

**Universidad de Costa Rica**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Agrícola**

**Análisis y Diseño Estructural de  
Invernaderos en Laderas**

Trabajo Final de Graduación presentado a la Facultad de Ingeniería  
como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería  
Agrícola

*Christian Solís Salazar*

**Ciudad Universitaria Rodrigo Facio**  
**Julio de 2015**

Sometido a la Escuela de Ingeniería Agrícola de la Facultad de Ingeniería de la Universidad  
de Costa Rica como requisito para optar por el grado de:  
**LICENCIADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA**

Aprobado por el Tribunal:

---

Ing. Giovanni Carmona Villalobos  
Miembro del Tribunal

---

Ing. Carlos Manuel Benavides León. M.Sc.  
Director, Comité Asesor

---

Ing. Miguel Cruz Azofeifa, Dr. Sc  
Miembro, Comité Asesor

---

Ing. George Govaere Vicariolí, PhD.  
Miembro, Comité Asesor

---

Ing. Juan Gabriel Monge Gapper, M.Sc.  
Miembro del Tribunal

## **Dedicatoria**

*A mis padres, quienes siempre me han guiado y apoyado, y son un gran ejemplo de trabajo, dedicación y de siempre mirar y seguir hacia adelante.*

## **Agradecimientos**

*Agradezco primeramente a Dios por darme la salud, fortaleza y sabiduría para el logro de este proyecto, de mis metas y objetivos personales*

*Al Ing. Carlos Benavides León, M. Sc. por su paciencia y colaboración a lo largo del proyecto*

*A los Ingenieros Miguel Cruz Azofeifa, Dr.Sc. y Georges Govaere Vicarioli Ph.D, tutores en el proyecto.*

*A mi familia, amigos y colegas de universidad, por el apoyo brindado.*

# Índice general

Dedicatoria .....	ii
Agradecimientos .....	ii
Índice de figuras .....	v
Índice de tablas .....	vi
Índice de gráficos .....	viii
Nomenclatura .....	ix
Resumen .....	xi
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Tema de investigación.....	2
1.2. Planteamiento del problema .....	2
1.3. Objetivo de la investigación.....	5
1.3.1. Objetivos específicos .....	5
<b>Capítulo 2. Revisión de literatura.....</b>	<b>6</b>
2.1. Definición y Generalidades .....	6
2.2. Tipos de Invernaderos .....	7
2.3. Material de la cubierta.....	9
2.4. Material para la estructura principal.....	10
2.5. Construcción y estabilidad estructural .....	11
2.6. Definición cargas estructurales .....	12
2.7. Parámetros para el establecimiento del Periodo de retorno de diseño de la ráfaga de viento .....	23
2.8. Normativa aplicable al diseño de invernaderos.....	27
<b>Capítulo 3. Metodología de análisis y diseño de prototipos .....</b>	<b>28</b>
3.1. Efecto de la carga de viento .....	29
3.1.1. Metodología ASCE (2010) aplicada en la zona de Fraijanes, Alajuela.....	31
3.1.2. Metodología RCCR (1983) aplicada en la zona de Fraijanes, Alajuela. ....	33
3.2. Efecto de la pendiente en la respuesta estructural y costo de un invernadero.....	34
<b>Capítulo 4. Efecto de la carga de viento.....</b>	<b>45</b>
4.1. Probabilidad de ocurrencia asociada a la vida útil de la instalación .....	45
4.2. Metodología ASCE (2010) aplicada en la zona de Fraijanes, Alajuela. ....	47
4.3. Metodología RCCR (1983) aplicada en la zona de Fraijanes, Alajuela. ....	56
4.4. Comparación de metodologías de carga de viento.....	57

<b>Capítulo 5. Efecto de la pendiente en la respuesta estructural y costo de un invernadero .....</b>	<b>61</b>
5.1. Cargas estructurales:.....	61
5.2. Aplicación de las cargas sobre la estructura.....	65
5.3. Resultados del análisis estructural.....	67
5.4. Comprobación de las secciones y elementos de las estructuras .....	69
5.5. Costos diferenciales para los diferentes casos de análisis .....	79
<b>Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>83</b>
6.1. Conclusiones .....	83
6.2. Recomendaciones .....	86
<b>Bibliografía .....</b>	<b>88</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>91</b>
Anexo A: Variables para la metodología ASCE (2010).....	91
Anexo B: Comprobación de la resistencia de elementos ante combinación de esfuerzos..	103
Anexo C: Pruebas estadísticas para la bondad de ajuste .....	105
Anexo D: Carga de viento para los diferentes casos de análisis.....	108
Anexo E: Carga sísmica para los diferentes casos de análisis .....	109

# Índice de figuras

## Capítulo 2

Figura 2. 1 Tipo de invernadero capilla, a) techo en arco. b) techo a dos aguas, tomado de Ramírez, Aguilar y León (2010) .....	8
Figura 2. 2 Tipo de invernadero multi capilla, tomado de Ramírez, Aguilar y León (2010) .....	8
Figura 2. 3 Tipo de invernadero dentado, tomado de Ramírez, Aguilar y León (2010) .....	9
Figura 2. 4 Cambio en la velocidad del viento debido al efecto de las montañas, tomado de Durán (2012) .....	14
Figura 2. 5 Pasos para determinar las cargas de viento según metodología ASCE (2010) .....	15

## Capítulo 3

Figura 3. 1 Localización de la Finca Experimental Fraijanes .....	29
Figura 3. 2 Marcos Prototipo con techo a dos aguas, tomado de Acuña (2013) .....	34
Figura 3. 3 Vista superior a altura de canoa (5 m) y posición de los marcos en la estructura, adaptado de Acuña (2013) .....	35
Figura 3. 4 Colocación del prototipo bajo condiciones de pendiente .....	35
Figura 3. 5 Invernadero a nivel en condiciones de topografía plana .....	36
Figura 3. 6 Invernadero a nivel en condiciones de ladera del 20%, exposición B .....	36
Figura 3. 7 Invernadero en condiciones de ladera del 20%, exposición B .....	37
Figura 3. 8 Invernadero a nivel en condición de ladera a 40%, exposición B .....	37
Figura 3. 9 Invernadero en condición de ladera a 40%, exposición B .....	37
Figura 3. 10 Invernadero a nivel en condiciones de ladera de 20%, exposición C .....	38
Figura 3. 11 Invernadero en condiciones de ladera a 20%, exposición C .....	38
Figura 3. 12 Invernadero a nivel en condición de ladera a 40%, exposición C .....	38
Figura 3. 13 Invernadero en condiciones de ladera a 40% .....	38
Figura 3. 14 Selección del ancho tributario para el marco frontal (naranja) y el marco interno 2 (azul) .....	41

## Capítulo 4

Figura 4. 1 Condición 1 para el uso de factor topográfico .....	49
Figura 4. 2 Condición 2 para el uso de factor topográfico .....	50
Figura 4. 3 Condición 3 para el uso de factor topográfico .....	51
Figura 4. 4 Condición 4 para el uso de factor topográfico .....	51
Figura 4. 5 Condición 5 para el uso de factor topográfico .....	52
Figura 4. 6 Presiones de viento en las caras de un invernadero parcialmente cerrado, con una ráfaga de viento en dirección longitudinal para diferentes periodos de retorno y metodologías de cálculo .....	58
Figura 4. 7 Presiones de viento en las caras del invernadero parcialmente cerrado, con una ráfaga de viento en dirección transversal para diferentes periodos de retorno y metodologías de cálculo .....	59

## Capítulo 5

Figura 5. 1 Pendientes estudiadas: a) Pendiente de 0° (0%). b) Pendiente 11,3° (20%). c) Pendiente 21,8° (40%) .....	61
Figura 5. 2 Aplicación de la carga de viento en el marco interno 3 para el caso de análisis 9...	65
Figura 5. 3 Aplicación de la carga de cultivos para el caso de análisis 9 .....	65
Figura 5. 4 Aplicación de la carga de mantenimiento para el caso de análisis 9 .....	66
Figura 5. 5 Aplicación de la carga de sismo en el marco interno 3 para el caso de análisis 9 ...	66
Figura 5. 6 Esfuerzos máximos aplicados sobre la Columna 20 del invernadero bajo las condiciones del caso 6 y 8 .....	70
Figura 5. 7 Esfuerzos máximos aplicados sobre la Columna 13 del invernadero bajo las condiciones del caso 2 y 4 .....	71
Figura 5. 8 Deformaciones en la Columna 20 para los casos 6 y 8 con la sección original (arriba) y la sección ajustada (abajo) .....	74

## Índice de tablas

### Capítulo 2

Tabla 2. 1 Categorización de la rugosidad y exposición de los alrededores del sitio de construcción según ASCE (2010), traducido por Duran (2013) .....	17
Tabla 2. 2 Presión básica de viento a diferentes alturas según el lugar de construcción, tomado del Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU) (1983) .....	20
Tabla 2. 3 Factores de forma según tipo de edificación, tomado de INVU (1983) .....	21
Tabla 2. 4 Distribuciones de probabilidad para el ajuste de información hidrológica, tomado de Ven Te Chow, Maidment y Mays (1994) y García (2013) .....	24
Tabla 2. 5 Factor de ráfaga para distintas categorías del terreno según Sachs (1978) .....	26

### Capítulo 4

Tabla 4. 1 Velocidad promedio máxima horaria de la Estación de Fraijanes según datos del IMN y la Velocidad de Ráfaga asociada .....	47
Tabla 4. 2 Resultado de pruebas de verificación o bondad de ajuste .....	49
Tabla 4. 3 Variables topográficas para el análisis del factor de topografía .....	52
Tabla 4. 4 Variables y factores utilizadas y calculadas para el análisis de la presión de viento de diseño .....	53
Tabla 4. 5 Coeficientes de presión externa en paredes según tipo de cerramiento, $C_p$ .....	54
Tabla 4. 6 Coeficientes de presión externa para techos arqueados $C_p$ y $C_N$ .....	55

## Capítulo 5

Tabla 5. 1 Cargas temporales aplicadas a los 9 casos de análisis.....	61
Tabla 5. 2 Cargas permanentes aplicadas a los 9 casos de análisis .....	62
Tabla 5. 3 Carga de viento para los 9 casos de análisis.....	62
Tabla 5. 4 Presiones de viento sobre las caras del invernadero según la dirección del viento para el caso de análisis 9.....	63
Tabla 5. 5 Variables utilizadas para el cálculo del coeficiente sísmico.....	64
Tabla 5. 6 Cargas sísmicas para el caso de análisis 9.....	64
Tabla 5. 7 Esfuerzos máximos obtenidos para los casos de análisis 1, 2, 4, 6 y 8 .....	67
Tabla 5. 8 Ejemplo de comprobación de sección para la combinación de esfuerzos axiales y de flexión .....	72
Tabla 5. 9 Ejemplo de comprobación de sección ante esfuerzos de compresión .....	73
Tabla 5. 10 Variación del peso de la estructura del invernadero según el caso de análisis.....	74
Tabla 5. 11 Secciones utilizadas en la estructura del invernadero para los distintos casos de análisis .....	75
Tabla 5. 12 Esfuerzos máximos obtenidos para todos los casos de análisis, incluyendo el cambio de secciones .....	76
Tabla 5. 13 Costos unitarios que generan costos diferenciales .....	79
Tabla 5. 14 Costos diferenciales del invernadero bajo el caso de análisis 1 .....	79
Tabla 5. 15 Costos diferenciales del invernadero bajo condiciones de pendiente a un 20% .....	80
Tabla 5. 16 Costos diferenciales del invernadero bajo condiciones de pendiente a un 40% .....	81

## Anexos

Tabla A. 1 Categorización de la rugosidad y exposición .....	91
Tabla A. 2 Factor de Topografía, $K_{zt}$ .....	92
Tabla A. 3 Factor de topografía, $K_{zt}$ (continuación).....	93
Tabla A. 4 Factor de direccionalidad, $K_d$ .....	94
Tabla A. 5 Factor de exposición de presión de velocidad, $K_z$ .....	95
Tabla A. 6 Coeficientes de presión interna, $GC_{pi}$ .....	96
Tabla A. 7 Coeficiente de presión externa, $C_p$ , para tipo de cerramiento cerrado o parcialmente cerrado .....	97
Tabla A. 8 Coeficiente de presión externa, $C_N$ , para tipo de cerramiento abierto .....	98
Tabla A. 9 Coeficiente de presión externa, $C_N$ , para tipo de cerramiento abierto (continuación) .....	99
Tabla A. 10 Coeficiente de presión externa, $C_p$ , para techos en arco.....	100
Tabla A. 11 Coeficiente de presión externa, $C_p$ , para techos en arco.....	101
Tabla A. 12 Casos de diseño para carga de viento .....	102
Tabla B. 1 Comprobación de elementos ante cargas axiales y de flexión, según método LRFD ...	103
Tabla B. 2 Comprobación de elementos ante cargas de compresión .....	104
Tabla C. 1 Prueba Kolmogorov-Simironov.....	105
Tabla C. 2 Prueba Anderson-Darling .....	106
Tabla C. 3 Prueba Chi-Cuadrado.....	107

## Índice de gráficos

### Capítulo 4

Gráfico 4. 1 Riesgo de que ocurra al menos un evento asociado a un periodo de retorno según su vida útil.....	45
Gráfico 4. 2 Velocidad ráfaga de viento asociada a un periodo de retorno.....	48
Gráfico 4. 3 Aumento de la Presión Básica de viento al aumentar la velocidad de ráfaga .....	54

### Capítulo 5

Gráfico 5. 1 Costos diferenciales por unidad de área para un invernadero para todos los casos de análisis. ....	82
Gráfico 5. 2 Costos por unidad de área para un invernadero desglosados por sus costos diferenciales .....	82

## Nomenclatura

$SC$	Sitio de construcción
$H$	Altura de la montaña del sitio de construcción (m)
$H/2$	Altura media de la montaña del sitio de construcción (m)
$L_h$	Distancia horizontal desde la cima de la montaña hasta la altura media ( $H/2$ ) (m)
$x$	Distancia horizontal desde la cima de la montaña hasta el sitio de construcción (m)
$z$	Distancia vertical desde el nivel del terreno hasta el sitio de construcción (m)
$V$	Velocidad de una ráfaga de viento de 3 segundos medida a una altura de 10 m (m/s)
$K_1$	Factor que maximiza la aceleración del viento por el efecto topográfico
$K_2$	Factor que reduce la aceleración del viento por la distancia del sitio de construcción respecto a la cima de la montaña
$K_3$	Factor que reduce la aceleración del viento por la distancia del sitio de construcción respecto a la altura del nivel de terreno
$K_{zt}$	Factor de topografía, se tienen en cuenta los factores $K_1$ , $K_2$ y $K_3$ .
$K_z$	Coefficiente de presión debido a la altura del edificio
$K_d$	Factor de direccionalidad del viento
$q_z$	Presión básica del viento ( $N/m^2$ )
$p_z$	Presión de diseño debido a la carga de viento ( $N/m^2$ )
$G$	Factor de ráfaga
$GC_{pi}$	Coefficiente de presión interna según el tipo de cerramiento
$GC_p$	Coefficiente de presión externa
$h$	Altura promedio del edificio medida verticalmente desde el nivel del terreno (m)
$C_N$	Coefficiente de presión externa para techos en tipo de cerramiento abierto
$C$	Factor de forma
$A$	Área expuesta ( $m^2$ )
$T$	Periodo de retorno
$p$	Probabilidad de ocurrencia de un evento
$N$	Vida útil del material o estructura

$CU$	Carga última de diseño
$CP$	Carga permanente
$CT$	Carga temporal
$CS$	Carga sísmica
$CE$	Carga de empuje
$f_I$	Factor de probabilidad de ocupación
$f_R$	Factor de reducción de carga temporal
$CVL$	Carga de viento en sentido longitudinal al invernadero
$CVT$	Carga de viento en sentido transversal al invernadero
$D$	Variable estadística para la prueba de ajuste Kolmogorov-Smirnov
$A^2$	Variable estadística para la prueba de ajuste Anderson-Darling
$X^2$	Variable estadística para la prueba de ajuste Chi-Cuadrado
$a_e$	Aceleración pico efectiva
$I$	Factor de importancia de la edificación
$\mu$	Ductilidad global asignada
$SR$	Factor de sobrerresistencia
$FED$	Factor espectral dinámico
$C$	Coefficiente Sísmico
$LRFD$	Factor de Diseño de Carga y Resistencia
$P$	Esfuerzo Axial
$V_x, V_y$	Esfuerzos cortantes
$M_x, M_y$	Esfuerzos de momento

## **Resumen**

Este proyecto evalúa la resistencia estructural de un prototipo de ambiente protegido a construirse bajo diferentes condiciones de pendientes de laderas y categorías de exposición. Se analiza también los costos diferenciales de la inversión inicial de este prototipo, para compararla con la alternativa de construirlo en terraza.

Debido a la inexistencia de códigos o normativas específicas para la construcción de ambientes protegidos en Costa Rica, así como la carencia de un código para el análisis del viento que establezca las recomendaciones de velocidad de ráfaga de viento para el diseño, se utilizaron las metodologías para el análisis de la carga de viento propuestas por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles del 2010 (ASCE, por sus siglas en inglés) y del Reglamento de Construcciones de Costa Rica de 1983 (RCCR).

Se aplicó un modelo demostrativo del análisis de velocidades de viento y carga a estructura, utilizando las metodologías del ASCE (2010) y el RCCR (1983), adecuadas a la zona de Fraijanes, integrando modelos de distribución estadísticos para la comparación de las presiones de viento en las caras del invernadero asociadas a un periodo de retorno para diferentes vidas útiles de la estructura principal y el material de cobertura.

Se desarrolló un segundo modelo demostrativo que evaluó la resistencia estructural de un invernadero bajo condiciones de pendiente, comparando resultados con un invernadero similar bajo condiciones de topografía plana.

Este estudio se basó en uno de los prototipos de invernadero más económicos generados por Acuña (2013), por lo que el prototipo con techo a dos aguas, de 9 m de ancho, 18 metros de largo y 5m de altura de canoa, fue analizado para diferentes condiciones de pendiente y categorías de exposición. Se utilizó el programa SAP 2000 para la modelación y el análisis estructural y se evaluaron las secciones según las recomendaciones del Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI, por sus siglas en inglés), para acero laminado en frío.

Se concluyó que no hay diferencias significativas en la demanda de resistencia estructural de invernaderos en suelos horizontales respecto a invernaderos construidos en pendiente, siempre y cuando se mantenga la misma categoría de exposición.

Se confirmó que para invernaderos en pendiente, la carga de viento rige el diseño de las estructuras. La combinación del cambio en la categoría de exposición y el aumento del factor de topografía son impactantes en los esfuerzos que debe soportar la estructura, generando aumentos en la presión básica de viento de hasta un 78%.

El diseño estructural diferenciado que considere la vida útil y el riesgo de los materiales de cobertura y estructura de un invernadero ante una determinada amenaza, hace más preciso el diseño. Para el caso de Fraijanes se obtuvo una reducción en las presiones máximas de viento generadas entre un 35% para estructuras metálicas y un 42% para coberturas plásticas, comparándolas con respecto a la presión de viento generada por una ráfaga de 100 km/h, recomendada por RCCR (1983).

