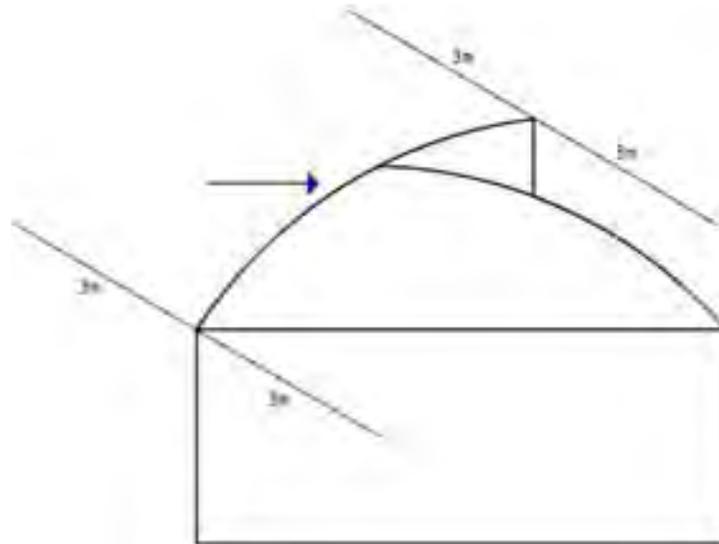
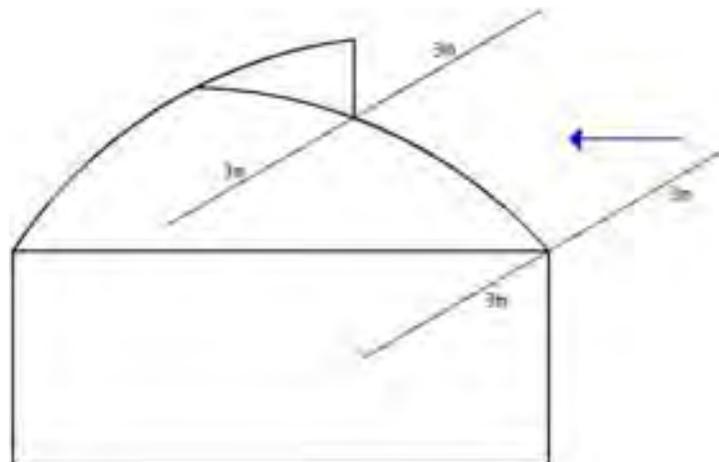


Figura 44. Área de acción del viento en el arco inferior



Para arco superior (figura 43), zona A: $A_A = (5.8) (3) = 17.4 \text{ m}^2$

Para arco inferior (figura 44), zona C: $A_C = (5.6) (3) = 16.8 \text{ m}^2$

Habiendo obtenido las cargas o presiones de empuje que actúan en cada cara y sus respectivas áreas, se procede de la siguiente forma multiplicando la Presión x Área:

Pared lateral de barlovento: $(18.84 \text{ kg/m}^2) (9 \text{ m}^2) = 169.56 \text{ kg}$

Pared lateral de sotavento: $(-9.5 \text{ kg/m}^2) (9 \text{ m}^2) = -85.5 \text{ kg}$

Para arco superior zona A: $(17.27 \text{ kg/m}^2) (17.4 \text{ m}^2) = 300.49 \text{ kg}$

Para arco inferior zona C: $(15.36 \text{ kg/m}^2) (16.8 \text{ m}^2) = -258.04 \text{ kg}$

Se suman todos los valores para conocer la carga total que actúa sobre la estructura, aplicada de forma horizontal a la pared de barlovento, esto es importante ya que en el sitio los vientos dominantes provienen del norte (figura 43), y dado que la orientación en la que estará ubicado el eje longitudinal del invernadero es norte-sur con un poco de inclinación hacia el este, se observa que esta parte del invernadero y principalmente las columnas, será golpeada constantemente por el viento.

Carga total = $(169.56 \text{ kg}) + (-85.5 \text{ kg}) + (300.49 \text{ kg}) + (-258.04 \text{ kg}) = 126.51 \text{ kg}$

Esta carga total de 126.51 kg estará distribuida en la pared del invernadero.

Carga por Sismo

Tomando en cuenta el mapa que aparece en el Manual de diseño de Obras Civiles (Diseño por Sismo) de la Comisión Federal de Electricidad, el municipio se encuentra en las zonas B y C, que son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo. Castro (1974) refiriéndose a construcciones agropecuarias señala que, se toma en cuenta el efecto (acción) del sismo sólo para diseño de edificios mayores de 16 m, en estructuras cuya altura sea mayor que la planta y en todos los lugares de reunión. Bajo esta consideración el efecto por sismo no se usa para el diseño de cimentación de invernaderos. Por lo anterior no se calculará la carga por sismo para el invernadero proyectado.

Carga por Granizo

El granizo se desliza en cubiertas curvas y tiende a depositarse en los canalones entre los techos de invernaderos conectados, en este caso al ser un solo módulo no se consideran sus cargas sobre la estructura, puesto que no tendrá dichos canalones y el granizo se deslizará por sus arcos.

Fuerzas que actúan en la estructura

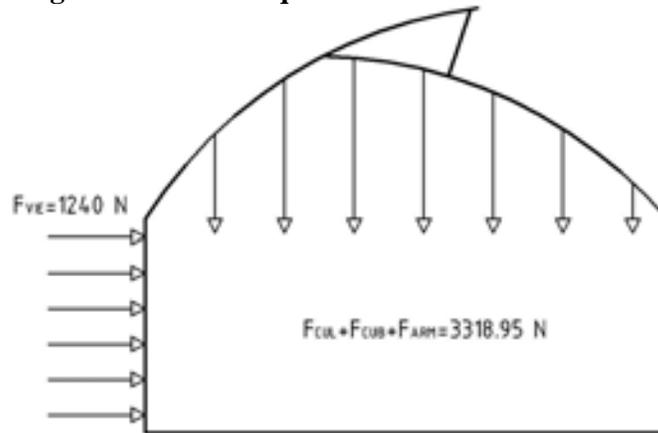
Una vez que se han determinado las cargas que soportará la estructura, se suman todos los valores para estimar totalmente la carga a la que estará expuesta tanto la armadura como la estructura en general, cabe destacar que al ocupar el kg como unidad dimensional en todos los cálculos, se usa no como masa, sino como unidad de fuerza (peso), denominado kilogramo fuerza (kgf) y es necesario transformarlos a Newtons (N), de esta forma se multiplican todos los valores obtenidos por la gravedad (9.80665), obteniendo así las fuerzas que actuarán en el invernadero (cuadro 5).

Cuadro 5. Sumatoria de fuerzas que actúan en la estructura

Carga vertical	↓ (-) Esfuerzo normal	Carga horizontal	→ (+) Esfuerzo cortante y flexión
Peso de la armadura F_{ARM}	88.289 kgf 865.82 N	Carga por Viento F_{VIE}	126.51 kg 1240 N
	+		
Peso de la cubierta F_{CUB}	6.91 kgf 67.76 N		
	+		
Carga por tutoreo F_{CUL}	243.24 kgf 2385.37 N		
Carga total Fuerza total	338.439 kgf 3318.95 N		126.51 kgf 1240 N

De acuerdo al cuadro 5 es necesario que se conozca la manera en la que las fuerzas actuarán en la estructura del invernadero: por viento de forma horizontal, y por cultivo, armadura y cubierta de forma vertical. En la figura 45 se observa una fuerza vertical total de 3318.95 N, que estará distribuida uniformemente en toda la armadura provocando esfuerzo de compresión principalmente, aplicado a las columnas. También se presenta una fuerza horizontal total de 1240 N provocando principalmente esfuerzo cortante en las columnas.

Figura 45. Fuerzas que actúan sobre la estructura



4.5.2. Esfuerzo máximo en la columna

Los elementos del invernadero serán sometidos a esfuerzos o deformaciones que pueden ocasionar que uno o más elementos fallen. Estas fallas pueden ser por la acumulación y/o exceso de dos tipos de esfuerzos: cortante, normal o la combinación de ambos, sin embargo dentro del análisis, se estudiará principalmente la columna como elemento estructural, ya que sobre esta descansa toda la carga producida por el cultivo, armadura y cubierta, provocando esfuerzo de compresión y flexión, además de la carga generada por el viento exponiéndola a esfuerzo cortante (cuadro 6).

Cuadro 6. Esfuerzos a los que están sometidos los elementos estructurales

Elemento estructural	Esfuerzo sometido por:	
	viento	cultivo + armadura + cubierta
Columna	Cortante, flexión	Compresión
Trabe	Compresión	Cortante, flexión
Arco superior	Cortante, flexión	Compresión
Arco inferior	Cortante, flexión	Compresión
Tensor cenital	Cortante, flexión	Compresión
Tensores		Tensión
Largueros	Cortante, flexión	

De igual forma se analizará la tornillería, ya que un solo tornillo como elemento de sujeción utilizado en toda la estructura con el cual se harán las uniones entre los distintos elementos, está expuesto a esfuerzo cortante.

Como se puede ver, la columna y la tornillería son los elementos más representativos que forman parte de los puntos más críticos, siendo los más propensos a fallar por la acumulación de esfuerzos antes que el resto de los elementos de la estructura.

Para el cálculo de la columna, su diseño se basará principalmente en los esfuerzos cortante y normal. Se calcularán dichos esfuerzos producidos por las fuerzas calculadas en la determinación de las cargas sobre la estructura y compararlos con la resistencia de fluencia del perfil de acero a utilizar. Es así que se toman en cuenta las características y propiedades mecánicas del material para construir el invernadero. Los perfiles utilizados en la estructura son de lámina de acero y cumplen con las siguientes especificaciones de acuerdo a fabricante:

- Todos los perfiles estructurales utilizados son de sección cuadrada calibre 14, es decir, tienen un espesor de 1.9 mm.
- El tipo de acero es fabricado según norma ASTM-A-446, con un acero grado 30 rolado en frío según norma.
- El recubrimiento es de Zinc-Aluminio galvanizado en caliente, capa AZ-90 ($0.90 \text{ Oz/Ft}^2 = 274 \text{ gr/m}^2 = 0.0015 \text{ in.}$, según norma NOM-B-469, ASTM-792).

Constantes de diseño (propiedades mecánicas) según fabricante:

$$E = \text{Módulo de elasticidad} = 2\,039\,000 \text{ kg/cm}^2$$

$$G = \text{Módulo de elasticidad al cortante} = 787\,500 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\nu = \text{Relación de Poisson} = 0.3$$

$$F_y = \text{Esfuerzo de fluencia mínimo} = 2320 \text{ kg/cm}^2.$$

En el cálculo de los esfuerzos se aplicarán los valores máximos para asegurar que la resistencia de fluencia del material al ser mayor al esfuerzo máximo presente en el elemento, la estructura soportará las cargas determinadas.

Se aplicará la fórmula del esfuerzo cortante y esfuerzo normal máximos que refiere Gere, (2002):

Esfuerzo cortante máximo

$$\tau_{\max} = \frac{1.5 V_{\max}}{A}$$

Donde:

τ_{\max} = esfuerzo cortante máximo debido a la fuerza cortante máxima V_{\max} en un punto de interés perteneciente a la sección transversal de interés de la viga. (N/m²)

V_{\max} = fuerza cortante máxima (interna) resultante, que actúa en la sección transversal de interés.

A = área de la sección transversal donde es aplicada V_{\max} . (m²)

Esfuerzo normal máximo

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A}$$

Donde:

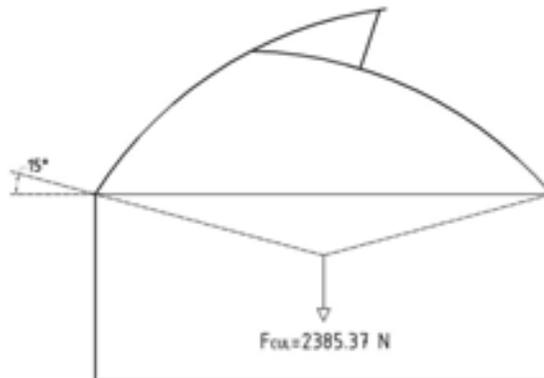
σ_{\max} = esfuerzo normal máximo aplicado en un punto de la sección transversal. (N/m²)

N_{\max} = fuerza normal máxima resultante (interna) aplicada en un punto de la sección transversal. (N)

A = área de la sección transversal donde es aplicado N_{\max} . (m²)

De forma práctica se conoce que la fuerza resultante de 2385.37 N producida por la carga del cultivo, causa una deformación angular de 15° en la trabe de carga, afectando las columnas como se ve en la figura 46.