La construcción de invernaderos en pendiente, resistentes y adecuados a las condiciones del lugar, sin hacer terrazas, disminuye los costos en la inversión inicial desde 2,5 hasta 5 veces respecto a construirlos en terrazas.

# Capítulo 1. Introducción

La construcción y el uso de invernaderos en el trópico presentan un auge por la ventaja de ayudar a mitigar el efecto del clima y las plagas que enfrentan los cultivos en campo abierto y la posibilidad de programar las cosechas.

Estrada (2012), define un invernadero como: “Una construcción cuya cubierta o techo es de un material que deja pasar la luz solar, facilitando la acumulación de calor durante el día y desprendiéndolo lentamente durante la noche, cuando las temperaturas descienden drásticamente”, además agrega que “un invernadero permite controlar el ambiente interno, modificando el clima y creando las condiciones para el desarrollo de los cultivos en cualquier época del año”.

De acuerdo con la Fundación para la Innovación Tecnológica (2009), la utilización de ambientes protegidos data desde los tiempos de los romanos, donde las plantas se colocaban bajo telas impregnadas en aceite, posteriormente aparecieron invernaderos construidos con vidrio, y el uso de materiales plásticos como material de cubierta se inició en 1948 en Estados Unidos, donde se utilizó papel celofán para cubrir una estructura de madera.

Según la Universidad de Arizona (2012), para el año 2011 los tres principales países con superficie utilizada por invernaderos eran: China con 2.760.000 ha, Corea del Sur con 57.444 ha y España con 52.170 ha.

Costa Rica no se queda atrás en la utilización de ambientes protegidos, según Marín (2010) en un estudio realizado por el Programa Nacional Sectorial de Producción Agrícola bajo Ambientes Protegidos (ProNAP), para el año 2009, el país contaba con 688 hectáreas de área cultivada en ambientes protegidos (principalmente para plantas ornamentales y hortalizas), en las cuales, las provincias de Alajuela y Cartago cubren en conjunto un 80% de la superficie total de ambientes protegidos en el país, presentando estos sitios topografías irregulares con considerables pendientes.

## **1.1. Tema de investigación**

Análisis y Diseño Estructural de Invernaderos en Laderas

## **1.2. Planteamiento del problema**

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2011), para facilitar el manejo operativo dentro de las instalaciones de un invernadero, se recomiendan pendientes de terreno entre el 0,5% y 1%. Es por ello que las tecnologías aplicadas en ambientes protegidos que ayudan al comportamiento térmico, riego y diseño estructural, son aplicadas primordialmente a terrenos nivelados.

Según Barquero (2003), las pendientes mayores al 5% aumentan la exposición directa a vientos fuertes que pueden ocasionar problemas en la estructura o puedan levantar la cubierta de plástico.

Desarrollar tecnología para diseñar, construir y operar ambientes protegidos en pendiente es de mucha importancia en un país como Costa Rica, ya que según Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (2014), el país posee un 73% de su territorio en zonas de ladera y tierras altas, es decir unos 37.233 km<sup>2</sup>. Actualmente se deben realizar cortes en los taludes de las laderas para la creación de terrazas, o terrenos más nivelados, que garanticen pendientes mínimas en donde la tecnología actual de diseño y construcción de invernaderos pueda aplicarse, situación que encarece los proyectos de construcción de ambientes protegidos debido al gran movimiento de tierra.

La construcción de invernaderos en laderas puede convertirse en una solución para disminuir los costos de construcción y promover un mayor crecimiento en este tipo de instalaciones en el país.

Por otra parte, la escasa información disponible en el país en cuanto al análisis y diseño de estructuras para ambientes protegidos en pendiente, obliga a los pequeños productores a crear sus propios diseños. Como menciona Acuña (2013), construir invernaderos artesanales con

métodos empíricos, comprometen la estabilidad, la duración y funcionalidad de las instalaciones, lo cual repercute en la competitividad de la actividad agrícola que se desarrolla.

Con el fin de conocer la información técnica disponible en el país sobre temas relacionados con análisis y diseño estructural de invernaderos, se realizó una investigación bibliográfica en las principales revistas académicas nacionales como: Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, El portal de revistas del Tecnológico de Costa Rica, Portal electrónico de Revistas Académicas de la Universidad Nacional, Revistas DOAJ (Directorio de Revistas de Acceso Abierto por sus siglas en inglés) de la Earth, la Revista Agronomía Costarricense y la Revista Agronomía Mesoamericana, y no se encontró ninguna publicación en el periodo de búsqueda del año 1990 al 2014.

En la Escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica se han realizado 2 trabajos finales de graduación sobre el tema de análisis y diseño estructural para invernaderos. Acuña (2013) realizó un estudio con invernaderos construidos con acero laminado en frío, y Durán (2013) realizó un estudio similar con invernaderos construidos con bambú. Estas investigaciones proponen una metodología para el análisis y diseño estructural que fue aplicada a invernaderos en terrenos horizontales por lo que se considera de gran relevancia aplicarla al caso de invernaderos en pendiente y evaluar si existen diferencias significativas en costo entre los dos casos.

Por otra parte, una gran cantidad de diseños estructurales de invernaderos se basan en la Norma Europea EN 13 301-1, en la cual se establecen periodos mínimos de diseño entre los 5 y los 15 años de vida útil de las estructuras.

Un invernadero se caracteriza por ser utilizado para la producción agrícola, con una presencia de humanos mínima dentro de la estructura. Es por ello que según el Código Sísmico de Costa Rica, un invernadero es clasificado como una estructura tipo E (Construcción agrícola y edificios de baja ocupación). Según Patiño (2007), este tipo de estructuras se recomienda diseñar con ráfagas de viento con un periodo de retorno de 25 años. Al no existir un código o normativa para el diseño y la construcción de invernaderos en Costa Rica, estas

recomendaciones no siempre se cumplen y se diseña indistintamente para ráfagas de viento de 100 km/h, según lo recomendado por el Reglamento de Construcciones de Costa Rica del año 1983.

En este trabajo se aplicó un procedimiento de análisis y diseño estructural acorde a la vida útil tanto del plástico de cobertura como de la estructura principal en su ubicación específica con lo cual se pretende generar métodos de análisis que apoyen la competitividad de la actividad agrícola

Por los motivos expuestos, se plantea la hipótesis de que no hay diferencias significativas en la demanda de resistencia estructural de invernaderos en suelos horizontales respecto a invernaderos construidos en pendiente.

### **1.3. Objetivo de la investigación**

Estudiar el efecto de la carga de viento y la pendiente del terreno en el diseño estructural de instalaciones para agricultura protegida para promover la construcción formal de estas instalaciones.

#### **1.3.1. Objetivos específicos**

- ✓ Estudiar las velocidades del viento tomando como ejemplo la zona de Fraijanes para establecer el periodo de retorno más adecuado a utilizar en el diseño y comparar resultados con el Reglamento de Construcciones de Costa Rica.
- ✓ Realizar el análisis y el diseño estructural de un prototipo de instalación para ambiente protegido con techo a dos aguas, en diferentes pendientes y con diferentes tipos de exposición, para comparar la cantidad de acero requerido con instalaciones similares a nivel.
- ✓ Valorar el efecto en inversión inicial de hacer movimientos de tierra para establecer terrazas en zonas de ladera contra la construcción del invernadero en pendiente.

## Capítulo 2. Revisión de literatura

### 2.1. Definición y Generalidades

De acuerdo con el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria en Costa Rica y la Agencia Española de Cooperación Internacional (2005), un invernadero es una instalación cubierta y abrigada artificialmente con materiales transparentes para proteger las plantas del medio ambiente. Serrano (2005) agrega que estas instalaciones permiten el control de determinados parámetros productivos como la temperatura ambiental y del suelo, la humedad relativa, la concentración de dióxido de carbono, la luz, entre otros, en lo más cercano posible al óptimo para el desarrollo de los cultivos que se establezcan, para que el volumen interior del recinto permita el desarrollo de los cultivos en todo su ciclo vegetativo.

Según Serrano (2005), la utilización de invernaderos tiene sus ventajas y desventajas, entre ellas están:

#### **Ventajas:**

- Cultivar fuera de la época y conseguir mayor precocidad.
- Realizar cultivos en determinadas zonas climáticas y épocas estacionales en que no es posible hacerlos al aire libre.
- Disminuir el tiempo de los ciclos vegetativos de las plantas, permitiendo obtener mayor número de cosechas por año.
- Aumento de la producción y una mejor calidad de los productos.

#### **Desventajas:**

- Alta especialización empresarial y técnica, de las personas que se dedican a esta actividad productiva.
- Elevados gastos de producción que aumentan bastante respecto a los mismos cultivos realizados al aire libre.
- Si ocurren riesgos catastróficos, éstos son mayores.

Además cabe agregar dentro de las desventajas, los costos de preparación de los terrenos en la nivelación y estabilización terrenos en ladera, los cuales debido a su grado de complejidad, pueden elevar significativamente los costos de construcción de los invernaderos.

## **2.2. Tipos de Invernaderos**

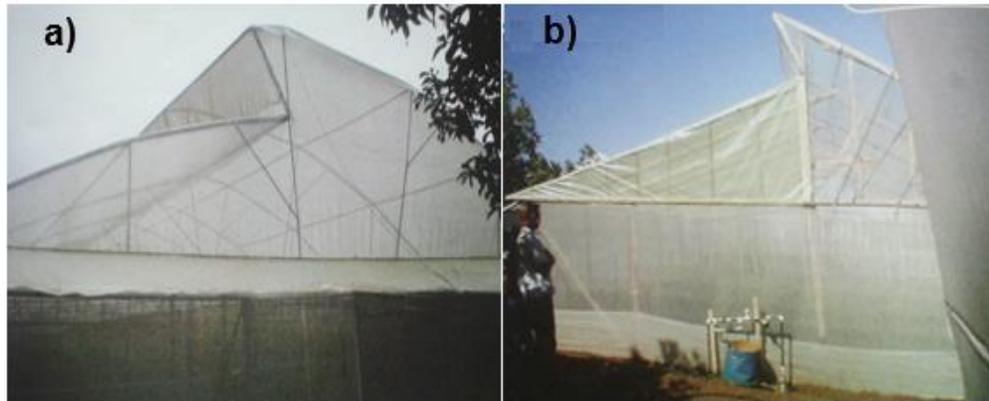
La clasificación y descripción de tipos de invernadero se presenta a continuación, según Ramírez, Aguilar y León (2010). Los diseños de los invernaderos se pueden clasificar de acuerdo a su forma y algunas características de la construcción. Estos diseños de invernaderos variarán de acuerdo con las necesidades del agricultor, zona, clima, topografía, potencial económico, entre otros. Los invernaderos más utilizados en nuestro medio son los tipo capilla, multi capilla y los dentados.

### **Capilla**

Son de un solo módulo, con cobertura plástica y de forma plana o semicircular a una o dos aguas y pueden ser construidos en madera (techos a dos aguas) o en metal (techo en arco).

Los invernaderos con techo en arco tienen la ventaja de que difunden mejor la luz al atravesar la cobertura plástica, son para suelos de poca pendiente y presenta una buena eficiencia aerodinámica, disminuyendo la resistencia del paso del aire, lo que reduce el riesgo de daños en la estructura y la cobertura plástica, sin embargo al utilizar materiales metálicos aumenta el costo respecto otras estructuras.

Los invernaderos con techo a dos aguas tienen la ventaja de una fácil y rápida instalación y una buena evacuación de las aguas. La Figura 2.1 muestra un ejemplo de un invernadero tipo capilla con techo en arco y techo a dos aguas.



**Figura 2. 1** Tipo de invernadero capilla, a) techo en arco. b) techo a dos aguas, tomado de Ramírez, Aguilar y León (2010)

### **Multi Capilla**

Consisten en invernaderos unidos en bloques con el objetivo de disminuir los costos de construcción, al ahorrar una pared entre las naves. Este tipo de invernaderos debe contar con una canoa en medio de las naves para evacuar las aguas de lluvia. Además estos invernaderos, al ser naves adosadas, cuentan con una gran estabilidad. La Figura 2.2 muestra un ejemplo de instalación de invernaderos tipo multi capilla con techo en arcos.



**Figura 2. 2** Tipo de invernadero multi capilla, tomado de Ramírez, Aguilar y León (2010)

## **Dentado**

Tiene como característica principal la forma de los dientes de sierra de las aperturas cenitales, estos invernaderos presentan menor estabilidad que los tipo capilla para soportar los embates del viento. Las aberturas cenitales deben colocarse a sotavento para propiciar el arrastre del aire caliente hacia el exterior. La figura 2.3 muestra un ejemplo de invernadero tipo dentado.



**Figura 2. 3** Tipo de invernadero dentado, tomado de Ramírez, Aguilar y León (2010)

### **2.3. Material de la cubierta**

#### **• Películas de plástico flexible**

Según Castilla (2007), la elección del material de cubierta de un invernadero debe compaginar un precio económico con una duración acorde a sus características y precio, por lo que un buen material de cubierta debe tener la máxima transparencia a la radiación global y ser lo más opaco posible a la radiación infrarroja de onda larga.

Según Alpi y Tognoni (1991), las cubiertas de polietileno son una de las más utilizadas en la construcción de invernaderos debido a su bajo costo y facilidad de instalación, además de que brinda buena resistencia y menores deformaciones, sin embargo es muy transparente a las radiaciones y a la pérdida de calor durante la noche, por lo que produce condensación en algunas situaciones.

- **Mallas**

Según Acuña (2013), el uso de mallas como material de cobertura, principalmente en las paredes laterales, permite una buena ventilación del invernadero y con ello, el control interno de la temperatura, sin perder su capacidad de cerramiento. Además, estas mallas evitan el ingreso de insectos y plagas que perjudiquen a los cultivos. La utilización de mallas como material de cobertura estará en función de garantizar el número mínimo de renovaciones de aire en el interior del invernadero, la cual se recomienda entre 20 a 40 renovaciones de aire por hora.

#### **2.4. Material para la estructura principal**

##### **Acero**

Según Jaramillo (2004) el acero es el material más usado para construcción de estructuras en el mundo, este se compone de un mínimo del 98% de hierro, contenidos de carbono menores al 1% y otras pequeñas cantidades de minerales como manganeso, fósforo, azufre, sílice y vanadio. Además Jaramillo (2004) agrega que entre las ventajas de este material destacan la gran resistencia a tensión y compresión, el costo razonable y la facilidad de ensamblaje.

Ramírez, Aguilar y León (2010) establecen que las estructuras metálicas tienen un mayor costo inicial, sin embargo presentan mayor durabilidad y alta resistencia mecánica, lo que reduce el número de soportes internos, disminuyendo el sombreo dentro del invernadero.

Por otra parte, Benito y Carretero (2011), mencionan que uno de los grandes problemas en las estructuras metálicas es la susceptibilidad a la oxidación, el cual, disminuye la capacidad de resistencia del elemento que es afectado. Estos problemas pueden ser corregidos con pinturas que impiden el contacto con la atmósfera o con recubrimiento de los elementos con materiales más resistentes a la corrosión como el galvanizado con zinc.

Según Ramírez, Aguilar y León (2010), otra desventaja que presentan las estructuras metálicas es la tendencia de los metales a calentarse, lo que acelera la degradación de la cobertura plástica de los invernaderos.

## **2.5. Construcción y estabilidad estructural**

Según Alpi y Tognoni (1991), al construir un invernadero hay que considerar 4 factores importantes, estos son:

- Máxima capacidad de transmitir luz por parte de los elementos de recubrimiento.
- Superficie cubierta lo bastante grande para que pueda ser mecanizada
- Integridad estructural
- Bajo costo por año o por cosecha

Según González (2003), una estructura puede concebirse como un conjunto de partes o componentes que se combinan en forma ordenada para cumplir una función dada, con un grado de seguridad y de manera que tenga un comportamiento adecuado en las condiciones normales de servicio, y que además satisfaga otros requisitos como mantener el costo dentro de los límites económicos y satisfacer determinadas exigencias estéticas.

Acuña (2013) menciona que una estructura ocupa cumplir con 2 procesos: a) El análisis estructural, el cual se basa en el cálculo de magnitudes de las fuerzas a las que se encuentra sometida la estructura y las deformaciones que causa, y b) El diseño estructural, el cual incluye la disposición, el dimensionamiento de las secciones y de sus componentes, por lo que para que una estructura se considere estable debe cumplirse que ante la aplicación de diversas cargas, se mantiene en equilibrio, es decir, que la estructura se mantiene en reposo y/o con deformaciones dentro del rango permitido por los materiales. Para ambos procesos es necesario contar con una estructura estable capaz de soportar de manera adecuada las cargas aplicadas a ella, en donde no solo depende del número de componentes de reacción, sino también de la disposición de éstas.

En Acuña (2013) y Durán (2013) se explica en detalle métodos para evaluar la estabilidad de la estructura en función de los apoyos, tipos de uniones y miembros que la componen.

## **2.6. Definición cargas estructurales**

Según McCormac (2010), una estructura debe ser capaz de soportar todas las cargas a las que pueda estar previsiblemente expuesta durante su vida útil., Además el Manual de Diseño Estructural estadounidense de la Asociación Nacional de Fabricantes de Invernaderos de Norteamérica (NGMA, por sus siglas en inglés) del año 2004, agrega que las estructuras de los invernaderos y sus componentes deberán estar diseñados y construidos para soportar de manera segura todas aquellas cargas que actúen sobre la estructura y tener la rigidez suficiente para limitar las deflexiones verticales y transversales, vibraciones o cualquier otra deformación que pueda afectar negativamente a su capacidad de servicio.

Según McCormac (2010), las cargas estructurales son clasificadas atendiendo a su carácter y variabilidad durante su vida útil. Las cargas que suelen aplicarse en edificios se clasifican como cargas muertas, cargas vivas y cargas ambientales, las cuales se explican a continuación:

### **Cargas muertas o permanentes:**

Son aquellas cargas de magnitud constante que permanecen en una sola posición. Éstas incluyen el peso de la estructura considerada, así como cualquier accesorio que quede permanentemente unido a ella. Para el análisis del invernadero se incluirá como cargas muertas, el peso de la estructura y del plástico de cobertura.

### **Cargas vivas o temporales:**

Son aquellas cargas que pueden cambiar su magnitud y posición. Incluyen cargas de ocupación, los materiales almacenados, las cargas de construcción, las grúas elevadas de servicio y las cargas para operar el equipo. En general las cargas vivas son inducidas por la gravedad. Son causadas por la ocupación, uso o mantenimiento de la estructura. Para el caso de un invernadero, las principales cargas vivas son: Las cargas de cultivo, carga de equipos, y cargas generadas por personal de mantenimiento o construcción.