Figura 46. Deformación del invernadero por la carga del cultivo

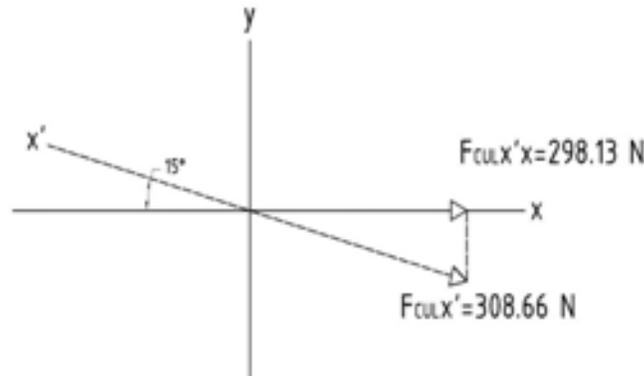


En la figura 46 se observa que el valor de la fuerza 2385.37 N está actuando sobre las dos columnas, por lo que se divide entre dos para tener la carga que está actuando en cada columna:

$$F_{\text{CUL}} = \frac{2385.37 \text{ N}}{2} = 1192.68 \text{ N}$$

Se debe descomponer la fuerza producida por la carga del cultivo en su componente horizontal (x'), utilizando el ángulo de deformación de la figura 46, con esto podremos sumar la fuerza ocasionada por el viento para obtener una cortante en donde estén implícitas estas dos fuerzas y así poder realizar los cálculos (figura 47).

Figura 47. Descomposición de la Fuerza del cultivo en su componente horizontal



De la figura 47 se obtiene el siguiente razonamiento de la fuerza del cultivo:

$$F_{\text{CUL} x' y} = 1192.68 \text{ N} \times \cos 75^\circ = 308.66 \text{ N}.$$

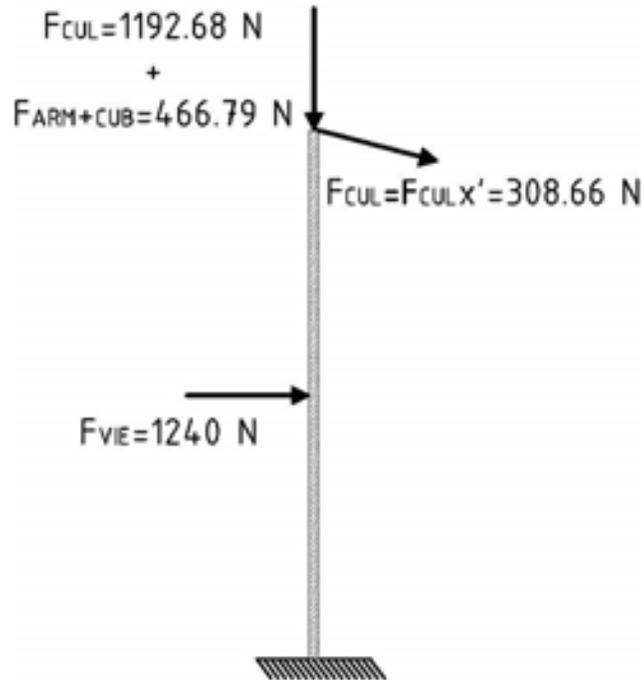
Si se recorre la fuerza $F_{\text{CUL} x' y}$ hacia el eje x , se obtiene:

$$F_{\text{CUL} x' x} = 308.66 \text{ N} \times \cos 15^\circ = 298.13 \text{ N}$$

Con todos los cálculos de las fuerzas que actúan sobre la estructura se obtiene la figura 48, donde las fuerzas concentran su acción sobre una sola columna que es el punto más crítico; se puede ver en dicha figura la fuerza ocasionada por el viento, la suma de la fuerza de la armadura y la cubierta dividida entre dos, porque toda su carga la comparten las dos columnas, además también se ve la fuerza vertical y la

deformación angular de la columna hacia el interior del invernadero ocasionada por la carga del cultivo.

Figura 48. Fuerzas que actúan en la columna



En base a la figura 48 se obtiene el diagrama de cuerpo libre de la columna a estudio para poder visualizar los esfuerzos que actúan sobre esta.

En la figura 49 se observa que prácticamente la columna estará sometida a:

- Compresión causada por la carga del cultivo, peso de la armadura y el peso de la cubierta.
- Cortante causada por las fuerzas del viento y por la tensión que genera el cultivo por el tutoreo.

Para hacer el cálculo de los esfuerzos normales y cortantes se debe apoyar en el diagrama de cuerpo libre de la columna para observar las fuerzas que actúan sobre esta y verificar las tres ecuaciones fundamentales del equilibrio y posteriormente seguir con el procedimiento de cálculo de esfuerzos mediante la teoría de esfuerzo máximo.

- Suma de todas las componentes horizontales de todas las fuerzas, igual a cero. Estas corresponden con las cargas del viento y cultivo (tutoreo), tomando como positivas las fuerzas dirigidas hacia la derecha.

$$\sum F_x = 0$$

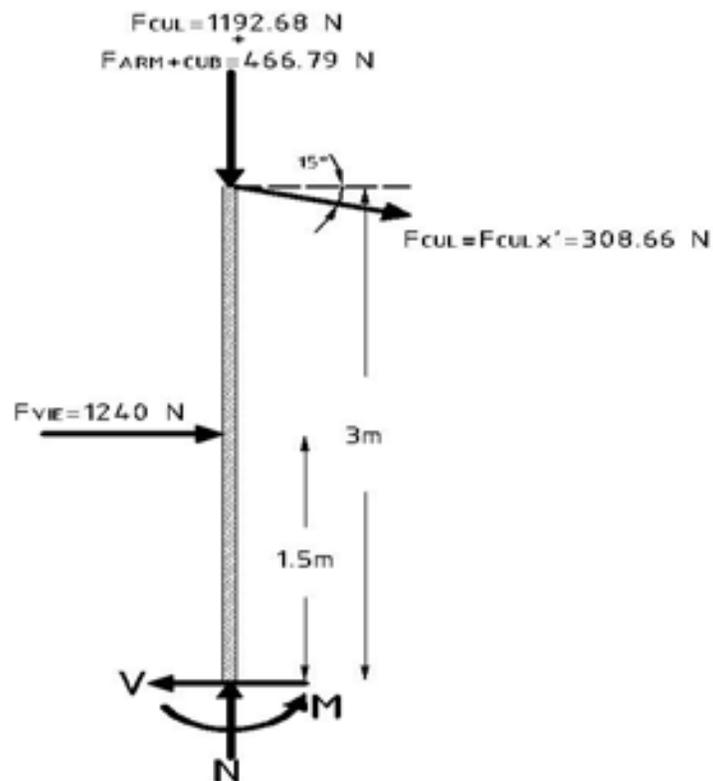
$$-V + 1240 + 308.66 \times \cos 15^\circ = 0$$

$$-V + 1240 + 298.13 = 0$$

$$-V + 1538.13 = 0$$

$$V = 1538.13 \text{ N}$$

Figura 49. Diagrama de cuerpo libre de la columna



Con la determinación de la fuerza cortante máxima resultante se procede a calcular el esfuerzo cortante máximo en la columna, aplicando la fórmula:

$$\tau_{\max} = \frac{1.5 V_{\max}}{A}$$

Para conocer el área de la sección transversal del material utilizado se realiza la siguiente operación:

$$A = (1.9 \text{ mm}) (50.8 \text{ mm}) (4 \text{ lados}) = 386.08 \text{ mm}^2 = 0.00038608 \text{ m}^2$$

$$\tau_{\max} = (1.5) 1538.13 \text{ N} / 0.00038608 \text{ m}^2$$

$$\tau_{\max} = 5975950.575 \text{ N/m}^2$$

$$\tau_{\max} = 60.93 \text{ kg/cm}^2$$

Para obtener el factor de seguridad se divide la resistencia verdadera entre la resistencia requerida es decir el esfuerzo de fluencia del material utilizado que es de 2320 kg/cm² equivalente a 227514280 N/m² entre el esfuerzo cortante máximo, no obstante ese esfuerzo de fluencia está considerado en tensión o compresión, es decir que el esfuerzo de fluencia en cortante se estima al 50 % Gere, (2002), por lo tanto:

$$113757140 \text{ N/m}^2 / 5975950.575 \text{ N/m}^2 = 19.03$$

Este valor indica que la columna de 2" puede soportar 19 veces la carga que le ocasiona ese esfuerzo cortante calculado anteriormente.

Este factor indica que antes de que se venza por esfuerzo cortante la columna, la carga que soporta de forma horizontal es de 1157 kg/cm², arriba de esa carga se provocará la falla ya que el esfuerzo de fluencia en cortante del material es de 1160 kg/cm².

- Suma de todas las componentes verticales de todas las fuerzas, igual a cero. Estas corresponden con las cargas del cultivo, cubierta y armadura, tomando como positivas las fuerzas dirigidas hacia arriba.

$$\sum F_y = 0$$

$$N - 1192.68 \text{ N} - 466.79 = 0$$

$$N - 1659.47 = 0$$

$$N = 1659.47 \text{ N}$$

Con la determinación de la fuerza normal máxima resultante se procede a calcular los esfuerzos normales en la columna, aplicando la formula:

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A}$$

$$\sigma_{\max} = 1659.47 \text{ N} / 0.00038608 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{\max} = 4298254.24 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma_{\max} = 43.82 \text{ kg/cm}^2$$

Se obtiene el factor de seguridad para esfuerzo normal:

$$227514280 \text{ N/m}^2 / 4298254.24 \text{ N/m}^2 = 52.93$$

Este valor indica que la columna puede soportar casi 53 veces la carga que le ocasiona el esfuerzo normal máximo calculado anteriormente.

Este factor muestra que antes de que se venza la columna por esfuerzo normal o compresión, la carga que soporta de forma vertical es de 2278.64 kg/cm², arriba de esa carga se provocará la falla, ya que el esfuerzo de fluencia en tensión o compresión del material es de 2320 kg/cm².

- Suma de los momentos de todas las fuerzas con relación a un punto cualquiera, igual a cero. Estos corresponden con las cargas del cultivo y viento, tomando como positivas las fuerzas dirigidas en sentido las manecillas del reloj.

$$\sum M_o = 0$$

$$-M + 1240 \times 1.5 + 308.66 \times \cos 15^\circ \times 3 = 0$$

$$-M + 1860 + 894.39 = 0$$

$$-M + 2754.39 = 0$$

$$M = 2754.9 \text{ N.m}$$

De la misma manera que el cortante máximo se utiliza la formula siguiente de acuerdo con la determinación del momento máximo resultante para calcular el esfuerzo cortante de flexión máximo en la columna, aplicando la formula:

$$\tau_{\max} = \frac{1.5 V_{\max}}{A}$$

$$\tau_{\max} = (1.5) 2754.9 \text{ N.m} / 0.00038608 \text{ m}^2$$

$$\tau_{\max} = 10701370.17 \text{ N/m}$$

$$\tau_{\max} = 109.12 \text{ kg/cm}$$

Se obtiene el factor de seguridad para cortante:

$$113757140 \text{ N/m}^2 / 10701370.17 \text{ N/m} = 10.6$$

Este valor indica que la columna soporta más de 10 veces la carga que le ocasiona el esfuerzo cortante de flexión máximo calculado anteriormente.

Este factor muestra que antes de que se venza la columna por esfuerzo de flexión, la carga que soporta horizontalmente a 1.5 m y a 3 m, es de 1156 kg/cm², arriba de esa carga se provocará la falla ya que el esfuerzo de fluencia en cortante del material es de 1160 kg/cm².

4.5.3. Esfuerzo máximo en tornillo

Por recomendación práctica para la tornillería se elige un tornillo de cabeza hexagonal AC de 3/8" grado 5 el cual tiene una resistencia de 105 a 120 mil psi (lb/in²).