- **Carga de cultivo:** Según NGMA (2004), se recomienda un mínimo 10 kgf/m<sup>2</sup>. Existen diseñadores o compradores de invernaderos que pueden tener criterios adicionales u otras cargas para colgar plantas o sistemas de riego mecánicos.  
También la Norma Europea, EN 13031-1 (2001), establece algunos valores para la carga de cultivo que varían según el tipo de cultivo con el que se trabaje, en el caso de tomate y pepino se recomienda 15 kgf/m<sup>2</sup>, con cultivo de fresa 31 kgf/m<sup>2</sup> y para recipientes pesados como plantas en macetas 102 kgf/m<sup>2</sup>; valores que podrían utilizarse en caso de querer diseñar para un cultivo en específico.
- **Carga de equipos o instalación:** Esta carga es debido a los equipos dentro del invernadero, como ventiladores, iluminación, mallas sombra, motores, entre otros, en donde la Norma Europea EN 13 301-1 (2001) recomienda un mínimo de 70 N/m<sup>2</sup> (aproximadamente 7 kgf/m<sup>2</sup>).
- **Carga por personal de mantenimiento o construcción:** Según NGMA (2004), se recomienda un mínimo de 49 kgf/m<sup>2</sup> aplicadas en el techo del invernadero, generalmente causadas por operaciones de reparaciones o mantenimiento. También, el CSSR (2010) establece una carga mínima de 40 kgf/m<sup>2</sup> en techos. Sin embargo, para el análisis se utilizará la magnitud de carga puntual utilizada por Acuña (2013), 90 kg por operario, aplicadas puntualmente sobre la estructura, la cual se considera más real en el caso de los invernaderos.

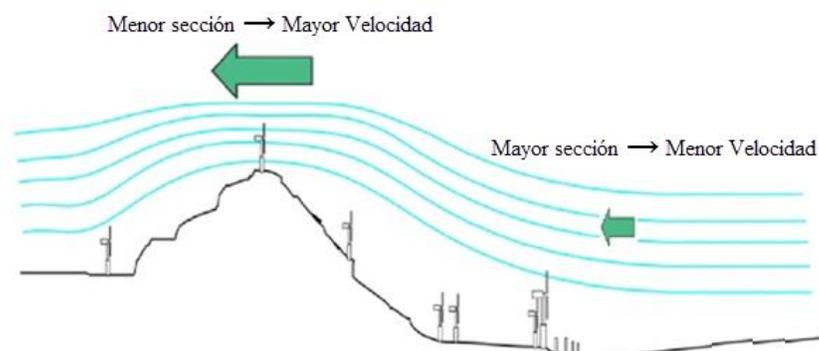
### **Cargas ambientales:**

Son aquellas cargas causadas por el ambiente en que se encuentra la estructura. Por lo que se refiere a los edificios, las cargas ambientales son causadas por lluvia, nieve, viento, temperatura y sismo. Estrictamente hablando, éstas también son cargas vivas, pero son el resultado del ambiente en el que se localiza la estructura.

- **Carga de viento:** Esta carga representa la presión o succión que ejerce un evento máximo de una ráfaga de viento sobre la cobertura del invernadero y que finalmente es transmitido a la estructura.

Según Briassoulis. et al. (2000), la intensidad del viento es uno de los factores climáticos de mayor influencia en el diseño estructural de invernaderos y una de las causas más comunes de que la estructura de los invernaderos llegue a fallar. Además agrega que el viento genera variaciones de presión en la cobertura del plástico y un correspondiente estrés en el marco del invernadero y sus cimientos, los cuales pueden causar daño en casos de velocidades de viento extremas.

Según Durán (2012), las irregularidades del terreno afecta al viento en superficie, quizás el más acusado sea el efecto de la orografía. Dado que los movimientos de aire en la atmósfera se encuentran limitados a las capas más bajas por la denominada “troposfera”, las montañas disminuyen la sección por la cual el viento puede circular. Como el aire no puede desaparecer ni comprimirse, una consecuencia de esta disminución de la sección y conservación de la masa es el aumento de velocidad “Efecto Venturi”, tal y como se muestra en la Figura 2.4.



**Figura 2. 4** Cambio en la velocidad del viento debido al efecto de las montañas, tomado de Durán (2012)

Para el cálculo de la carga de viento en este proyecto se plantean dos metodologías: La expuesta por ASCE (2010), la cual permite aplicarse en forma específica para las condiciones del sitio de construcción y la metodología expuesta en el Reglamento de Construcciones de Costa Rica (1983), la cual es más general.

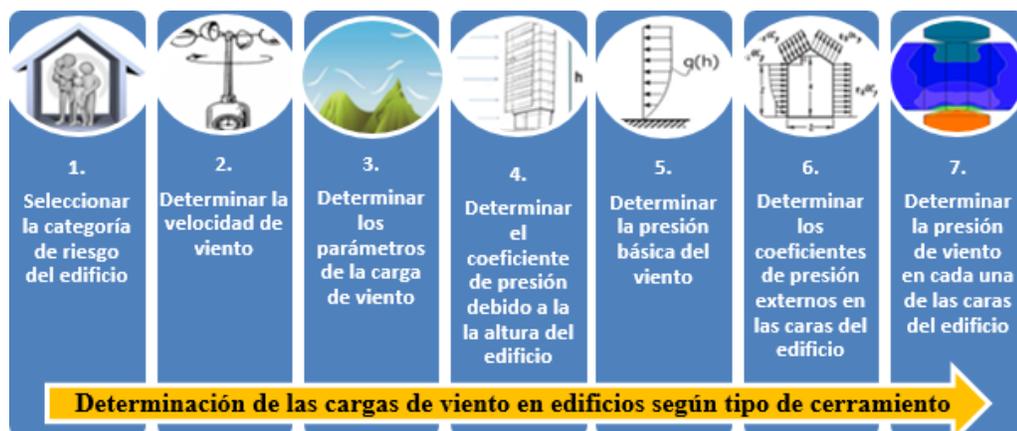
➤ **Metodología ASCE (2010), Capítulos 26 al 30**

Esta metodología plantea el análisis de la carga de viento a partir de 4 casos de estudio (ver Anexo A, Tabla A.12):

- i. Caso 1. La presión del viento que actúa sobre la superficie proyectada perpendicular a cada eje principal de la estructura, consideradas por separado a lo largo de cada eje principal.
- ii. Caso 2. Las tres cuartas partes de la presión del viento de diseño que actúa sobre el área proyectada perpendicular a cada eje principal de la estructura en conjunción con un momento de torsión, considerado por separado para cada eje principal.
- iii. Caso 3. Las presiones de viento definidas en el Caso 1, pero considerando que actúan simultáneamente, utilizando un 75% del valor especificado.
- iv. Caso 4. Las presiones de viento definidas en el Caso 2, pero considerando que actúa simultáneamente utilizando un 75% del valor especificado.

Estos 4 casos plantean situaciones de diseño de carga de viento para el análisis y diseño estructural de edificaciones, sin embargo, para el país no existen recomendaciones de diseño en cuanto a la carga de viento, por lo que en este estudio se trabajará el Caso 1.

Esta metodología plantea el cálculo de las cargas de viento a través de 7 pasos, los cuales se muestran en la Figura 2.5 y se detallan a continuación:



**Figura 2. 5** Pasos para determinar las cargas de viento según metodología ASCE (2010)

**Paso 1. Seleccionar la categoría de riesgo del edificio:** Esto dependerá del riesgo que tengan las vidas humanas ante un evento de falla. Para los invernaderos este tendrá una categoría I (categoría de bajo riesgo). Sin embargo esta categoría no es utilizada ni factorizada en el cálculo de la presión básica de viento.

**Paso 2. Determinar la velocidad de viento:** Se definen los valores de las magnitudes máximas de una ráfaga de viento de 3 segundos medidos a una altura de 10 m sobre la altura del terreno. Para esto deben existir mapas de velocidades de viento para diferentes periodos de retorno de un evento determinado. De no existir estos mapas, se deberá realizar un análisis estadístico de información meteorológica de estaciones cercanas.

**Paso 3. Determinar los parámetros de la carga de viento:** Se deben determinar parámetros como el factor de dirección del viento ( $K_d$ ), la categoría de exposición, el factor de topografía ( $K_{zt}$ ), el factor de efecto de ráfaga ( $G$ ) (para el cual se permite el valor de 0,85), tipo de cerramiento de la estructura y los coeficientes de presión interna ( $GC_{pi}$ ). Para definir estos valores se presentan tablas en el Anexo A.

Esta metodología es sensible al tipo de exposición a la cual se verá expuesta la construcción, por tanto las categorías de exposición se explican en la Tabla 2.1. Cada tipo de exposición conlleva a factores que pueden aumentar o disminuir la presión básica del viento.

**Tabla 2. 1** Categorización de la rugosidad y exposición de los alrededores del sitio de construcción según ASCE (2010), traducido por Duran (2013)

Categoría	Rugosidad	Exposición
<b>B</b>	Zonas urbanas y suburbanas, bosques y terreno con numerosas obstrucciones	Para estructuras con altura menor a los 9,1 m, se aplica en donde la rugosidad del terreno se considera B; la dirección del viento predomina por más de 457 m sin obstrucciones. Para estructuras de altura mayor a 9,1 m, se aplica terrenos de rugosidad B, en donde la dirección del viento predomina por más de 792 m o 20 veces la altura de la estructura, predominando la mayor
<b>C</b>	Terreno abierto con escasas obstrucciones, con estructuras de altura menor a los 9,1 m	Aplica cuando la exposición B o D no aplican
<b>D</b>	Terreno plano, sin obstrucciones, incluyendo cuerpos de agua	Aplica en los casos en donde la rugosidad se considera como D, prevaleciendo la velocidad del viento por más de 1.524 m o 20 veces la altura de la estructura, predominando la mayor. La exposición D aplica cuando se tienen rugosidad B o C y sitio se encuentra a 183 m o 20 veces la altura de la estructura

La exposición categoría B, representa un entorno que frena y disminuye la velocidad del viento, debido a la cantidad de obstrucciones que presentan. La exposición categoría D, representa el caso contrario, un entorno que aumente la velocidad del viento, debido a que el viento se dirige libremente hacia la estructura, sin obstrucciones. Mientras que la exposición C, representa un entorno intermedio entre las exposiciones B y D.

También, al considerar el efecto de la pendiente del terreno sobre la estructura, es importante conocer si se debe aplicar el efecto de la topografía, que puede aumentar la velocidad de la ráfaga de viento, para esto la metodología de la ASCE (2010) establece 5 condiciones que debe tener el sitio de construcción, las cuales deben cumplirse todas para que se deba aplicar el factor de topografía dentro del cálculo de la presión básica de viento. Estas 5 condiciones son:

- i. La ladera está aislada y sin obstrucciones topográficas similares, en una distancia horizontal equivalente a 100 veces la altura de la cima de la ladera o en una distancia de 3,2 km en barlovento, la que sea menor.
- ii. La cima de la ladera es al menos dos veces más alta que el resto del terreno en un radio de 3,2 km alrededor.
- iii. La estructura está localizada en la mitad superior de la ladera o cerca de la cima.
- iv. La razón entre la altura de la cima de la ladera y la distancia entre la cima y la altura media de la ladera, medida horizontalmente, es mayor o igual a 0,2 ( $H/Lh \geq 0,2$ ).
- v. La cima de la ladera tiene una altura mayor o igual a 4,5 m para una exposición categoría C y D, y mayor o igual a 18 m para una exposición categoría B.

En caso de que todas las condiciones se cumplan se desarrollara la metodología correspondiente para calcular el factor de topografía, en caso contrario, si alguna de las condiciones no se cumple, se utilizará un factor de topografía igual a 1, es decir, no hay ningún efecto de la aceleración del viento debido a las características de la montaña.

Para aplicar el factor de topografía se aplicará la siguiente fórmula:

Ecuación 2.1 
$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2$$

En donde:

$K_1$  = Factor que representa las características topográficas y máximo efecto de la aceleración

$K_2$  = Factor que representa la reducción de la velocidad según la distancia barlovento o sotavento de la estructura respecto a la cima de la montaña

$K_3$  = Factor que representa la reducción de la velocidad según la altura de la estructura sobre el terreno local.

Los valores de  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  se muestran en el Anexo A.

Por otra parte, el cálculo para determinar los parámetros del factor de dirección del viento ( $K_d$ ), tipo de encerramiento de la estructura y los coeficientes de presión interna ( $GC_{pi}$ ), se pueden encontrar en el Anexo A.

**Paso 4. Determinar el coeficiente de presión debido a la altura del edificio ( $K_z$ ):** Este coeficiente varía según la altura del edificio y la categoría de exposición a la cual se encuentre la estructura. Más detalles de su cálculo se pueden encontrar en el Anexo A.

**Paso 5. Determinar la presión básica del viento:** Representa el producto de los factores descritos anteriormente, y se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 2.2 
$$q_z = 0,613K_zK_{zt}K_dV^2$$

En donde:

$q_z$  = Presión básica del viento en N/m<sup>2</sup>

V = Velocidad de ráfaga de viento en m/s, según paso 2.

**Paso 6. Determinar los coeficientes de presión externa de la estructura según su forma y tipo de cerramiento ( $GC_p$  y  $GC_N$ ):** Estos coeficientes varían según el tipo de estructura y el tipo de cerramiento, por ejemplo, techos en arco o a dos aguas, tipo de cerramiento abierto o cerrado, entre otros. Los valores de estos coeficientes se pueden encontrar en el Anexo A.

**Paso 7. Determinar la presión de viento en cada una de las caras del edificio:** Las presiones en las caras de la estructura variaran de acuerdo al tipo de cerramiento del invernadero y los coeficientes de presión interna, y se puede calcular con las siguientes ecuaciones:

Ecuación 2.3 
$$p = qGC_p - q_i(GC_{pi})$$
 Tipo de cerramiento cerrado o parcialmente cerrado

Ecuación 2.4 
$$p = q_hGC_N$$
 Tipo de cerramiento abierto

En donde:

$q_z = q = q_i = q_h$  Dependen de la altura de la edificación, para el caso de los invernaderos a evaluar, son equivalentes

$C_N$  = Coeficiente de presión externa para techos en tipo de cerramiento abierto

➤ **Metodología RCCR (1983), Artículo XX.8 al XX.13**

Esta metodología establece una presión básica de viento definida por la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 2.5} \quad q_z = 0,005V^2$$

En donde:

$q_z$  = Presión básica del viento en  $\text{kgf/m}^2$

$V$  = Velocidad de ráfaga de viento en  $\text{km/hr}$

Y también, presenta algunas presiones básicas de viento para construcciones a diferentes alturas sobre el terreno, situadas en la ciudad o de rugosidad comparable, o bien en campo abierto frente al mar, las cuales se muestran en la Tabla 2.2. Estas presiones rigen para todo el país, sin tomar en cuenta ninguna variación espacial.

**Tabla 2. 2** Presión básica de viento a diferentes alturas según el lugar de construcción, tomado del Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU) (1983)

Altura sobre el terreno (m)	Presión Básica ( $\text{kgf/m}^2$ )	
	Ciudad	Campo abierto
0	55	70
15	75	120
20	85	125
30	95	135
40	105	145
50	110	150
75	120	165
100	130	170

Estas presiones básicas de viento se aumentarán en un 20% en los siguientes casos:

- i. En gargantas de cerros, en las que el viento pueda producir efectos Venturi que incrementen su velocidad.
- ii. En cimas de cerros o promontorios.
- iii. En bordes de barrancas

Por otra parte, la presión básica se le aplicará un coeficiente de riesgo de la edificación, en donde los invernaderos entrarían como una construcción dentro del Grupo C (Construcciones aisladas y no permanentes, no destinadas a habitación o al uso público) por lo que se aplicará un factor de 0,7.

### Factores de Forma

Los factores de forma " C ", dependen de las condiciones de forma total y de aberturas que tenga la obra en proceso de diseño. El factor " C " es positivo si la acción del viento produce presión y negativo si el efecto es de succión. En la Tabla 2.3 se muestran los valores del factor de forma para diferentes superficies según el tipo de edificación.

**Tabla 2. 3** Factores de forma según tipo de edificación, tomado de INVU (1983)

<b>Edificaciones Cerradas</b>		
<b>Superficie</b>	<b>Factor de Forma "C"</b>	<b>Detalle</b>
<b>Pared frente al viento</b>	0,8	Presión
<b>Pared del fondo</b>	0,4	Succión
<b>Techo frente al viento</b>	1,2 (sen A) – 0,4	A es el ángulo de pendiente del techo
<b>Techo de fondos</b>	0,4	Succión
<b>Edificaciones Abiertas</b>		
<b>Superficie</b>	<b>Factor de Forma "C"</b>	<b>Detalle</b>
<b>Pared frente al viento</b>	0,8	Presión
<b>Pared frente al viento</b>	0,4	Succión
<b>Pared de fondo</b>	0,6	Presión
<b>Pared de fondo</b>	0,4	Succión
<b>Paredes de los lados</b>	0,4	Presión y succión alternativamente
<b>Techos frente al viento</b>	1,2 (sen A) – 0,4	Presión
<b>Techos frente al viento</b>	0,8	Presión hacia arriba
<b>Techos laterales y de fondo</b>	0,4	Presión y Succión
<b>Techos de fondo</b>	0,8	Presión hacia arriba

Para el cálculo de la Fuerza del viento se aplicará la siguiente ecuación:

Ecuación 2.6 
$$p = q_z * C * I$$

En donde:

p = Presión de viento sobre la cara de la edificación en kgf/m<sup>2</sup>.

q = Presión básica del viento en kgf/m<sup>2</sup>

C = Factor de forma

I = Coeficiente de riesgo de la edificación.

- **Carga de sismo:** Esta carga cuantifica los efectos sobre la edificación que producen las oscilaciones y cortantes en la base provocados durante un sismo. Esta carga va a depender principalmente de la masa de la estructura y se calculará por la metodología provista por el Código Sísmico de Costa Rica del año 2010. Ante la ausencia de un diafragma estructural que transfiera las fuerzas horizontales hacia los elementos resistentes verticales, se utilizó el método estático, el cual analiza los efectos de las fuerzas estáticas horizontales aplicadas en cada uno de los niveles de la estructura.
- **Carga de lluvia:** Al encontrarnos con terrenos con pendiente y con techos con fácil escurrimiento de agua, ya sea techo en arco, dos aguas o plano paralelo a la pendiente del terreno, el encharcamiento de las aguas no es un factor que afecte el diseño, por lo que no se considerara la carga por lluvia en los análisis de este estudio.

## 2.7. Parámetros para el establecimiento del Periodo de retorno de diseño de la ráfaga de viento

Es importante aclarar algunos términos y metodologías utilizadas para establecer la ráfaga de viento asociada con un periodo de retorno requerido.

**Ráfaga de viento**<sup>1</sup>: Corresponde a la velocidad de viento medida en un intervalo de 3 segundos a una altura de 10 metros sobre el nivel del suelo.

**Periodo de retorno (T)**<sup>2</sup>: Es el intervalo de recurrencia promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada.

**Probabilidad de ocurrencia (p)**<sup>3</sup>: Es la probabilidad de que se exceda un evento de una magnitud determinada durante una observación o periodo de tiempo dado, periodo de retorno. La probabilidad de ocurrencia es el inverso de su periodo de retorno.