Para conocer los esfuerzos a los que estará sometido el tornillo es necesario aplicar la formula para calcular el esfuerzo cortante simple:

$$\tau_{\text{tornillo}} = \frac{P}{A}$$

Es necesario conocer el área de la sección transversal del tornillo:

$$A = \pi d^2/4$$

$$A = (3.1416) (0.375)^2/4$$

$$A = 0.1104 \text{ in}^2$$

$$A = 0.0000712 \text{ m}^2$$

Se analizará el esfuerzo en los dos tornillos, que se genera en la unión entre la columna y el arco (figura 50), tomando como fuerza cortante máxima la fuerza normal máxima o de compresión en la columna, ya que al ser vertical actúa cortando el tornillo.

Figura 50. Unión de columna y arco mediante dos tornillos



$$\tau_{\text{tornillo}} = 1659.47 \text{ N} / 0.0000712 \text{ m}^2$$

$$\tau_{\text{tornillo}} = 23307162.92 \text{ N/m}^2$$

$$\tau_{\text{tornillo}} = 237.66 \text{ kg/cm}^2.$$

Para obtener el factor de seguridad en cortante se transforma la resistencia del tornillo de 120 mil psi (lb/in²) a N/m² y se divide entre 2 ya que se toma su esfuerzo de fluencia al 50%:

$$120000 \text{ psi (lb/in}^2\text{)} = 827370840 \text{ N/m}^2$$

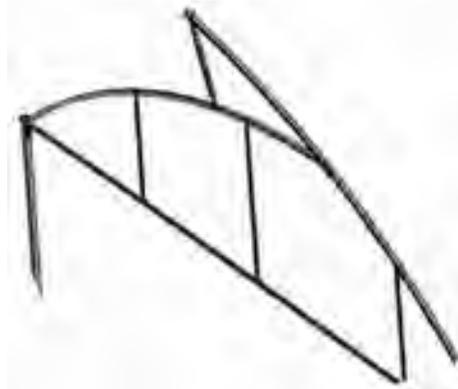
$$827370840 \text{ N/m}^2 / 2 = 413685420 \text{ N/m}^2$$

$$413685420 \text{ N/m}^2 / 23307162.92 \text{ N/m}^2 = 17.74$$

Este valor indica que un solo tornillo soporta más de 17 veces la carga que le ocasiona el esfuerzo cortante, esto muestra que antes de que se venza la unión de la columna con el arco por esfuerzo cortante, un solo tornillo soporta verticalmente una carga de 4040 kg/cm², arriba de esa carga se provocaría la falla con un solo tornillo, ya que el esfuerzo de fluencia en cortante del material es de 4218 kg/cm², pero como se colocan dos tornillos el factor de seguridad aumenta a 35.48 y por lo tanto la carga que toleran antes de vencerse es de 8318 kg/cm² muy cercano al valor de esfuerzo de fluencia en tensión que es de 8436.83 kg/cm²

De igual forma se analizará el esfuerzo en el tornillo, que se genera en la unión entre la columna y la trabe de carga (figura 51), tomando en cuenta la fuerza cortante máxima de 1538.13 N.

Figura 51. Unión de columna y trabe de carga con un tornillo



$$\tau_{\text{tornillo}} = 1538.13 \text{ N} / 0.0000712 \text{ m}^2$$

$$\tau_{\text{tornillo}} = 21602949.43 \text{ N/m}^2$$

$$\tau_{\text{tornillo}} = 220.28 \text{ kg/cm}^2$$

Se obtiene el factor de seguridad:

$$413685420 \text{ N/m}^2 / 21602949.43 \text{ N/m}^2 = 19.14$$

Este valor indica que el tornillo soporta más de 19 veces la carga que le ocasiona el esfuerzo cortante, esto muestra que antes de que se venza la unión de la columna con la trabe de carga por esfuerzo cortante, el tornillo soporta una carga de 4185 kg/cm², arriba de esa carga se provocaría la falla, ya que el esfuerzo de fluencia en cortante del material es de 4218 kg/cm².

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El tipo de invernadero que se considera para la producción de chile manzano en el municipio de Tenancingo, es un túnel modificado con ventila cenital con una superficie de 7.5 m de ancho por 18 m de largo, en total 135 m², con una altura máxima a la cumbre de 5.97 m, asimismo la orientación que se dará al invernadero es Norte-Sur con la finalidad de captar mayor radiación solar.

Los materiales que conformarán la estructura son perfil de acero galvanizado ZC de sección cuadrada calibre 14, con un espesor de 1.9 mm y con recubrimiento de zinc-aluminio galvanizado en caliente.

El tipo de plástico que se implementará es difusor trifilm 703 de 3.5 años de duración, con una transmitancia de luz solar del 50%, que cuenta con termicidad, anti-goteo, anti-polvo y anti-virus además se colocará ground cover blanco en el piso.

Las cargas verticales que soportará la estructura son de 338.439 kgf y las cargas horizontales que resistirá la estructura son de 126.51 kgf; siendo menores a las cargas que puede soportar la estructura propuesta.

El análisis estructural para una columna de dos pulgadas, permitió determinar que por esfuerzo de compresión se puede soportar una carga vertical de 2278.64 kg/cm² y por momento de flexión ocasionado por cortante, soporta una carga horizontal de 1156 kg/cm².

El tornillo AC de cabeza hexagonal de 3/8 de pulgada en la unión de la columna con la trabe de carga soporta una carga de 4185 kg/cm por esfuerzo cortante y los dos tornillos de la unión de la columna con el arco toleran una carga de 8318 kg/cm² por esfuerzo cortante.

Para el control de temperatura alta, se colocará ventilación distribuida entre ventanas laterales y cenital, orientadas perpendicularmente a vientos provenientes del norte que son los dominantes en el sitio.

Para el control de temperaturas bajas, se utilizará plástico térmico y, durante periodos críticos, se colocarán plásticos negros de un metro de altura en las paredes internas, además se incluirán 6 calentadores eléctricos que se activan automáticamente a la

temperatura deseada, estos se distribuirán de forma equidistante en el interior, dos en cada pared lateral y uno en cada pórtico (delantero y trasero).

Para la renovación de la atmósfera interna del invernadero, solo se manejará la ventilación generada entre las ventanas laterales y la cenital.

Para el incremento de la humedad relativa, en periodos de sequía, se aplicará agua por aspersión a cultivo y pasillos.

Se realizará el monitoreo tanto de la temperatura y de la humedad relativa con un termómetro de máximas y mínimas y un higrómetro respectivamente.

El sistema de riego a utilizar es por goteo para eficientar el uso del agua y aplicar adecuadamente la nutrición con base en fertirrigación.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, C.A. y Rodríguez, V.L. 1985. *Alternativas energéticas*. Editorial Fondo de Cultura Económica. México.
- Bastida, T.A. 2006. *Manejo y operación de invernaderos agrícolas*. UACH. Departamento de Preparatoria Agrícola. Chapingo, México.
- Bernart, J.C.; Andrés, V.J. y Martínez, R.J. 1990. *Invernaderos: Construcción, manejo, rentabilidad*. Editorial Aedos. España.
- Castilla, N. 2005. *Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Castro, S.G. 1974. *Construcciones rurales; especificaciones, costo y cálculo estructural*. Patronato de la Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, México.
- CENAMAR. 1981. *Memoria del primer curso del uso de plásticos en la agricultura*. Editorial CENAMAR-SARH. Gómez Palacio, Dgo., México.
- De Buen, O., De Pablo, G. E., Esteva, N. L. y Olagaray, P. C. 1987. *Apuntes de diseño estructural*. Ed. Universitaria. Facultad de Ingeniería. UNAM. México.
- Elías, C.F. y Castellvi, S.F. 2001. *Agrometeorología*. 2ª ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Gere, J.M. 2002. *Mecánica de materiales*. 5ª edición. Editorial Thomson Learning Inc. México.
- Heinen, J.T. y Gutiérrez, J.V. 1975. *Estructuras; parte A, parte B y parte 4. Apuntes didácticos*. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F.
- Iguanero, C.E. 1996. Tesis: *Respuesta del cultivo de chile manzano (Capsicum pubescens R. y P.) al ácido giberélico*. Chapingo, México.
- Jiménez, M. O. 1999. Comp. *Invernaderos (diseño, establecimiento y manejo): antología*. Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria. México, D.F.

- Jones, S. B. Jr. 1988. *Sistemática vegetal*. McGraw-Hill. México, D. F.
- Llamas, G.A. 1995. Tesis: *Diseño estructural de invernaderos*. UACH. Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. Chapingo, México.
- Mercado, M.G. 1993. *Manual de prácticas: Meteorología y Climatología*. 1ª. ed. UNAM. Ciudad Universitaria, México D.F.
- Mott, R.L.; 1999. *Resistencia de materiales aplicada*. 3ª edición. Prentice-Hall Hispanoamericana. México, D.F.
- Papaseit, P.; Badiola, J. y Armengol, E. 1997. *Los plásticos y la agricultura*. Ediciones de horticultura. España.
- Papaseit et al. 1998. *Los plásticos y la agricultura*. Ediciones de horticultura. España.
- Ramírez, R.F. 1997. Tesis: *Reducción del porte de la planta de chile manzano* (*Capsicum pubescens* R. y P.) mediante aplicaciones de N-Dimetilaminosuccinámico (B-9 o Alar). Chapingo, México.
- Robledo, De P.F. y Martín, V.L. 1981. *Aplicación de los plásticos a la agricultura*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Rojas, M.M. 1993. Tesis: *Bases para el diseño funcional de invernaderos*. UACH. Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. Chapingo, México.
- Salazar T., J.; 2001. *Mecánica básica para estudiantes de Ingeniería*. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Manizales, Colombia.
- Serrano, C.Z. 2005. *Construcción de invernaderos*. 3ª. ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Tognoni, F. 2000. *Los cultivos protegidos: Origen y desarrollo*. Memorias del curso internacional "Ingeniería, manejo y operación de invernaderos para la producción intensiva de hortalizas. Editores J. Z. Castellanos y M. Guzmán Palominos. Instituto de capacitación para la productividad agrícola, S. C. Celaya, Gto. México.

Publicaciones

- Aceros Flores S.A. de C.V. Catálogo de productos de la empresa. 2008. México, D.F.
- Díaz, P.G.; Ruíz, C.J.; Medina, G.G. y Serrano, A.V. 2008. *Estadísticas Climatológicas Básicas del Edo. Méx. (Período 1961-2003)*. INIFAP. CIRGOC. Campo Experimental Cotaxtla. Libro Técnico núm. 20. Veracruz, México.
- Espinosa, R.P.; Espinosa, M.L. 1996. *Ficha núm. 9 Invernaderos Rústicos*. SAGARPA. Subsecretaría de Desarrollo Rural. Dirección General de Apoyos para el Desarrollo Rural.
- FAO. 2002. *El cultivo protegido en clima mediterráneo*. Estudio FAO: Producción y Protección Vegetal. Manual preparado por el Grupo de Cultivos Hortícolas, Dirección de Producción y Protección Vegetal. Roma.
- FAO-SAGARPA. 2007. *Programa Especial para la Seguridad Alimentaria, PESA-México*. Proyecto tipo: Producción de hortalizas a cielo abierto y bajo condiciones protegidas. México.
- Linares, O.H. 2004. *Curso de Manejo de Invernaderos. Manual del participante*. Secretaría de la Reforma Agraria. Programa de Jóvenes emprendedores Rurales. México.
- Manual de diseño de Obras Civiles. Comisión Federal de Electricidad. México, D.F.
- Manual para constructores. 1963. Compañía Fundidora de Fierro y Acero de Monterrey, S.A.
- Norma Mexicana: *NMX-E-255-CNCP-2008, Invernaderos-Diseño y Construcción-Especificaciones*. Centro de Normalización y Certificación de Productos, A.C. (CNCP).
- Normas técnicas complementarias para diseño por viento del Distrito Federal (2008).
- Perfiles Comerciales Cuautitlán S.A. de C.V. Catálogo de productos de la empresa. 2009.
- Pérez, G.M. 2007. *Producción intensiva de chile manzano en invernadero*. Compendio de hortalizas del curso de Producción de jitomate en hidroponía. UACH. Departamento de Fitotecnia. Chapingo, México.

Pérez, G.M. y Castro, B.R. 1998. *Guía para la producción intensiva de chile manzano*. Programa nacional de investigación en olericultura. Boletín de divulgación. Chapingo, México.