Ecuación 2.7 
$$p = \frac{1}{T}$$

**Probabilidad de ocurrencia para diferentes periodos de retorno y vida útil del material (P)**<sup>3</sup>: Es la probabilidad de que un evento ocurra al menos una vez asociado a un periodo de retorno T en N años, donde N se toma como la vida útil de una estructura o material, la cual se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 2.8 
$$P = 1 - (1 - p)^N$$

**Distribución de probabilidad**<sup>2</sup>: Son expresiones matemáticas que predicen el comportamiento de determinada variable, según sus probabilidades de ocurrencias.

**Vida útil**<sup>4</sup>: Es la vida útil probable futura que se estima tendrán los bienes que se valúan considerando los límites de eficiencia económica y de producción.

Según Maggio (s.f), el resultado de la relación entre la variable aleatoria (por ejemplo caudal, precipitación, velocidad de viento) y el periodo de retorno será utilizado para un cálculo de ingeniería, el cual, se basará en un periodo de retorno que asegure la probabilidad de que la variable aleatoria supere un valor de referencia sea muy baja, tal como un 1% (periodo

---

<sup>1</sup> American Society of Civil Engineers (2010)

<sup>2</sup> Ven Te Chow, Maidment y Mays (1994)

<sup>3</sup> Patiño (2007)

<sup>4</sup> González (2005)

milenario). Al trabajar con periodos de retorno elevados, la probabilidad de que la variable aleatoria supere el valor de diseño no será nula, aunque será pequeña, esa probabilidad se denomina amenaza.

Si además de la amenaza se considera la probabilidad de que una estructura o edificación falle o se dañe por esta amenaza durante su vida útil, es decir amenaza más la probabilidad de daño, es lo que se denomina riesgo.

### Modelos de Distribución:

Según Ven Te Chow, Maidment y Mays (1994) y Patiño (2007), la distribución que tiende a utilizarse en mayor cantidad para eventos con variables climatológicas (viento, precipitaciones, entre otras) es la distribución de valores extremos tipo I o distribución de Gumbel, siempre y cuando se tenga una buena muestra, es decir, cuando el número de valores extremos seleccionados es grande.

También existen otros modelos como la distribución Normal y la distribución Log Normal. Las principales ecuaciones y parámetros para estos tres modelos de distribución estadísticos se muestran en la Tabla 2.4

**Tabla 2. 4** Distribuciones de probabilidad para el ajuste de información hidrológica, tomado de Ven Te Chow, Maidment y Mays (1994) y García (2013)

Distribución	Función de densidad de probabilidad	Rango
Normal	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{\pi}} e^{\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}$	$-\infty < x < \infty$
Log-Normal	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right)}$ $y = \log x$	$x > 0$
Gumbel	$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{\left(-\frac{x-\mu}{\alpha}\right)} e^{\left(-\frac{x-\mu}{\alpha}\right)}$	$-\infty < x < \infty$
Frechet	$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{\beta}{x-\gamma}\right)^{\alpha+1} e^{\left(-\left(\frac{\beta}{x-\gamma}\right)^\alpha\right)}$	$\gamma < x < \infty$
Weibull	$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{\left(-\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right)}$	$\gamma \leq x < \infty$

La distribución Normal se ajusta mejor cuando las variaciones en la velocidad del viento alrededor del promedio son meramente aleatorias, menciona Sachs (1978).

La distribución Log Normal es aplicable para valores positivos de medición, por lo que puede ser utilizada para la predicción de variables climatológicas, ya que no existen mediciones negativas.

Según Ven Te Chow, Maidment y Mays (1994), los valores extremos son valores máximos o mínimos seleccionados de un conjunto de datos, como por ejemplo el caudal máximo anual registrado durante un año, y los valores de caudal máximos anuales para cada año de registros históricos conforman un conjunto de valores extremos que puede analizarse de manera estadística. También se ha demostrado, que las distribuciones de valores extremos convergen en una de las tres formas de distribución de valores extremos, llamadas tipo I (Gumbel), tipo II (Frechet) y tipo III (Weibull).

Según Sachs (1978), la ráfaga máxima y las velocidades promedio horarias en cualquier sitio varían mucho de un año a otro, y no es posible pronosticar cualquier máximo de la distribución de frecuencia anual. Sin embargo, si se cuenta con un registro amplio de datos, es posible encontrar una ley de secuenciación que, mediante la utilización de las estadísticas de los valores extremos, permite predecir una velocidad máxima del viento con una probabilidad de ocurrencia en un determinado número de años.

Para una correcta selección de la distribución que mejor se ajuste al registro de las variables climatológicas analizados existen algunas pruebas de bondad o de mejor ajuste, en las que se basa la comparación y semejanza entre dos distribuciones, entre ellas se pueden nombrar la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S), la prueba de Anderson-Darling, la prueba Chi Cuadrado, entre otras. Otro modo de verificación es el análisis visual o gráfico de los datos, ya que las distribuciones utilizan una escala de graficación que linealice la función de distribución, en donde los datos graficados se ajustan por medio de una línea recta con propósitos de interpolación y extrapolación, según menciona Ven Te Chow, Maidment y Mays (1994).

### **Factor de ráfaga:**

De las estaciones meteorológicas se pueden obtener las velocidades máximas horarias, sin embargo, para el análisis de la carga de viento sobre diferentes estructuras o superficies, se utiliza el valor de ráfaga de viento. Para el caso de Costa Rica, al no contar con datos de ráfaga de viento de las estaciones meteorológicas del país, se debe convertir la magnitud máxima horaria del viento a un valor estimado de la ráfaga del viento. Patiño (2007) realizó una primer aproximación para determinar los factores de ráfaga para el caso de Costa Rica, en el que se demostró que los factores no varían según el periodo de retorno utilizado más si del lugar donde se mida, es decir, las ubicaciones de las estaciones meteorológicas, los valores para el factor de ráfaga en Costa Rica variaban entre los 1,25 a 2,5. Según Sachs (1978), este valor varía con el tipo de rugosidad del terreno. Los valores recomendados por Sachs (1978) para el Reino Unido, se muestran en la Tabla 2.5:

**Tabla 2. 5** Factor de ráfaga para distintas categorías del terreno según Sachs (1978)

<b>Categoría</b>	<b>Factor de Ráfaga Máximo</b>	<b>Factor de Ráfaga Mínimo</b>	<b>Factor de Ráfaga Promedio</b>
<b>1</b>	1,59	1,45	1,52
<b>2</b>	1,91	1,51	1,67
<b>3</b>	2,22	1,83	2,04

Donde la categoría 1 representa sitios expuestos en zonas de mucho viento, es decir, zonas costeras expuestas, zonas pantanosas, desierto; la categoría 2 representa sitios menos ventosos, zonas de campo abierto con presencia de edificios o cercas vivas; y la categoría 3 representa las zonas boscosas o con alta presencia de edificios.

## **2.8. Normativa aplicable al diseño de invernaderos**

Según (Acuña, 2013) dentro de los reglamentos nacionales se encuentran: Código Sísmico de Costa Rica 2010 (CSCR-2010), Código de Cimentaciones de Costa Rica 2009 y el Reglamento de Construcciones de Costa Rica 1983 (RCCR-1983). Las normas internacionales que se consideran más representativas para nuestro entorno son el Uniform Building Code (IBC-2009), Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas y Biológicos (ASABE), Asociación Nacional de Fabricantes de Invernaderos de Norteamérica (NGMA), el diseño de estructuras de acero laminado en frío es normado por el Instituto Americano de Hierro y el Acero (AISI, por sus siglas en inglés), Sociedad Americana de Ingenieros Civiles ASCE 7-10 y la Norma Española (UNE-EN 13031-1).

### **Capítulo 3. Metodología de análisis y diseño de prototipos**

Para la elaboración de este trabajo se realizaron 2 modelos demostrativos para la aplicación de las metodologías descritas anteriormente, cuyos resultados se mostrarán en los Capítulos 4 y 5.

Se planteó un modelo demostrativo para el análisis de velocidades de viento utilizando la metodología del ASCE (2010) aplicadas a la zona de Fraijanes, integrando modelos de distribución estadísticos para la comparación de las presiones de viento en las caras del invernadero asociadas a diferentes periodos de retorno y vida útil de la estructura principal y el material de cobertura, lo que permitirá comparar resultados con el RCCR (1983).

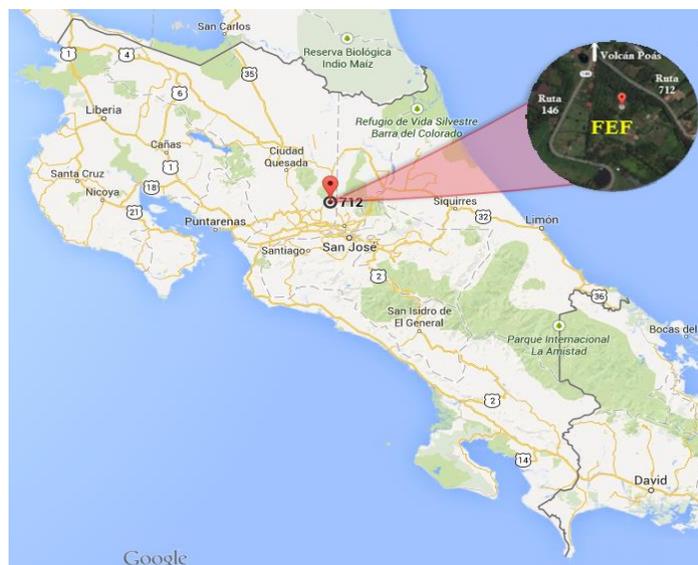
El segundo modelo demostrativo, contempló la evaluación de la resistencia estructural de un invernadero bajo condiciones de pendiente, lo que permitió comparar resultados respecto a este invernadero bajo condiciones de topografía plana. Para el desarrollo de este ejemplo se utilizaron las recomendaciones establecidas para las cargas estructurales por normas internacionales como NGMA (2004) y la Norma Europea EN 13031-1 (2001) y las metodologías expuestas por la ASCE (2010), el CSCR (2010) y las recomendaciones para el diseño de secciones del AISI según la metodología LRFD.

El presente trabajo profundiza los detalles metodológicos de los cálculos de cargas estructurales, explicados en las tesis de licenciatura de Acuña (2013) y Durán (2013), sobre todo el análisis de la fuerza de viento. Este estudio también profundiza y aporta a la revisión bibliográfica presentada en las tesis mencionadas en los aspectos que dichos trabajos no abordaron, como lo son el efecto de la topografía y las categorías de exposición dentro de los diseños estructurales de invernaderos.

### 3.1. Efecto de la carga de viento

#### Sitio de construcción

Para una mejor aproximación de los resultados a la realidad, es necesario adecuar los análisis a las condiciones tanto climáticas como topográficas de un lugar en específico, o del lugar donde se lleve a cabo una obra o proyecto. Para este trabajo se escogió la Finca Experimental Fraijanes (FEF) de la Universidad de Costa Rica, ya que el terreno presenta características acordes con el objetivo. La ubicación de la FEF se presenta en la Figura 3.1.



**Figura 3. 1** Localización de la Finca Experimental Fraijanes

La FEF<sup>5</sup> se ha dedicado a realizar investigaciones con cultivos de altura y cuenta con un área de 18,6 hectáreas de terreno ubicada a 10° 05' de latitud Norte, 84° 16' de longitud Oeste y a 1764 msnm, en el Distrito 7° de Sabanilla de la Provincia de Alajuela, Costa Rica. La FEF registra una precipitación promedio anual de 3000 mm, distribuidos de mayo a diciembre, una temperatura de 16,1°C y los vientos más fuertes se registran durante los meses de enero a marzo, superando en algunas ocasiones los 20 km/hora.

---

<sup>5</sup> Obtenido del sitio web de la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno de la Universidad de Costa Rica, [http://www.eefb.ucr.ac.cr/esp\\_fraijanes.shtml](http://www.eefb.ucr.ac.cr/esp_fraijanes.shtml)

### **Prototipo estudiado**

Para este estudio se utilizó un invernadero con techo en arco, de 9 m de frente con 18 m de largo y 5 metros de alto, ya que son necesarias las dimensiones del invernadero en el cálculo de las presiones de viento.

### **Determinación de parámetros de diseño**

Ante la falta de información referente a los parámetros de diseño y normativa nacional que rija la construcción de ambientes protegidos, se procedió a determinar la amenaza de una ráfaga de viento para eventos máximos durante la vida útil de los 2 principales materiales de construcción de los ambientes protegidos, la estructura y la cubierta.

Para la determinación del riesgo se utilizó como referencia las recomendaciones del Código Sísmico de Costa Rica 2010 para definir las sacudidas sísmicas para estructuras normales. Se utilizará esta analogía para definir eventos de ráfaga de viento máximas, ya que es la carga de viento la que rige los diseños de invernaderos.

Para los parámetros de diseño propuestos se contempló la disminución del riesgo por la poca ocupación humana y además la relación entre la poca ocupación y una corta vida útil de los materiales, en este caso del plástico.

Cabe recordar que los materiales de cobertura de los invernaderos poseen una vida útil de 3 a 4 años, mientras que las estructuras de acero de los invernaderos poseen una vida útil de aproximadamente 25 a 50 años.

### 3.1.1. Metodología ASCE (2010) aplicada en la zona de Fraijanes, Alajuela.

Se utilizó la metodología planteada por ASCE (2010), por lo que se siguieron los 7 pasos planteados por esta metodología, de acuerdo a la Figura 2.6.

**Paso 1. Seleccionar la categoría de riesgo del edificio:** El factor de riesgo no es aplicable dentro de sus cálculos para Costa Rica, ya que la metodología lo incorpora dentro de los mapas de velocidad de viento para Estados Unidos. Para este estudio se utilizó un factor de riesgo de 1. Sin embargo, para próximos estudios se recomienda utilizar un factor de riesgo similar al establecido por el CSCR (2010) de 0,75 para estructuras misceláneas o bien las recomendaciones del RCCR (1983) de 0,7 para edificaciones de baja ocupación humana.

**Paso 2. Determinar la velocidad de viento:** Se solicitaron los datos de velocidad máxima de la estación meteorológica de Fraijanes al Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Dicha estación solo cuenta con la velocidad promedio horaria, desde el año 2003 hasta el 2013, de esta serie se seleccionaron los eventos máximos para cada uno de los años suministrados.

La región de Fraijanes califica en la categoría 3 expuesta por Sachs (1978), donde se cuenta con la presencia de abundante vegetación. Ya que no se cuenta con factores de ráfaga para la zona de estudio, se utilizó el factor máximo de 2,22 para obtener la velocidad de ráfaga máxima. Por la deficiencia de información meteorológica en el país, se considera que este es el caso típico al cual se enfrentan los diseñadores.

Las velocidades de ráfaga máxima representan los valores reales de la zona de Fraijanes y están asociadas los diferentes periodos de retorno, estos periodos de retorno se determinan con la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 3.1} \quad T = \frac{n + 1}{m}$$

En donde:

T = Periodo de retorno

n = Número de valores

m = Orden del valor, siendo 1 la mayor velocidad de ráfaga de viento

Una vez establecida las velocidades máximas horarias asociadas a un periodo de retorno dado, se realizó un análisis estadístico de eventos extremos y obtener así la distribución estadística que mejor ajuste. Para ello se siguió la metodología presentada en Ven Te Chow, Maidment, y Mays, (1994) y el uso del programa estadístico EasyFit 5.5, el cual permite obtener a su vez la distribución de mejor ajuste. En estas modelaciones se utilizaron solamente las distribuciones de valores extremos, ya que se utilizaron los valores máximos horarios anuales del periodo de registro histórico suministrado por el IMN.

**Paso 3. Determinar los parámetros de la carga de viento:** Se determinó a la zona de Fraijanes como una categoría de exposición C, un factor de efecto de ráfaga G de 0,85, y para el factor de topografía  $K_{zt}$  se realizó una interpretación de la metodología y de las condiciones necesarias para que se deba aplicar el factor de topografía dentro de los cálculos.

Los factores restantes como el factor de dirección del viento ( $K_d$ ), el tipo de cerramiento de la estructura y los coeficientes de presión interna ( $GC_{pi}$ ), se determinaron por medio de las tablas expuestas por la metodología. Estas tablas se muestran en el Anexo A.

**Paso 4. Determinar el coeficiente de presión debido a la altura del edificio ( $K_z$ ):** Al utilizar un prototipo de 5 m de altura, se consideró un coeficiente  $K_z$  de 0,85. (Ver Anexo A).

**Paso 5. Determinar la presión básica del viento:** Según los factores  $K_z$ ,  $K_{zt}$   $K_d$  y la velocidad de ráfaga de viento V para un periodo de retorno de 20 y 185 años, se utilizó la ecuación 2.2 para el cálculo de la presión básica de viento  $q_z$ .

**Paso 6. Determinar los coeficientes de presión externa de la estructura según su forma y tipo de cerramiento ( $GC_p$  y  $GC_N$ ):** Al utilizar un prototipo de invernadero en arco, se determinaron los valores del coeficiente de presión externa para las paredes de la estructura para una edificación con techo circular o domo. Los valores de estos coeficientes se pueden encontrar en el Anexo A.

**Paso 7. Determinar la presión de viento en cada una de las caras del edificio:** Una vez determinado la presión básica del viento y los coeficientes de presión externa, se utilizaron las Ecuaciones 2.3 y 2.4 para la obtención de las presiones o cargas de viento en las diferentes caras del invernadero.

Para la comparación con el RCCR se utilizó el tipo de cerramiento que otorgará las presiones máximas en las caras del invernadero.

Para tener un mejor conocimiento del efecto de ambas metodologías, se realizó el análisis de la carga de viento utilizando la metodología ASCE (2010), con la velocidad de viento recomendada por el RCCR (1983), es decir, 100 km/h.

### **3.1.2. Metodología RCCR (1983) aplicada en la zona de Fraijanes, Alajuela.**

Se utilizó la metodología planteada por el RCCR (1983), por lo que se identificaron 3 pasos, que se detallan a continuación:

**Paso 1. Determinar la presión básica del viento:** A partir de las recomendaciones de la presión básica de viento, expresada en la Ecuación 2.5, se aumentó en un 20% al encontrarse Fraijanes en una ladera que puede ocasionar un efecto venturi e incrementar la velocidad de viento.

El RCCR (1983) establece una velocidad mínima de diseño de 100 km/h, a ser considerada dentro de los análisis de carga de viento.

**Paso 2. Determinar los factores de forma de la edificación:** Se determinaron los valores del factor de forma correspondientes a las diferentes caras del invernadero, según la Tabla 2.3

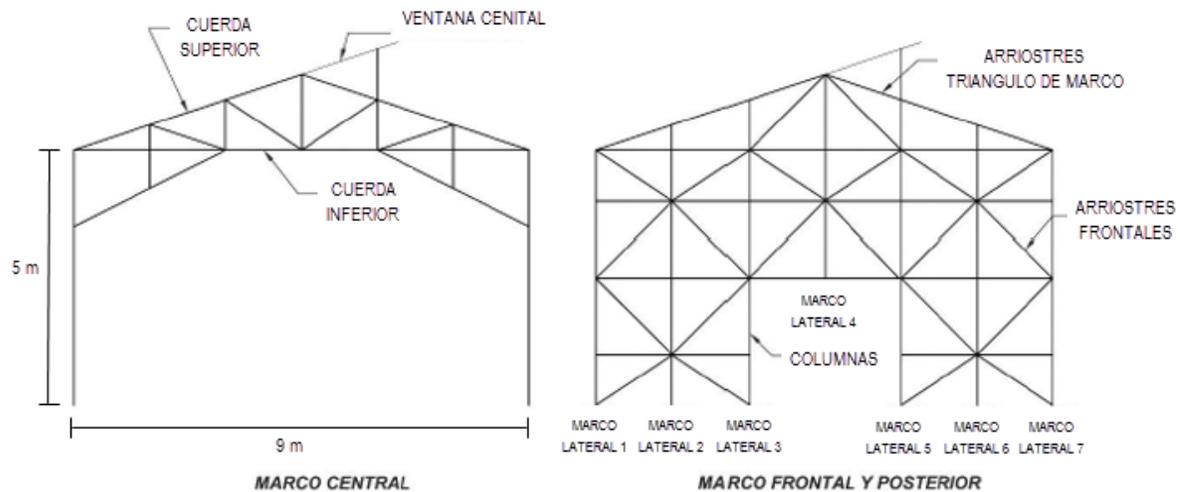
**Paso 3. Determinar la presión de viento en cada una de las caras del edificio:** Se utilizó la ecuación 2.6 para la obtención de las presiones o cargas de viento en las diferentes caras del invernadero.

### 3.2. Efecto de la pendiente en la respuesta estructural y costo de un invernadero

#### Prototipo a evaluar

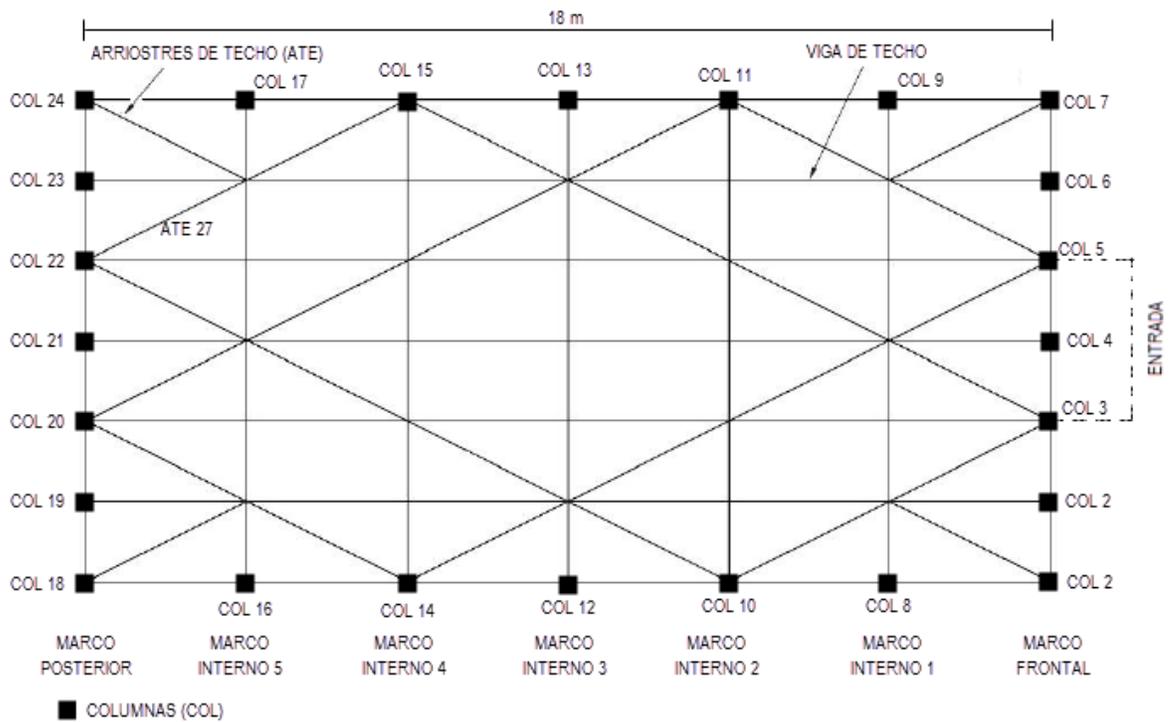
Se partió de uno de los diseños más económicos planteados por Acuña (2013), con techo a dos aguas (Figura 3.2), de 9 metros de ancho, 18 metros de largo y 5 metros altura de canoa. Este prototipo presentó la menor cantidad de acero por unidad de área y cumple con las condiciones de estabilidad estructural para el caso de construcción en sitios planos. Para poder utilizar el estudio de Acuña (2013) como referencia, se utilizó para los análisis de invernaderos en pendiente una velocidad de ráfaga de viento de 100 km/h.

Se utilizó la modelación a través del programa de análisis estructural SAP 2000, el cual permite evaluar cada uno de los prototipos bajo la acción de las diferentes cargas estructurales y las diferentes combinaciones de carga. Se obtuvo acceso al programa, gracias a la colaboración de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, que cuenta con la licencia del SAP 2000 versión 15.

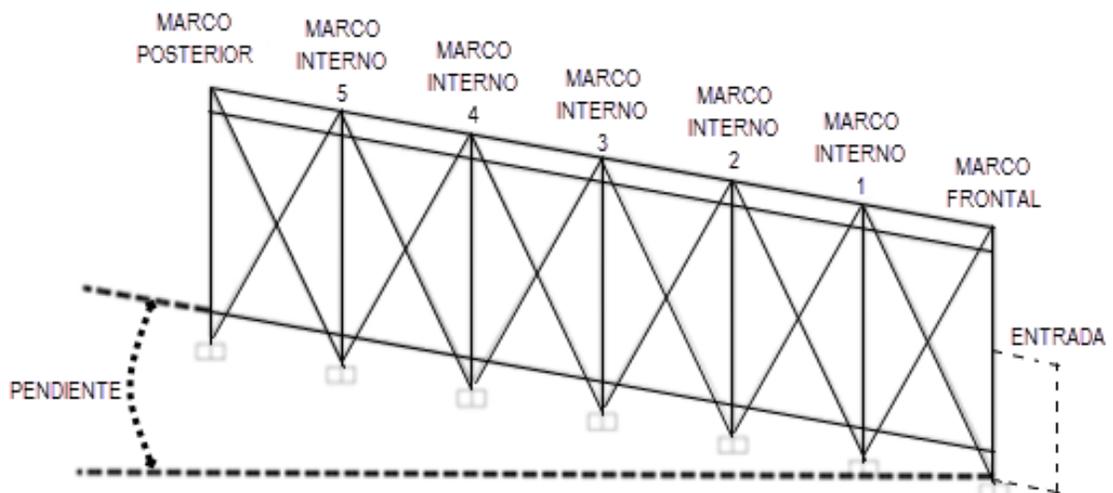


**Figura 3. 2** Marcos Prototipo con techo a dos aguas, tomado de Acuña (2013)

El prototipo, se compone de 7 marcos, un marco frontal que incluye la puerta del invernadero, 5 marcos internos, enumerados de la parte frontal a la posterior y un marco posterior. La distribución de los marcos se presenta en la Figura 3.3, la cual muestra el prototipo en su vista superior y en la Figura 3.4 se muestra colocación del prototipo ante diferentes condiciones de pendiente.



**Figura 3.3** Vista superior a altura de canoa (5 m) y posición de los marcos en la estructura, adaptado de Acuña (2013)



**Figura 3.4** Colocación del prototipo bajo condiciones de pendiente

### Casos de análisis:

Para conocer si el prototipo presenta cambios significativos en los esfuerzos en secciones requeridas para soportarlos al variar la pendiente y las condiciones topográficas del entorno se plantearon 9 casos de análisis.

- **Caso 1: Invernadero en condiciones de topografía plana (Caso Base)**

Como se indicó, este caso fue estudiado por Acuña (2013). En el mismo no se consideró efecto topográfico, debido a que utilizó una topografía plana ( $K_{zt} = 1$ ), y se consideró como una zona categoría B (ver Anexo A). Este caso servirá para comparar con los casos de análisis en pendiente evaluados en este estudio. La Figura 3.5 muestra el caso 1:

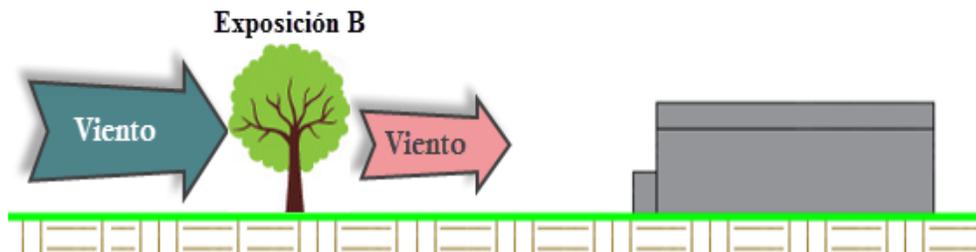


Figura 3. 5 Invernadero a nivel en condiciones de topografía plana

- **Caso 2: Invernadero a nivel en ladera con pendiente del 20%, exposición B**

Este caso contempla la utilización de terraza, que cortan la pendiente de una ladera para obtener terrenos nivelados. La pendiente de la ladera es de 20% ( $11,3^\circ$ ) y la categoría de exposición B (Ver Anexo A). La Figura 3.6 muestra el caso 2:



Figura 3. 6 Invernadero a nivel en condiciones de ladera del 20%, exposición B

• **Caso 3: Invernadero en ladera con pendiente del 20%, exposición B**

Contempla la instalación del invernadero siguiendo la pendiente del terreno, en este caso la pendiente de la ladera es de 20% ( $11,3^\circ$ ). La zona de exposición corresponde a la categoría B. La Figura 3.7 muestra el caso 3:

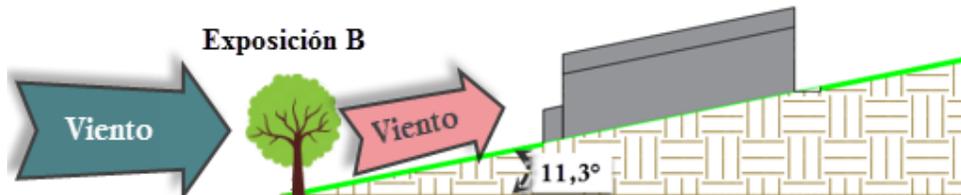


Figura 3. 7 Invernadero en condiciones de ladera del 20%, exposición B

• **Caso 4: Invernadero a nivel en ladera con pendiente del 40%, exposición B**

La pendiente de la ladera es de 40% ( $21,8^\circ$ ), por lo que el movimiento de tierra es mayor para este caso. La Figura 3.8 muestra el caso 4:

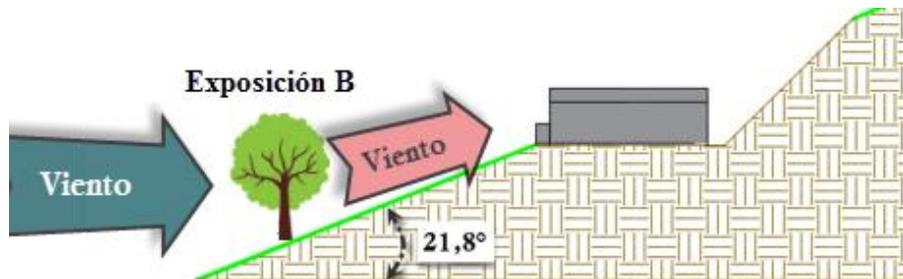


Figura 3. 8 Invernadero a nivel en condición de ladera a 40%, exposición B

• **Caso 5: Invernadero en ladera con pendiente del 40%, Exposición B**

Contempla la instalación del invernadero siguiendo la pendiente del terreno, en este caso la pendiente de la ladera es de 40% ( $21,8^\circ$ ). La zona de exposición corresponde a la categoría B. La Figura 3.9 muestra el caso 5:



Figura 3. 9 Invernadero en condición de ladera a 40%, exposición B

- **Caso 6: Invernadero a nivel en ladera con pendiente del 20%, exposición C**

Se utilizará una exposición categoría C. La Figura 3.10 muestra el caso 6:

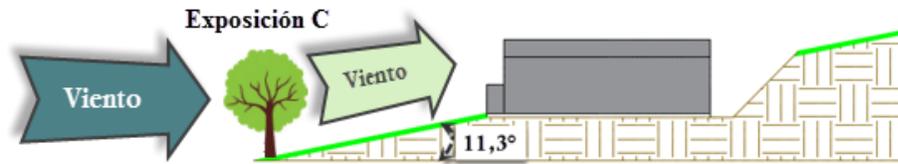


Figura 3. 10 Invernadero a nivel en condiciones de ladera de 20%, exposición C

- **Caso 7: Invernadero en ladera con pendiente del 20%, exposición C**

Se utilizará una exposición categoría C. La Figura 3.11 muestra el caso 7:

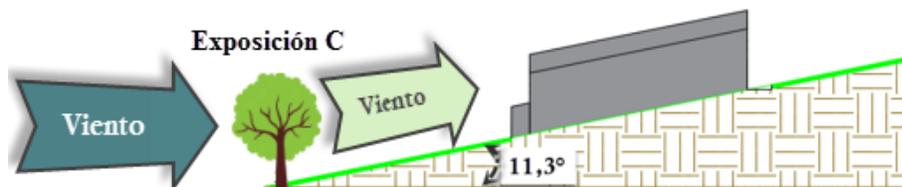


Figura 3. 11 Invernadero en condiciones de ladera a 20%, exposición C

- **Caso 8: Invernadero a nivel en ladera con pendiente del 40%, exposición C**

Se utilizará una exposición categoría C. La Figura 3.12 muestra el caso 8:

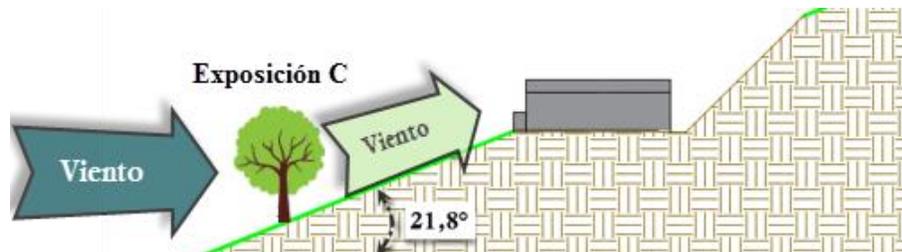


Figura 3. 12 Invernadero a nivel en condición de ladera a 40%, exposición C

- **Caso 9: Invernadero en ladera con pendiente del 40%, exposición C**

Se utilizará una exposición categoría C. La Figura 3.13 muestra el caso 9:

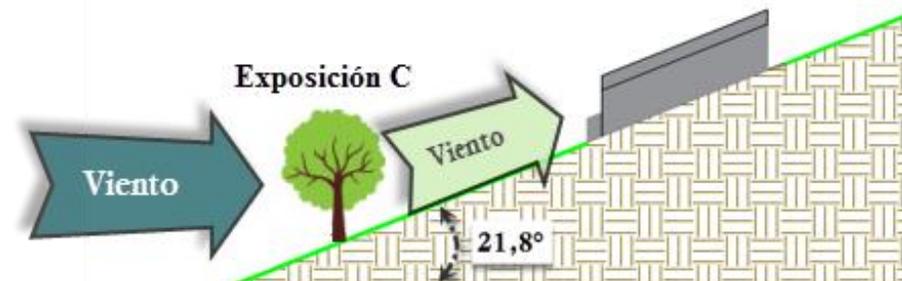


Figura 3. 13 Invernadero en condiciones de ladera a 40%

Para los diferentes casos se calculó el costo de instalar un invernadero en pendiente o en terraza, utilizando como variables comparativas el costo del acero de la estructura, la mano de obra asociada, el costo del movimiento de tierras y su respectivo traslado a una distancia de 5 km. Para los cálculos de movimiento de tierra de los casos 2, 4, 6 y 8, se consideró el desplazamiento de la capa de suelo fértil, aproximadamente 30 cm de profundidad, y se dejaron 2 m de distancia medidos horizontalmente al inicio del talud, considerado para efectos de mantenimiento de los invernaderos. Los taludes se establecieron de 1:1. Además se consideró un ancho de corte de 15 m, que incluyen los 9 m de ancho del invernadero y 3 m adicionales a cada lado para dar mantenimiento, así como espacio para el ingreso de vehículos al costado del mismo.

Los costos de mano de obra correspondientes a la instalación propia del acero para conformar el invernadero fueron establecidos en un 40% del costo del acero de la estructura. Otros componentes del costo no se evalúan ya que no generan variaciones representativas entre las alternativas, como por ejemplo, estudios topográficos, estudios de impacto ambiental, equipos para uso del invernadero, materiales de cubierta, instalaciones eléctricas, entre otros.

### **Cargas estructurales:**

#### **• Cargas permanentes:**

Tomando como base el modelo estructural y las secciones sugeridas en Acuña (2013), se realizó la sumatoria de todos los elementos de acero utilizados en la estructura. La carga permanente correspondiente al peso del acero es automáticamente calculado por el programa SAP 2000, por lo que no es necesario introducir estas cargas en el modelo, sin embargo es necesario conocer esta información para el cálculo de las cargas de sismo.

Al igual que la estructura, se utilizó el mismo material de cobertura seleccionado por Acuña (2013), es decir, una película flexible de PVC, con una densidad de  $920 \text{ kg/m}^3$  y un espesor de 0,20 mm.

• **Cargas temporales:**

Las cargas vivas se manejaron bajo recomendaciones de los manuales de diseño estructural, esto debido a que no se analiza para una situación en específico, sino más bien, para consideraciones generales. Las cargas vivas se desglosan a continuación:

- ✓ **Carga cultivo:** 10 kgf/m<sup>2</sup>
- ✓ **Carga instalaciones:** 7 kgf/m<sup>2</sup>
- ✓ **Carga mantenimiento:** 90 kg por operario, 2 operarios en los marcos

• **Cargas ambientales**

- ✓ **Carga de viento:**

Para el cálculo de la carga de viento, se utilizó la metodología de la ASCE (2010), aplicada la zona de Fraijanes, según se explicó en el apartado 3.1.1, realizando los análisis respectivos para las categorías de exposición B y C.

Las cargas de viento fueron aplicadas sobre las columnas y las cuerdas superiores de cada uno de los marcos con las magnitudes y direcciones calculadas.

- ✓ **Carga de sismo:**

Para el análisis de la carga de sismo se siguió la metodología expuesta por el Código Sísmico de Costa Rica (2010), considerando una zona sísmica tipo III, se asumió un sitio S3 ya que es uno de los más comunes en el país. Los invernaderos son catalogados como una edificación miscelánea.