Sánchez del Castillo, F. 2000. *Tecnología para la producción de hortalizas y flores*. Notas del curso intensivo de hidroponía. Grupo Cresa. Pachuca, Hgo.

Torres, N.H. 2007. *Memoria del Curso: Diseño, fabricación e instalación de invernaderos*. UACH. Chapingo, México.

Viakon, Conductores Monterrey. Catálogo de productos de la empresa. 2009

Revistas

Antonio, O.S. 2006. *Cultivo de chile manzano en zonas altas*. Revista Teorema ambiental. Editorial 3W México. Abril, núm. 57. México.

Antonio, S. 2006. *Invernaderos, las virtudes de un buen diseño*. Revista Teorema ambiental. Editorial 3W México. Octubre, núm. 60. México.

Antonio, O.S. 2008. *Chile manzano en invernadero, ventajas productivas y de mercado*. Revista La Imagen Agropecuaria. Octubre, núm. 1. México.

Licona, O.I. 2007. *Invernaderos, fábricas de alimentos*. Revista La Imagen Agropecuaria. Edición especial impresa: Agroalimentaria Guanajuato. Noviembre. México.

Pacheco, A.A. 2008. *Fundamentos técnicos para el diseño y construcción de invernaderos*. Revista Teorema ambiental/2000Agro. Editorial 3W México. Agosto, núm. 71. México.

Perea, E. 2007. *Invernaderos para todo el año y tipos de clima*. Revista 2000Agro. Editorial 3W México. Octubre, núm. 47. México.

Internet

Cabezas, A.C. 2002. *Nutrición vegetal en flor de corte en el sur del Estado de México*. Grupo Visaflor S.A. de C. V. Villa Guerrero, Estado de México. Saltillo, Coahuila. www.uaaan.mx/academic/Horticultura.

Consejo Nacional de Productores de Chiles, S.C., 2007

Enciclopedia de los Municipios de México, Estado de México. 2005.
Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal.
Secretaría de Gobernación. www.e-local.gob.mx.

Herrera, R.G. 2004. Proyecto: “*Diseño y construcción de invernaderos de bajo costo*”.
U.A.Q. Dirección de Investigación y Posgrado, catálogo de investigación 2004.
Financiado por Fundación PRODUCE Querétaro, A.C.
www.uaq.mx/investigación/catálogo/2004.

Hewninger, F. *et al.* *Características de los plásticos utilizados en la protección de cultivos*. <http://www.cepla.com/1.html>.

Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Tenancingo 1997-2000, Estado de México.

Servicio Sismológico Nacional (SSN). www.ssn.unam.mx.

VII. ANEXOS

Tabla 8. Espesores medios más comunes de los filmes

Tipo de plástico	Espesor		Duración
	Micras	Galgas	
Polietileno "normal" (sin aditivos)	150	600	6-8 meses
Polietileno "larga duración"	180	720	2 años
Polietileno "Térmico larga duración"	200	800	2 años
Copolímero EVA (12% AV)	200	800	2 años
Copolímero EVA (6% AV)	100	400	1 año

Fuente: Hewninger *et al*, 2000.

Tabla 9. Peso y superficie de plásticos de diferentes películas de plásticos

Espesor (Micras)	Peso en gramos de un m ²			Superficie en m ² de un kilo		
	Polietileno	EVA	PVC	Polietileno	EVA	PVC
30	27	28	39	36.4	36.0	25.6
40	37	37	52	27.3	27.0	19.2
50	46	46	65	21.9	21.6	15.4
80	73	74	104	13.7	13.5	9.6
100	92	93	130	10.9	10.8	7.7
120	110	111	156	9.1	9.0	6.4
135	124	125	176	8.1	7.2	5.7
150	137	139	195	7.3	6.5	5.1
180	165	167	234	6.1	6.0	4.3
200	183	185	260	5.5	5.4	3.8
300	275	278	390	3.6	3.6	2.6

Fuente: Núñez *et al*, 1998.

Tabla 10. Porcentaje de transparencia a la radiación solar de las películas de plástico

Tipo de lámina	Tipo de energía				
	UV	Visible	IR cercano	IR lejano	Global
Polietileno (PE)	78-84	84-90	70-89	80	90
Polietileno térmico (Pet)	90	-	20-40	90	-
Policloruro de vinilo (PVC)	72	90	90	32	90
Etileno vinilo de acetato (EVA)	-	90	-	38-55	90
Doble cubierta de polietileno	-	83	-	66	83

Fuente: Papaseit *et al*, 1998.

Tabla 11. Comparación de materiales flexibles para cubiertas de invernaderos

Características	Poliétileno (larga duración)	Poliétileno (térmico)	E.V.A. (2 láminas)	P.V.C. (2 láminas)	Teraftalato de etileno
Densidad	0.92 a 0.93	0.95	0.94 a 0.95	-	1.4
Peso (g/m ²)	165	170	169 a 171	275	175
Espesor (micras μ)	180	180	180	200	125
Resistencia a la tracción (kg/cm ² a 23° C)	165 a 480	-	>230	250	600 a 800
Trasmisión luz visible (%)	80 a 90	70 a 80	85	60 a 70	85 a 90
Permeabilidad infrarrojo onda larga (%)	60 a 70	15 a 30	15 a 20	-	<10
Duración promedio (años)	3 a 4	2 a 3	2 a 3	5	10 a 15
Precios comparados (base 100)	100	103 a 105	140 a 145	450 a 480	615

Fuente: Bernat *et al*, 1990.

Tabla 12. Superficies, pesos y densidad de láminas flexibles

Características	Grosor (micras)	Poloetileno de baja densidad (PEBD)	Policloruro de vinilo (PVC)	Acetato de vinilo (EVA)	
Densidad (g/cm ²)		0.925	1.3	0.925	
	30	27	39	28	
	40	37	52	37	
	50	46	65	46	
	80	73	104	74	
	100	92	130	93	
	Peso (g/m ²)	120	110	156	111
		135	124	176	125
		150	137	195	139
		180	165	234	167
200		183	260	185	
300		275	390	278	
Superficie (m ² /kg)		30	36.4	25.6	36.0
	40	27.3	19.2	27.0	
	50	21.9	15.4	21.6	
	80	13.7	9.6	13.5	
	100	10.9	7.7	10.8	
	120	9.1	6.4	9.0	
	135	8.1	5.7	8.0	
	150	7.3	5.1	7.2	
	180	6.1	4.3	6.0	
	200	5.5	3.8	5.4	
300	3.6	2.6	3.6		

Fuente: Papaseit *et al*, 1997.