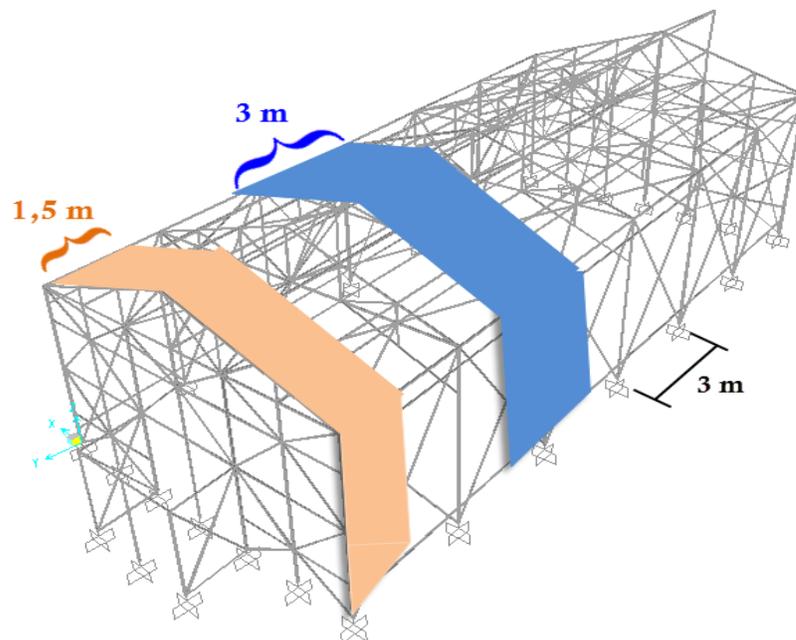
Una vez calculado el coeficiente sísmico, se multiplica por la masa de la estructura, y se obtiene la fuerza cortante en la base, es decir, la sumatoria de las fuerzas sísmicas, tal y como lo establece las ecuaciones 2,7-12 y 2,7-13 del Código Sísmico de Costa Rica del 2010.

Las cargas de sismo se aplicaron según su área tributaria sobre las columnas de los marcos, según la magnitud y dirección, ya sean en la dirección transversal o longitudinal del invernadero.

### Aplicación de las cargas sobre la estructura

Algunas cargas como la del plástico, cultivo, carga de instalaciones y la carga de viento, están calculadas como una fuerza por unidad de área, y son aplicadas a los marcos de acuerdo al área tributaria.

Para ello las cargas fueron multiplicadas por un ancho tributario, definido por la mitad del distanciamiento entre los marcos, con el fin de obtener una carga distribuida linealmente y aplicable sobre los elementos de interés de los marcos de la estructura. La Figura 3.14 ejemplifica el proceso de selección del ancho tributario.



**Figura 3. 14** Selección del ancho tributario para el marco frontal (naranja) y el marco interno 2 (azul)

Para la carga de viento perpendicular sobre los marcos frontal y posterior, se distribuyó de igual manera.

### Combinación de cargas

De acuerdo al Código Sísmico de Costa Rica del año 2010, la estructura del invernadero, así como cada elemento o unión que la componen, debe tener capacidad para resistir la carga última que actúa sobre esta, la carga última estará determinada por las diferentes combinaciones de carga.

$$CU = 1,4 CP \quad (a)$$

$$CU = 1,2 CP + 1,6 f_R CT \pm 1,6 CE \quad (b)$$

$$CU = 1,06 CP + f_1 f_R CT \pm CS \pm CE \quad (c)$$

$$CU = 0,95 CP \pm CS \pm CE \quad (d)$$

En donde:

CU = Carga última de diseño

CP = Carga permanente, incluye todas las cargas muertas

CT = Carga temporal, incluye todas las cargas vivas

CS = Carga sísmica

CE = Carga de empuje, representada por el peso de suelo, agua o material que actúe sobre las paredes de una edificación. En este proyecto se considerará como la carga de viento que empuja la estructura. Aunque en normativas como la ASCE (2010) y el Código Internacional de Construcción del 2012 utilizan un factor de 1 para la carga de viento, en este trabajo se considerará un factor de 1,6, esto debido a la gran incertidumbre de los eventos de ráfaga máxima de viento, ya que los mismos no se reportan en la información del IMN, y la importancia de esta carga en los diseños de ambientes protegidos.

$f_1$  = Factor de probabilidad de ocupación durante evento de sismo, tendrá un valor de 1 cuando es alta la probabilidad de ocupación durante el sismo, un valor 0,5 cuando es baja y un valor de 0 para cargas temporales en el techo.

$f_R$  = Factor de reducción de carga temporal

En el caso del factor de probabilidad, se consideró dividir la carga temporal en dos partes, siendo la primera ( $CT_1$ ) las cargas correspondientes a cultivo y equipos, los cuales se encuentran ubicados por debajo del techo, tendrán un  $f_1 = 1$ , ya que existe una alta probabilidad de que estén presente durante un evento de sismo. La segunda ( $CT_2$ ), las cargas temporales debido al personal de mantenimiento, como actúan sobre el techo, el valor de  $f_1$  será igual a 0.

Para el caso del factor de reducción de carga temporal, no se permite la reducción de la carga temporal cuando sea menor o igual a  $200 \text{ kg/m}^2$ , por lo cual, se utilizará un valor  $f_R = 1$ .

Las cargas de empuje en este proyecto son definidas por las cargas de viento, las cuales se deben aplicar tanto en la dirección longitudinal del invernadero (CVL), como en la dirección

transversal del invernadero (CVT). Es importante que para ambas direcciones hay dos casos de estudio, ya que por la gran variabilidad de la dirección del viento, se debe analizar en los dos sentidos de cada dirección.

Se aclara que en el análisis de viento, el concepto de carga positiva (+) implica presión sobre la pared y la carga negativa (-) implica succión, por tanto, el análisis en ambos sentidos de una misma dirección no se indica en las combinaciones 3, 5, 12 y 14 con signo negativo (-), sino más bien con el subíndice 2 (por ejemplo  $CVL_2$ ).

A diferencia de como se establece en el CSCR (2010), se consideró muy poco probable que tanto la carga máxima de empuje como el evento de sismo ocurran en el mismo instante, por lo que estas cargas no aparecerán juntas en las combinaciones. Por lo tanto, las diferentes combinaciones aplicadas en el análisis para obtener la carga última se muestran a continuación:

$$\begin{aligned}
 CU &= 1,4 CP & (1) \\
 CU &= 1,2 CP + 1,6 f_R CT + 1,6 CVL_1 & (2) \\
 CU &= 1,2 CP + 1,6 f_R CT + 1,6 CVL_2 & (3) \\
 CU &= 1,2 CP + 1,6 f_R CT + 1,6 CVT_1 & (4) \\
 CU &= 1,2 CP + 1,6 f_R CT + 1,6 CVT_2 & (5) \\
 CU &= 1,06 CP + f_1 f_R CT_1 + f_1 f_R CT_2 + CSL & (6) \\
 CU &= 1,06 CP + f_1 f_R CT_1 + f_1 f_R CT_2 - CSL & (7) \\
 CU &= 1,06 CP + f_1 f_R CT_1 + f_1 f_R CT_2 + CST & (8) \\
 CU &= 1,06 CP + f_1 f_R CT_1 + f_1 f_R CT_2 - CST & (9) \\
 CU &= 0,95 CP + CVL_1 & (10) \\
 CU &= 0,95 CP + CVL_2 & (11) \\
 CU &= 0,95 CP + CVT_1 & (12) \\
 CU &= 0,95 CP + CVT_2 & (13) \\
 CU &= 0,95 CP + CSL & (14) \\
 CU &= 0,95 CP - CSL & (15) \\
 CU &= 0,95 CP + CST & (16) \\
 CU &= 0,95 CP - CST & (17) \\
 CU &= 1 CP + 1 f_R CT + 1 CV & (18)
 \end{aligned}$$

La última combinación de carga, fue utilizada únicamente para el análisis de las deformaciones permisibles en los elementos.

### **Comprobación de las secciones y elementos de las estructuras**

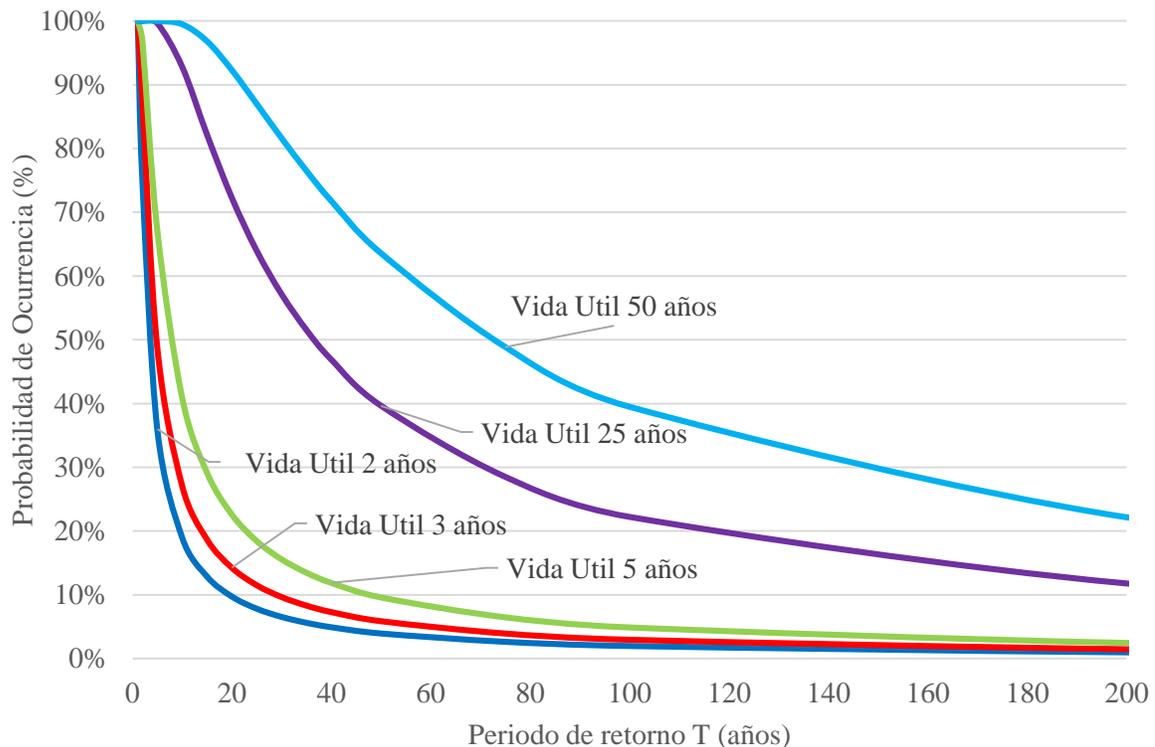
Para cada uno de los 9 casos de análisis fueron evaluados los elementos para que cumplan con las condiciones de diseño establecidas por el método del Diseño de Factores de Carga y Resistencia (LRFD por sus siglas en inglés). Las secciones deben soportar los esfuerzos resultantes de las combinaciones de cargas utilizadas en el análisis estructural. En caso de que los elementos no cumplan con los requerimientos de diseño según la propuesta originalmente planteada, se cambian hasta encontrar una sección que si cumpla.

El procedimiento y ecuaciones para la comprobación de secciones y elementos por el método LRFD se encuentran detalladas en la metodología del AISI en sus manuales de diseño de acero laminado en frío, los cuales son ampliados en Yu y LaBoube (2010), y debidamente explicadas en Acuña (2013), por lo que no se consideró necesario detallarlo en este documento.

## Capítulo 4. Efecto de la carga de viento

### 4.1. Probabilidad de ocurrencia asociada a la vida útil de la instalación

Como se mencionó en la sección 2.7, la relación entre una variable aleatoria, en este caso la velocidad del viento, y el periodo de retorno que será utilizado para cualquier obra ingenieril, presenta una amenaza asociada de que un evento se presente en igual o mayor magnitud al analizado, esta amenaza dependerá también de la vida útil del material o periodos de observación que se contemplen. Lo anterior se muestra en el Gráfico 4.1, el cual se construyó aplicando la Ecuación 2.8.



**Gráfico 4. 1** Probabilidad de ocurrencia de al menos un evento asociado a un periodo de retorno según su vida útil

Debido a la falta de información para instalaciones de agricultura protegida en la determinación del riesgo o la probabilidad de excedencia asociada a un periodo de retorno a aplicar en el diseño, se ha utilizado las recomendaciones metodológicas del Código Sísmico

de Costa Rica 2010, el cual establece valores de riesgo para estructuras según su ocupación. El CSCR 2010 menciona que para estructuras normales se considera para el diseño una probabilidad de excedencia del 10% para una vida útil de 50 años, lo cual corresponde a un periodo de retorno de 475 años. Sin embargo para estructuras de poca ocupación o de bajo riesgo, pueden disminuir estos parámetros en un 25%. Sin embargo, el CSCR 2010, no contempla una relación entre una poca ocupación de personas dentro de la estructura y una corta vida útil (menor a 50 años).

Por tal motivo, se establecen sugerencias para las instalaciones agrícolas de ambientes protegidos, que contemplará una diferenciación del riesgo para los materiales de cobertura y de la estructura.

Para las estructuras metálicas del invernadero, se propone utilizar una probabilidad de excedencia de un 12,5% para una vida útil de 25 años, correspondiente a un periodo de retorno de 185 años, contemplando así las recomendaciones de disminución de riesgo por ocupación humana el dadas por el CSCR 2010.

Para las coberturas plásticas del invernadero, se propone utilizar una probabilidad de excedencia de un 20% para una vida útil de 5 años, correspondiente a un periodo de retorno de 20 años, contemplando así las recomendaciones de disminución de riesgo por ocupación humana dadas por el CSCR 2010 y la corta vida útil del plástico producida por las condiciones climáticas, principalmente radiación ultravioleta.

#### 4.2. Metodología ASCE (2010) aplicada en la zona de Fraijanes, Alajuela.

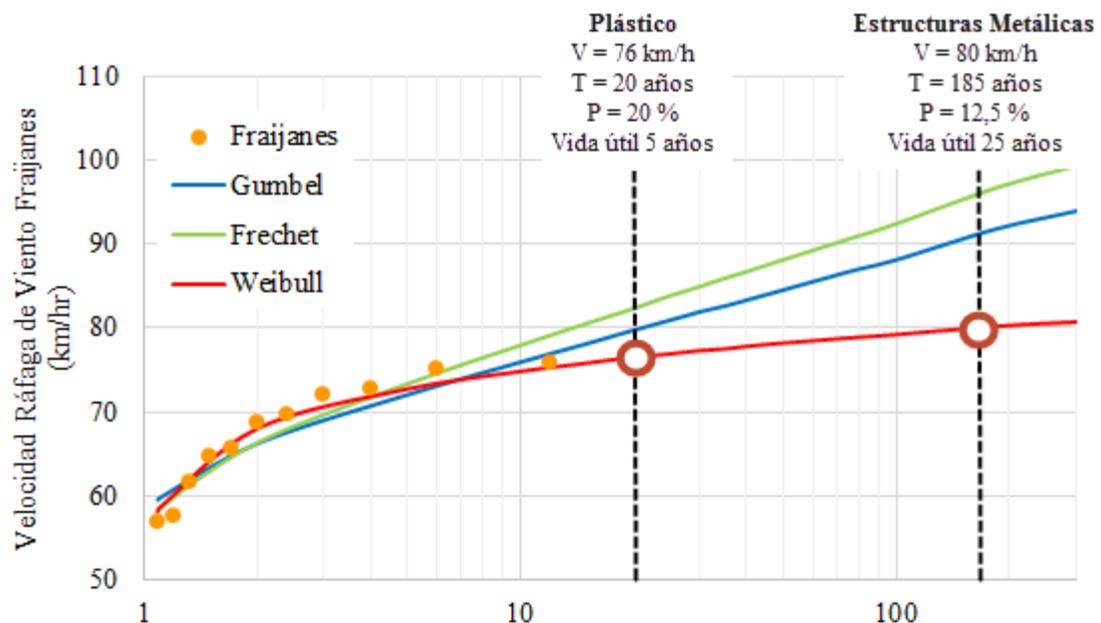
**Paso 1. Seleccionar la categoría de riesgo del edificio:** Se utilizó un factor de riesgo de 1, puesto que la metodología ASCE (2010) no lo contempla dentro de sus cálculos. Este factor ayuda a reducir las cargas de viento según el grado de importancia o riesgo para la vida humana que represente la edificación.

**Paso 2. Determinar la velocidad de viento:** De los valores suministrados por el IMN, se seleccionaron las velocidades promedio horarias máximas anuales, y se les aplicó el factor de ráfaga, para obtener las velocidades de ráfaga de viento máximas anuales. Los resultados se muestran en la Tabla 4.1

**Tabla 4. 1** Velocidad promedio máxima horaria de la Estación de Fraijanes según datos del IMN y la Velocidad de Ráfaga asociada

Año	Velocidad Máxima Promedio horaria (km/h)	Velocidad Ráfaga de viento (km/h)*
2003	29,2	64,7
2004	32,4	71,9
2005	34,2	75,9
2006	33,8	75,1
2007	29,5	65,5
2008	32,8	72,7
2009	31,0	68,7
2010	31,3	69,5
2011	26,0	57,5
2012	27,7	61,5
2013	25,6	56,7
<b>Promedio <math>\bar{x}</math></b>		<b>67,3</b>
<b>Desviación Estándar <math>\sigma</math></b>		<b>6,7</b>
*Calculados a partir del factor de ráfaga expresado por Sachs (1978) de 2,22		

Al aplicar los modelos de distribución estadísticos, se obtuvieron las velocidades de ráfaga máximas asociadas a distintos periodos de retorno, las cuales se compararon con los valores reales de la zona de Fraijanes. Se debe analizar cuál es la modelación o distribución estadística que mejor se ajusta a los datos experimentales. El Gráfico 4.2 muestra las distribuciones de Gumbel, Frechet y Weibull (líneas) con respecto a los valores reales de Fraijanes (puntos), siendo la distribución Weibull la que mejor se ajusta. Debido a que solo se cuenta con 11 años de datos para la zona, la incertidumbre o confiabilidad para grandes extrapolaciones aumenta.



**Gráfico 4. 2** Velocidad ráfaga de viento asociada a un periodo de retorno

Del Gráfico 4.2 se pueden determinar las velocidades de ráfaga máximas para el análisis de los materiales de cobertura plástico y la estructura del invernadero. Para el caso de las coberturas plásticas la velocidad corresponde a una magnitud de 76 km/h, mientras que para las estructuras metálicas, la velocidad corresponde a una magnitud de 80 km/h. A partir de los 75 km/h, la distribución Weibull muestra un comportamiento muy horizontal, situación que no genera muchas variaciones en las magnitudes de las velocidades de viento al aumentar el periodo de retorno de interés.

El ajuste fue comprobado por las pruebas de verificación o pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling y la Chi-cuadrado. Con estas pruebas y con ayuda del programa estadístico EasyFit, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.2, donde se verifica que la distribución Weibull es la que mejor se ajusta para el presente estudio, por lo que será la utilizada para los cálculos siguientes.

**Tabla 4. 2** Resultado de pruebas de verificación o bondad de ajuste

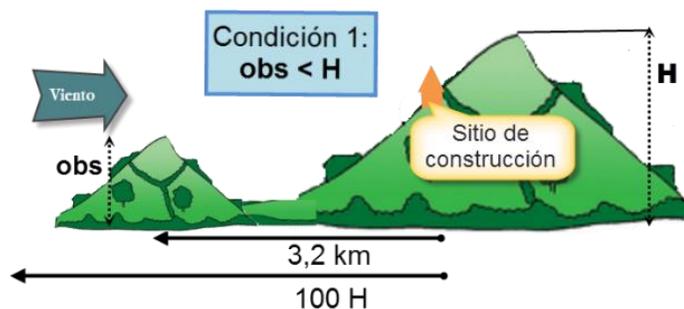
Distribución	Kolmogorov- Smirnov			Anderson Darling			Chi-cuadrado		
	D	Valor Crítico	Orden*	A <sup>2</sup>	Valor Crítico	Orden*	X <sup>2</sup>	Valor Crítico	Orden*
<b>Frechet</b>	0,17	0,39	2	0,41	2,5	2	0,62	3,84	3
<b>Gumbel</b>	0,2		3	0,69		3	0,0002		1
<b>Weibull</b>	0,12		1	0,23		1	0,08		2

**Nota:**  
 \*La columna orden en cada una de las pruebas muestra el clasificación de las distribuciones según sea su mejor ajuste, siendo (1) la distribución de mejor ajuste y (3) la distribución de menos ajuste, tomando como referencia los datos experimentales

Las variables estadísticas D, A<sup>2</sup> y X<sup>2</sup> se detallan en el Anexo C

**Paso 3. Determinar los parámetros de la carga de viento:** Para el cálculo del factor de topografía  $K_{zt}$  se analizaron con mayor detalle las 5 condiciones necesarias para que se pueda aplicar este factor. Dicha interpretación se ejemplifica mediante esquemas con las características de la ladera donde se encuentra la zona de Fraijanes. Las 5 condiciones se detallan a continuación:

- i. La ladera está aislada y sin obstrucciones topográficas similares, en una distancia horizontal equivalente a 100 veces la altura de la cima de la ladera o en una distancia de 3,2 km en barlovento, la que sea menor. (Ver Figura 4.1).



**Figura 4. 1** Condición 1 para el uso de factor topográfico

Para el caso de la Finca Experimental Fraijanes, este se encuentra a una elevación de 1764 msnm, y la cima de la ladera, corresponde a la cima del Volcán Poás a una elevación de 2.696 msnm, mientras que el punto más bajo está ubicado a más de 20,6 km al Sur Oeste del Volcán Poás, a una elevación de 800 msnm, por lo que la altura  $H$  equivaldría a 1.896 m. ( $H = 2696 \text{ msnm} - 800 \text{ msnm}$ ).

Al considerar una distancia de 3,2 km a barlovento del sitio de construcción, no existe una elevación u obstrucción topográfica que tenga una altura similar a la altura  $H$  de la ladera, por lo que se cumple la condición 1.

- ii. La cima de la ladera es al menos dos veces más alta que el resto del terreno en un radio de 3,2 km alrededor. (Ver Figura 4.2)



**Figura 4. 2** Condición 2 para el uso de factor topográfico

La ladera donde se encuentre el sitio de construcción debe sobresalir significativamente por encima del terreno por un factor de 2 o más. Por ejemplo, si una irregularidad topográfica en los alrededores del sitio de construcción tiene una altura de 30 m sobre el nivel del terreno y este último está acotado a 800 msnm, entonces la cima de la ladera debe tener al menos una elevación de 860 msnm [ $800\text{m} + (2 \times 30\text{m})$ ] dentro del radio de 3.2 km a barlovento.

En el caso de la ladera donde se encuentra el sitio de construcción no se presentan irregularidades topográficas en un radio de 3,2 km, medidos horizontalmente de la cima de la ladera, por lo que cumple con la condición 2.

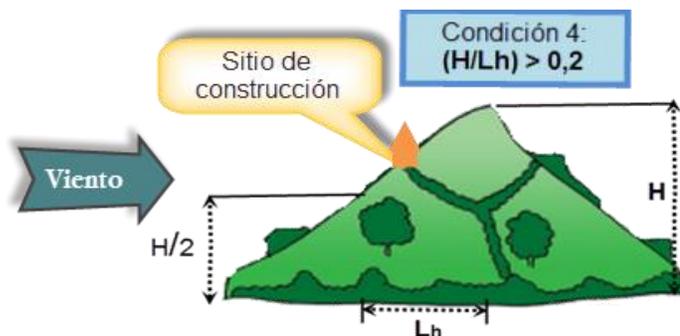
iii. La estructura está localizada en la mitad superior o cerca de la cima (Ver Figura 4.3).



**Figura 4. 3** Condición 3 para el uso de factor topográfico

La FEF se encuentra a una altura de 1.764 msnm, mientras que la elevación media de la montaña ( $H/2$ ) corresponde a una elevación de 1.748 msnm [ $H/2 = (1.896 \text{ m}/2) + (800 \text{ msnm})$ ], por lo que el sitio de construcción se encuentra en la mitad superior de la montaña, cumpliendo la condición 3.

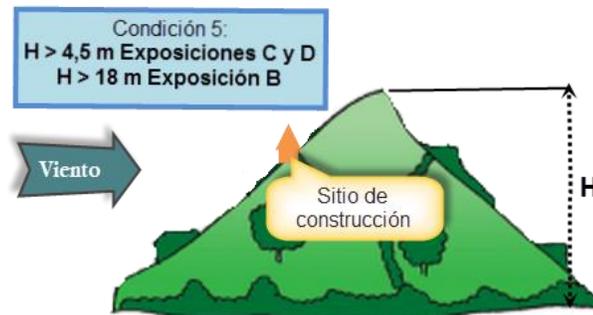
iv. La razón entre la altura de la montaña y la distancia entre la cima y la altura media de la montaña medida horizontalmente, es mayor o igual a 0,2 ( $H/L_h \geq 0,2$ ) (Ver Figura 4.4).



**Figura 4. 4** Condición 4 para el uso de factor topográfico

La distancia  $L_h$  corresponde a la distancia medida horizontalmente desde la cima de la ladera (cima Volcán Poás) hasta el lugar donde se encuentre la elevación media de la ladera ( $H/2$ ), en sentido barlovento, tal y como se muestra en la Figura 5, por lo que realizando la medición correspondería a una distancia  $L_h = 5.250 \text{ m}$ , y al efectuar la razón  $H/L_h$  esta es igual a 0,36, es decir, cumple con la condición 4

- v. La altura de la montaña o cima es mayor o igual a 4,5 m para una exposición categoría C y D, y mayor o igual a 18 m para una exposición categoría B (Figura 4.5).



**Figura 4. 5** Condición 5 para el uso de factor topográfico

La altura  $H$  de la ladera del sitio de construcción es de 1.896 m, por lo que cumple con la condición 5.

Al cumplir con las 5 condiciones se debe utilizar el factor de topografía dentro de sus cálculos. En la Tabla 4.3 se muestra un resumen de las variables necesarias para el cálculo del factor de topografía.

**Tabla 4. 3** Variables topográficas para el análisis del factor de topografía

VARIABLES TOPOGRÁFICAS	SÍMBOLO	VALOR
Altura de la montaña	$H$	1.896 m
Distancia horizontal desde la cima de la montaña hasta $H/2$	$L_h$	5.250 m
Distancia horizontal desde la cima de la montaña hasta el sitio de construcción	$x$	6.000 m
Distancia vertical desde la altura del terreno hasta el sitio de construcción	$z$	965 m
Factor que aceleración según las características topográficas*	$K_1$	0,14
Factor de reducción de la velocidad según distancia horizontal respecto a la cima de la ladera*	$K_2$	0,79
Factor de reducción de la velocidad según la altura de la estructura sobre el terreno local*	$K_3$	0,87
<b>Factor de Topografía**</b>	<b><math>K_{zt}</math></b>	<b>1,2</b>
<b>Nota:</b> Ver Anexo A		
* Anexo A, Tabla A.3		
** Resultado Ecuación 2.1		

Los factores restantes como el factor de dirección del viento ( $K_d$ ) y los coeficientes de presión interna ( $GC_{pi}$ ), dependen de la forma y el tipo de encerramiento de la edificación, mientras que el factor por el efecto de ráfaga, la metodología permite utilizar el valor de 0,85 para cualquier tipo de edificación. En la tabla 4.4 se muestran los resultados de los valores obtenido para estos factores.

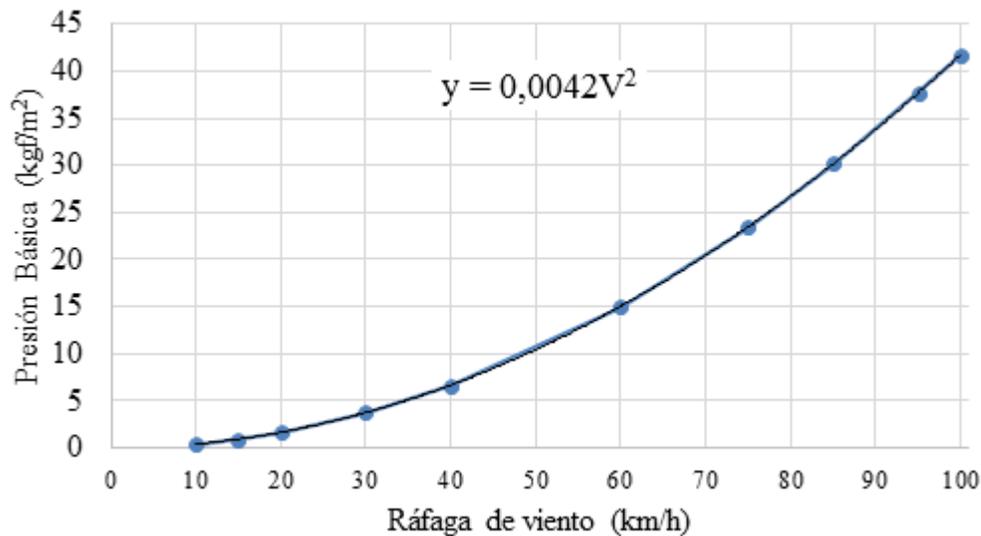
**Tabla 4.4** Variables y factores utilizadas y calculadas para el análisis de la presión de viento de diseño

VARIABLES TOPOGRÁFICAS	SÍMBOLO	VALOR
Tipo de Exposición		C
Factor de direccionalidad del viento*	$K_d$	0,85
Factor de efecto de ráfaga	G	0,85
Coefficiente de presión interna para invernadero cerrado**	$GC_{pi}$	$\pm 0,18$
Coefficiente de presión interna para invernadero parcialmente cerrado**	$GC_{pi}$	$\pm 0,55$
Coefficiente de presión interna para invernadero abierto**	$GC_{pi}$	0
<b>Nota:</b> Ver Anexo A		
* Anexo A, Tabla A.4		
** Anexo A, Tabla A.6		

Una vez establecidos el valor de ráfaga de viento y las condiciones topográficas de los alrededores de la zona de construcción, es necesario establecer otros factores para poder obtener los valores de las presiones de diseño máximos, estos factores se muestran en la Tabla 4.4. En el anexo A se muestran las principales tablas de la ASCE (2010) para el cálculo de estas variables.

**Paso 4. Determinar el coeficiente de presión debido a la altura del edificio ( $K_z$ ):** Este factor depende de la categoría de exposición y la altura de la edificación. Para el caso de Fraijanes corresponden a una categoría de exposición C y una altura de canoa de 5m de altura, por lo que el coeficiente  $K_z$  es de 0,85. (Ver Anexo A, tabla A.5)

**Paso 5. Determinar la presión básica del viento:** Con base en la información de la velocidad de ráfaga de viento  $V$ , el efecto de la topografía  $K_{zt}$ , el factor de direccionalidad  $K_d$  y el coeficiente de presión debido a la altura del edificio  $K_z$  y se aplicó la Ecuación 2.2 ( $q_z = 0,613K_zK_{zt}K_dV^2$ ) a diferentes velocidades de viento las cuales son asociadas a los periodos de retorno, obteniendo el Gráfico 4.3.



**Gráfico 4.3** Aumento de la Presión Básica de viento al aumentar la velocidad de ráfaga

**Paso 6. Determinar los coeficientes de presión externa de la estructura según su forma y tipo de cerramiento (GCp y GCN):** De acuerdo a la metodología para el cálculo de los coeficientes de presión externa, se hace una primera distinción, entre las paredes y el techo de la edificación. En el caso de las paredes estos dependerán del tipo de cerramiento que posean, y para los techos varían de acuerdo a la forma de diseño utilizados. La Tablas 4.5 y 4.6 muestran un resumen de los coeficientes de presión externa utilizados.

**Tabla 4.5** Coeficientes de presión externa en paredes según tipo de cerramiento, Cp

Superficie	Tipo de cerramiento	
	Cerrado y Parcialmente Cerrado	Abierto
Paredes		
Barlovento*	+0,8	0
Sotavento*	-0,7	0
Laterales*	-0,3, -0,5	0

**Nota:** Los signos positivos y negativos representan las presiones de empuje o succión respectivamente. Los coeficientes de presión externa para paredes laterales varían al cambiar la orientación del viento, longitudinal o transversal al invernadero. Hay que estudiar ambos casos por separado.  
\*Anexo A, Tabla A.7

**Tabla 4. 6** Coeficientes de presión externa para techos arqueados  $C_p$  y  $C_N$

Dirección del Viento	Detalle	Coeficientes de Presión externa*
Longitudinal	Distancia medida horizontalmente de la cara barlovento**	$C_p$ y $C_N$
	0 a $h/2$	-0,9, -0,18
	$h/2$ a $h$	-0,9, -0,18
	$h$ a $2h$	-0,5, -0,18
	$>2h$	-0,3, -0,18
Transversal	Techos en edificaciones elevadas	$C_p$ y $C_N$
	Barlovento	-0,9
	Central	-0,87
	Sotavento	-0,5
<b>Nota:</b> *En caso de que aparezcan 2 posibles valores para los coeficientes de presión externa, ambos deben ser analizados. **h = Altura media del invernadero. En el caso del prototipo utilizado $h=5,75$ m		

**Paso 7. Determinar la presión de viento en cada una de las caras del edificio:** Se aplicaron las Ecuaciones 2.3 y 2.4 para la obtención de las presiones o cargas de viento en las diferentes caras del invernadero. El prototipo que generó las mayores presiones en las caras del invernadero, es el parcialmente cerrado. En la sección 4.4 se muestran los resultados obtenidos de carga de viento para un prototipo de invernadero con techo en arco ubicado en la zona de Fraijanes.

Se realizó además, el análisis de la carga de viento utilizando la metodología ASCE (2010), con la velocidad de viento recomendada por el RCCR (1983), es decir, los 100 km/h

### **4.3. Metodología RCCR (1983) aplicada en la zona de Fraijanes, Alajuela.**

**Paso 1. Determinar la presión básica del viento:** El RCCR (1983) recomienda una presión básica de viento, tal y como se expresó en la Ecuación 2.5. Al encontrarnos en una zona como topografía irregular se aplicó el aumento del 20% en esta presión, por lo que para la zona de Fraijanes. El RCCR (1983) establece una velocidad mínima de diseño de 100 km/h, a ser considerada dentro de los análisis de carga de viento, por lo que la presión básica de viento para la zona de Fraijanes sería  $q_z = 60\text{kgf/m}^2$

**Paso 2. Determinar los factores de forma de la edificación:** Se utilizaron los valores del factor de forma correspondientes a las diferentes caras del invernadero, según la Tabla 2.3, sin embargo se hace notar, la ausencia de factores de forma para las caras laterales en edificaciones cerradas.

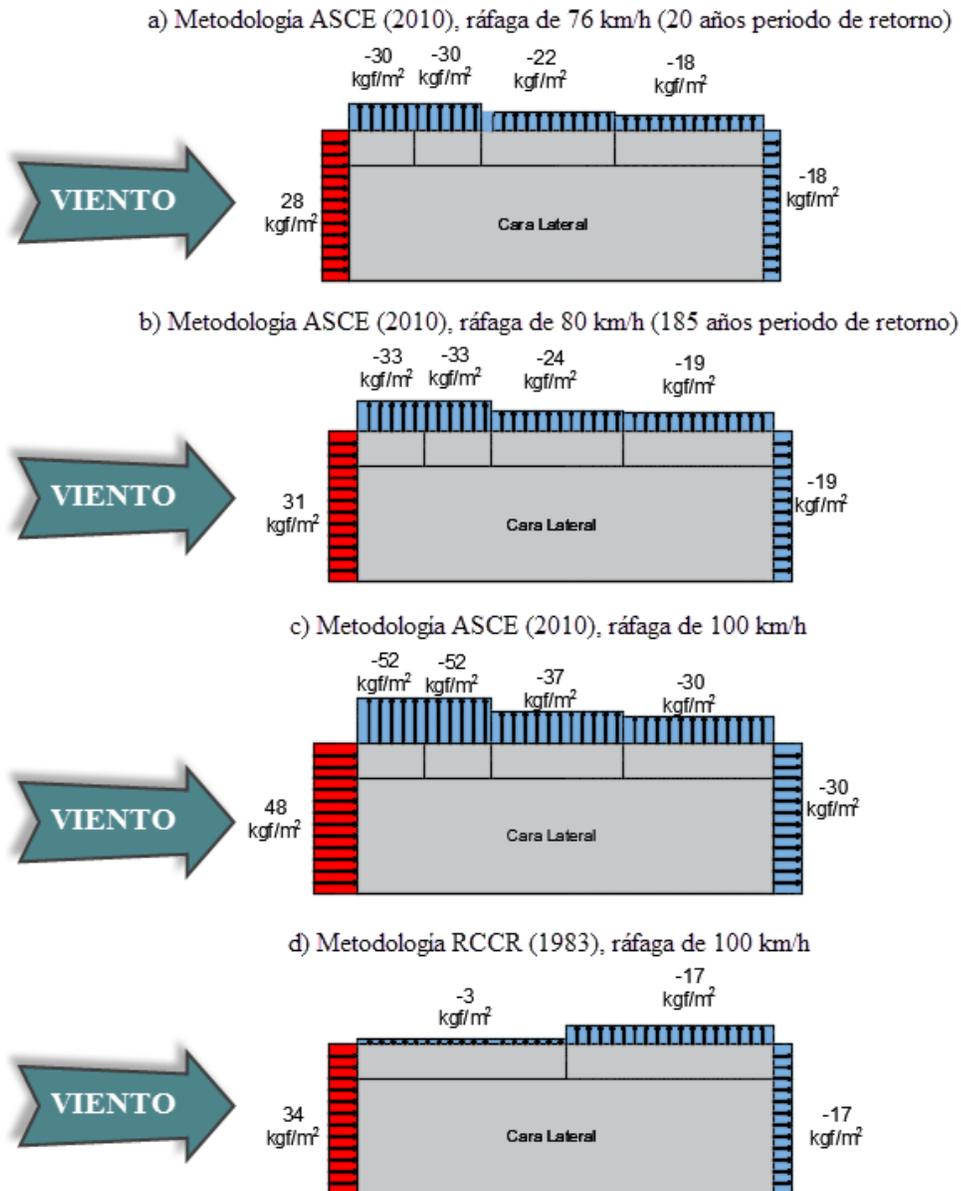
**Paso 3. Determinar la presión de viento en cada una de las caras del edificio:** Se aplicó la Ecuación 2.6 para la obtención de las presiones o cargas de viento en las diferentes caras del invernadero. En la sección 4.4 se muestran los resultados obtenidos de carga de viento para un prototipo de invernadero con techo en arco ubicado en la zona de Fraijanes.