Tabla 13. Factor de variación con la altura $F\alpha$

z	$F\alpha$
$z \leq 10$ m	1.0
si $10 \text{ m} < z < \delta$	$(z/10) \alpha$
si $z \geq \delta$	$(\delta/10) \alpha$

Fuente: Diseño por viento del Distrito Federal, 2008.

Tabla 14. Factor F_{TR} (Factor de topografía y rugosidad del terreno)

Tipos de topografía	Rugosidad de terrenos en alrededores		
	Terreno tipo R2	Terreno tipo R3	Terreno tipo R4
T1 Base protegida de promontorios y faldas de serranías del lado de sotavento	0.80	0.70	0.66
T2 Valles cerrados	0.90	0.79	0.74
T3 Terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores de 5 % (normal)	1.00	0.88	0.82
T4 Terrenos inclinados con pendientes entre 5 y 10 %	1.10	0.97	0.90
T5 Cimas de promontorios, colinas o montañas, terrenos con pendientes mayores de 10 %, cañadas o valles cerrados	1.20	1.06	0.98

Fuente: Diseño por viento del Distrito Federal, 2008.

Tabla 15. Rugosidad del terreno α y δ

Tipos de terreno	α	δ , m
R1 Escasas o nulas obstrucciones al flujo de viento, como en campo abierto	0.099	245
R2 Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones	0.128	315
R3 Zona típica urbana y suburbana. El sitio está rodeado predominantemente por construcciones de mediana y baja altura o por áreas arboladas y no se cumplen las condiciones del Tipo R4	0.156	390
R4 Zona de gran densidad de edificios altos. Por lo menos la mitad de las edificaciones que se encuentran en un radio de 500 m alrededor de la estructura en estudio tiene altura superior a 20 m	0.170	455

Fuente: Diseño por viento del Distrito Federal, 2008.

Tabla 16. Coeficientes de presión C_p para cubiertas en arco¹

Relación $r = a/d$	A	B	C
$r < 0.2$	-0.9	—	—
$0.2 < r < 0.3 - r$	$3r - 1$	-0.7	-0.5
$r > 0.3$	$1.42 r$	—	—

Fuente: Diseño por viento del Distrito Federal, 2008.

Tabla 17. Coeficiente C_p para construcciones cerradas

	C_p
Pared de barlovento	0.8
Pared de sotavento ¹	-0.4
Paredes laterales	-0.8
Techos planos	-0.8
Techos inclinados lado de sotavento	-0.7
Techos inclinados lado de barlovento ²	$-0.8 < 0.04 \theta - 1.6 < 1.8$
Techos curvos ver tabla 3.5	ver tabla xx y fig. xx

1 La succión se considerará constante en toda la altura de la pared de sotavento y se calculará para un nivel z igual a la altura media del edificio.

2 θ es el ángulo de inclinación del techo en grados.

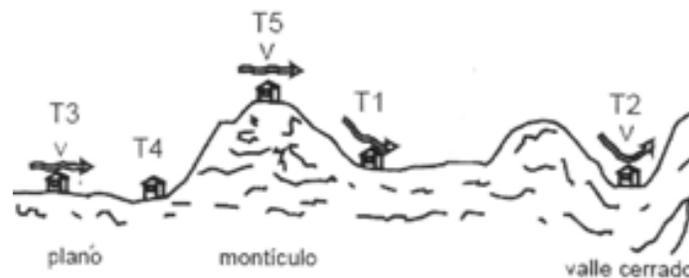
Fuente: Diseño por viento del Distrito Federal, 2008.

Tabla 18. Coeficientes de presión para elementos de recubrimiento en cubiertas de arco

zona	Área tributaria	
	$A \leq 10$	$A > 10$
1	1.2	1.15
2	1.4	1.3

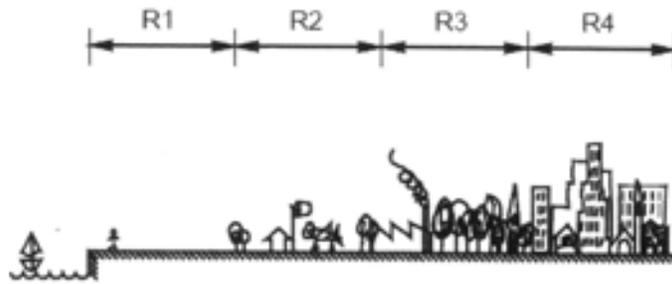
Fuente: Diseño por viento del Distrito Federal, 2008.

Figura 52. Formas topográficas locales



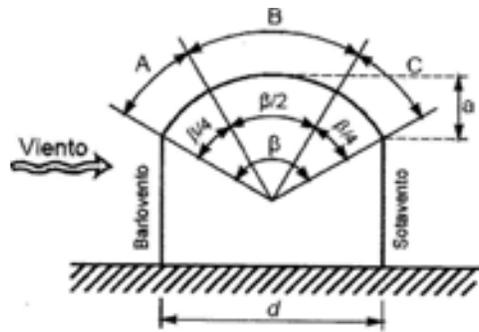
Fuente: Diseño por viento del Distrito Federal, 2008.

Figura 53. Rugosidad de terreno



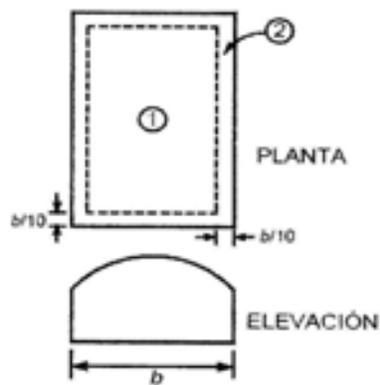
Fuente: Diseño por viento del Distrito Federal, 2008.

Figura 54. Cubiertas en arco



Fuente: Diseño por viento del Distrito Federal, 2008.

Figura 55. Elementos de recubrimiento en cubiertas en arco



Fuente: Diseño por viento del Distrito Federal, 2008.