#### **4.4. Comparación de metodologías de carga de viento**

Al comparar el caso específico de la zona de Fraijanes, la presión básica de viento de generada con la metodología ASCE (2010) es un 30% menor que la presión básica recomendada por el RCCR (1983), ya que al comparar estas presiones para una misma velocidad de viento, 100 km/h, la presión básica de viento según ASCE (2010) tiene una magnitud de 42 kgf/m<sup>2</sup> mientras que según el RCCR 1983, bajo las mismas condiciones tendría una magnitud de 60 kgf/m<sup>2</sup>.

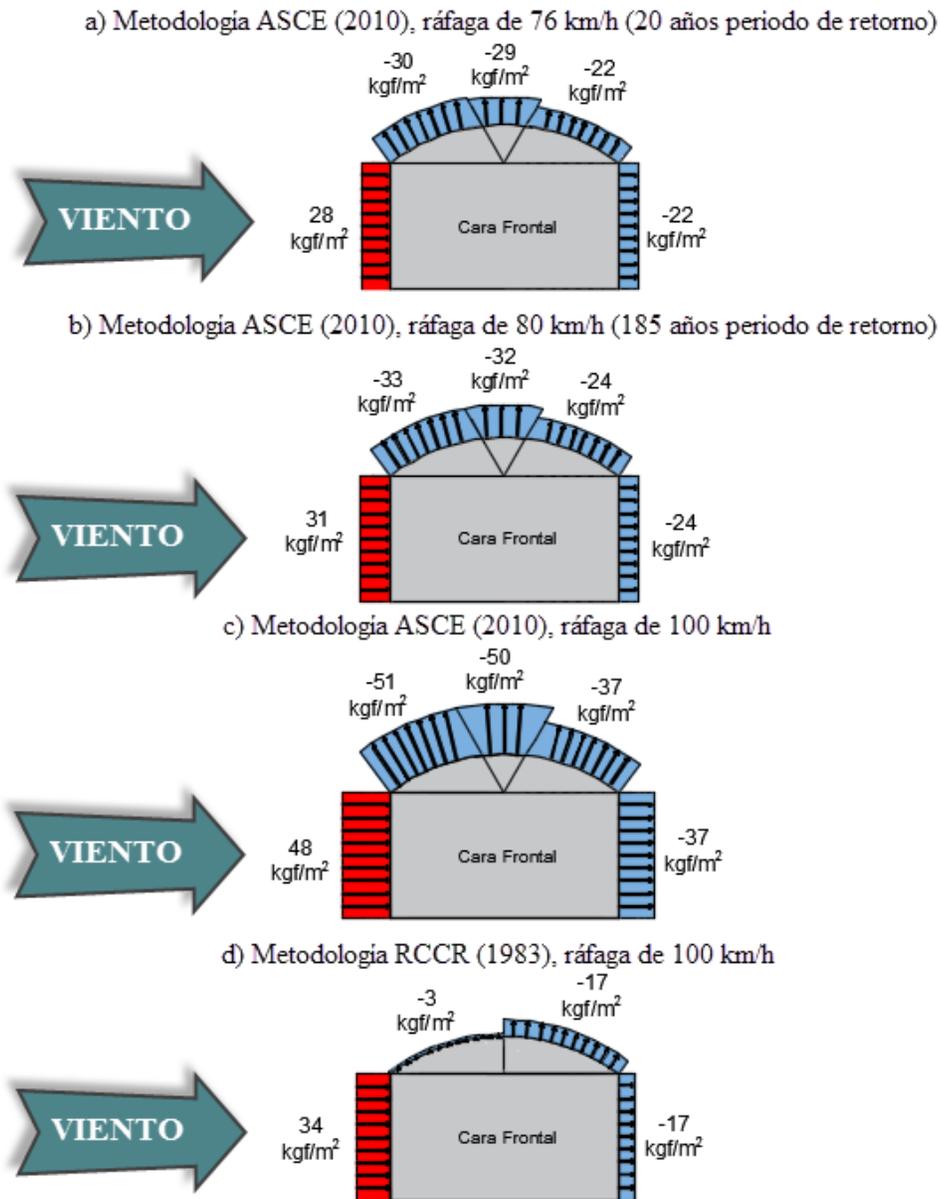
Por otra parte, se calcularon las presiones máximas absolutas obtenidas en las caras de un invernadero parcialmente cerrado según las 2 metodologías, a través de 4 ejemplos: (i) Recomendación para coberturas plásticas utilizando la metodología ASCE (2010) con una ráfaga de viento de 76 km/h, 20 años periodo de retorno. (Ver Figura 4.6.a y 4.7.a), (ii) Recomendación para estructuras metálicas utilizando la metodología ASCE (2010) con una ráfaga de viento de 80 km/h, 185 años periodo de retorno (Ver Figura 4.6.b y 4.7.b), (iii) Aplicación de la metodología ASCE (2010) con una ráfaga de viento de 100 km/h (Ver Figura 4.6.c y 4.7.c), y (iv) Aplicación de la metodología RCCR (1983) con una ráfaga de viento de 100 km/h (Ver Figura 4.6.d y 4.7.d)

Para las Figuras 4.6 y 4.7, los valores positivos, en color rojo, representan fuerzas de empuje sobre la cobertura, es decir, que tiene dirección hacia el interior del invernadero, mientras que los valores negativos, en color azul, representan fuerzas de succión, es decir, que tiene dirección saliente del invernadero.



**Figura 4.6** Presiones de viento en las caras de un invernadero parcialmente cerrado, con una ráfaga de viento en dirección longitudinal para diferentes periodos de retorno y metodologías de cálculo

La figura 4.6 muestra una primer diferencia entre las metodologías aplicadas, en donde para la metodología ASCE (2010) las presiones de succión son máximas en la mitad del invernadero que se encuentra a barlovento, mientras que con el RCCR (1983) se encuentran en la mitad posterior del invernadero.



**Figura 4. 7** Presiones de viento en las caras del invernadero parcialmente cerrado, con una ráfaga de viento en dirección transversal para diferentes periodos de retorno y metodologías de cálculo

Al comparar los resultados generados con la metodología ASCE (2010) (Figuras 4.7.a, 4.7.b, 4.7.c), y aplicar las consideración de diseño para la cobertura y la estructura del invernadero, se obtienen diferencias en las carga de viento entre un 35% y un 42% menores a la presión calculada con una velocidad de ráfaga de 100 km/h. Lo anterior evidencia la necesidad de un estudio de las condiciones del sitio de construcción cuando se diseña.

Los resultados mostrados en las Figuras 4.6.c, 4.6.d, 4.7.c y 4.7.d, muestran diferencias bastantes significativas entre las metodologías ASCE (2010) y el RCCR (1983), en donde se obtienen diferencias de hasta un 94% en las presiones de succión generadas en los techos a barlovento. En cuanto a las presiones de empuje generadas en las caras barlovento del invernadero, el RCCR (1983) presenta una disminución de un 30% en la presión respecto a la misma cara del invernadero para la metodología ASCE (2010), esta disminución es ocasionada por el factor de riesgo utilizado, y demuestra la importancia de este factor dentro de las consideraciones de diseño.

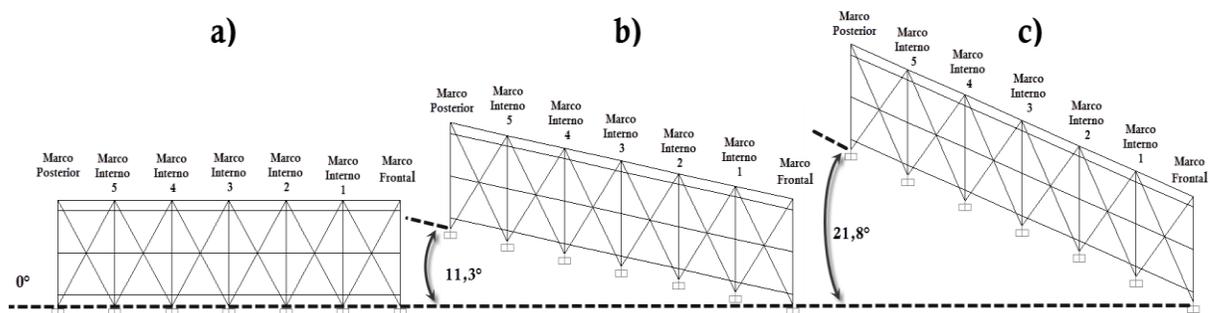
El RCCR (1983) no hace referencia a los coeficientes de presión externa para paredes laterales en edificaciones cerradas, ni con techos o superficies circulares, por lo que no permite un análisis comparativo detallado entre los 4 ejemplos.

De acuerdo a los resultados mostrados en la Figuras 4.6.a, 4.6.b, 4.7.a y 4.7.b, no se justifica realizar una separación en el diseño en cuanto a la vida útil de los materiales de construcción, esto para el caso particular de Fraijanes, en donde las variaciones de velocidad son mínimas para periodos de retorno mayores.

Los resultados sugieren la importancia de tener en el país un código de viento que establezca mapas de velocidades de ráfaga de viento para diferentes periodos de retorno, lo que permitiría unificar esfuerzos y metodologías para el cálculo de las cargas de viento. También, los resultados sugieren la importancia de diseñar una normativa que contemple los criterios de diseño para ambientes protegidos en el país.

## Capítulo 5. Efecto de la pendiente en la respuesta estructural y costo de un invernadero

La Figura 5.1 ilustra las pendientes que se utilizaron para evaluar su efecto en las instalaciones. Donde a) corresponde a la instalación de la estructura en terrenos horizontales o el uso de terrazas, b) y c) corresponden a la instalación de la estructura en terrenos de pendiente de un 20% y un 40% respectivamente.



**Figura 5. 1** Pendientes estudiadas: a) Pendiente de 0° (0%). b) Pendiente 11,3° (20%). c) Pendiente 21,8° (40%)

### 5.1. Cargas estructurales:

Las únicas cargas que se mantienen constantes en los 9 casos de análisis explicados en la sección 3.2 son las cargas temporales, debido a que estas no dependen directamente de la estructura, la pendiente o la categoría de exposición. La Tabla 5.1 se muestra las cargas temporales aplicadas sobre la estructura.

**Tabla 5. 1** Cargas temporales aplicadas a los 9 casos de análisis

Cargas vivas	Valor
<b>Cultivos</b>	10 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Mantenimiento</b>	180 kg
<b>Equipos</b>	7 kgf/m <sup>2</sup>

Por otra parte, las cargas permanentes o muertas, varían dependiendo de la longitud total de los elementos y el tipo de sección utilizada. La Tabla 5.2 muestra las cargas permanentes unitarias utilizadas en el análisis estructural.

**Tabla 5. 2** Cargas permanentes aplicadas a los 9 casos de análisis

Cargas muertas	Valor	Sección
Peso unitario (Longitud 6 m)	30,2 kg	91 x 91 x 1,8
	24,1 kg	72 x 72 x 1,8
	16,9 kg	50 x 50 x 1,8
Densidad del Plástico	920 kg/m <sup>3</sup>	

• **Cargas ambientales**

✓ **Carga de viento:**

La Tabla 5.3 muestra los resultados del cálculo de la Presión Básica del viento, para los 9 casos de análisis, siguiendo la metodología ASCE (2010) de acuerdo con la sección 4.2 pero para una velocidad de ráfaga de 100 km/h y categorías de exposición B y C.

**Tabla 5. 3** Carga de viento para los 9 casos de análisis

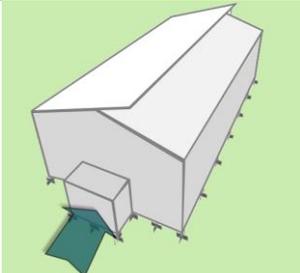
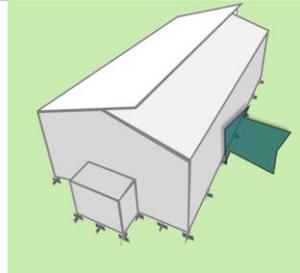
Variables	Caso 1	Casos 2,3,4 y 5	Casos 6,7,8 y 9
Categoría de Exposición	B	B	C
Factor de exposición de presión de velocidad*, $K_z$	0,57	0,57	0,85
Factor de topografía**, $K_{zt}$	1	1,1	1,2
Factor de direccionalidad***, $K_d$	0,85	0,85	0,85
Velocidad de ráfaga de viento, V	27,7 m/s (100 km/hr)	27,7 m/s (100 km/hr)	27,7 m/s (100 km/hr)
Presión Básica del viento, $q_z$	229,2 N/m <sup>2</sup>	250,5 N/m <sup>2</sup>	409,4 N/m <sup>2</sup>
Variación de $q_z$ respecto caso 1	-	9%	79%
<b>Nota:</b> Ver Anexo A			
* Anexo A, Tabla A.5			
** Anexo A, Tablas A.2 y A.3			
*** Anexo A, Tabla A.4			

Al comparar la carga de viento en los casos de análisis, se encontraron diferencias en la Presión Básica del viento carga de velocidad ( $q_z$ ), para los casos donde se encuentran presentes las condiciones de ladera, la diferencia es desde un 9% hasta un 79% mayores

respecto a condiciones de topografía plana, siendo la categoría de Exposición y el factor de topografía, los efectos de mayor importancia.

Al aplicar esta presión básica del viento sobre las caras del invernadero, se obtiene una distribución de presiones en cada una de sus caras. Este cálculo se realizó para los 9 casos de análisis; a modo representativo en la Tabla 5.4 se muestra los resultados obtenidos de carga de viento para el caso de análisis 9. En el Anexo D se presentan las tablas con las cargas de los restantes 8 casos. Los signos negativos representan cargas de succión, mientras que las cargas positivas representan cargas de presión o empuje.

**Tabla 5. 4** Presiones de viento sobre las caras del invernadero según la dirección del viento para el caso de análisis 9

Presiones en las caras del invernadero			
Viento Longitudinal		Viento Transversal	
			
<b>Cara Barlovento</b>	47,9 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Cara Barlovento</b>	47,9 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Cara Sotavento</b>	-30,2 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Cara Sotavento</b>	-37,2 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Cara Lateral</b>	-44,3 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Cara Lateral</b>	-44,3 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Techo 0-h/2</b>	-51,4 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Techo Barlovento</b>	-39,9 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Techo h/2-h</b>	-51,4 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Techo Sotavento</b>	-40,8 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Techo h-2h</b>	-37,2 kgf/m <sup>2</sup>		
<b>Techo &gt;2h</b>	-30,2 kgf/m <sup>2</sup>		

✓ **Carga de sismo:**

De acuerdo a la metodología del CSCR (2010), se obtuvieron las cargas sísmicas para los distintos prototipos y los casos de análisis. Dado que las cargas sísmicas dependen del peso de la estructura, de manera ilustrativa, en las Tablas 5.5 y 5.6 se presentarán los resultados obtenidos para el invernadero bajo el caso de análisis 9.

**Tabla 5.5** Variables utilizadas para el cálculo del coeficiente sísmico

Variables topográficas	Símbolo	Valor
Tipo de sitio		S3
Tipo de zona		III
Aceleración pico efectiva	$a_e$	0,36
Factor de importancia	I	0,75
Clasificación del sistema estructural		dual
Ductilidad global asignada	$\mu$	3
Factor de sobrerresistencia	SR	2
Periodo	T	0,08
Factor espectral dinámico	FED	1,079
Coeficiente Sísmico	C	0,146

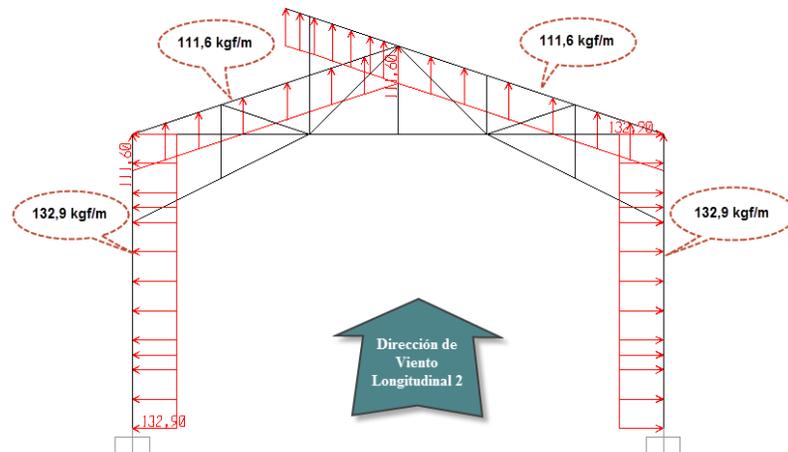
**Tabla 5.6** Cargas sísmicas para el caso de análisis 9

Cargas Sísmicas			
Sismo transversal			
Marco	Peso Marco (kg)	Coeficiente Sismo	Cortante Base (kg)
<b>Frontal</b>	737,2	0,146	107,6
<b>Posterior</b>	651,9	0,146	95,2
<b>Marco Interno 1</b>	549,0	0,146	80,2
<b>Marco Interno 2</b>	526,1	0,146	76,8
<b>Marco Interno 3</b>	517,6	0,146	75,6
<b>Marco Interno 4</b>	526,1	0,146	76,8
<b>Marco Interno 5</b>	549,0	0,146	80,2
Sismo Longitudinal			
Estructura	Peso (kg)	Coeficiente Sismo	Cortante Base (kg)
<b>Total</b>	4057,0	0,146	592,3

Como se observa en la Tabla 5.6, para una carga de sismo transversal, la mayor fuerza cortante estará aplicada sobre el marco frontal, ya que es la que tiene un mayor número de elementos asociados al marco, incluyendo la puerta de acceso. El resto de marcos se le aplicaron las cargas con los valores mostrados. Al peso del marco se le sumó el peso del plástico.

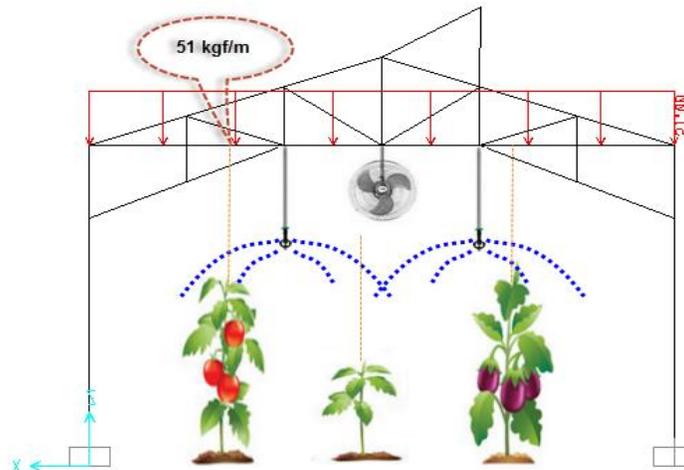
## 5.2. Aplicación de las cargas sobre la estructura

Una vez definidas las cargas estructurales, se procedió a la aplicación de estas cargas sobre los elementos correspondientes en las estructuras. En las Figuras 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 se ilustran su aplicación para el caso de análisis 9.



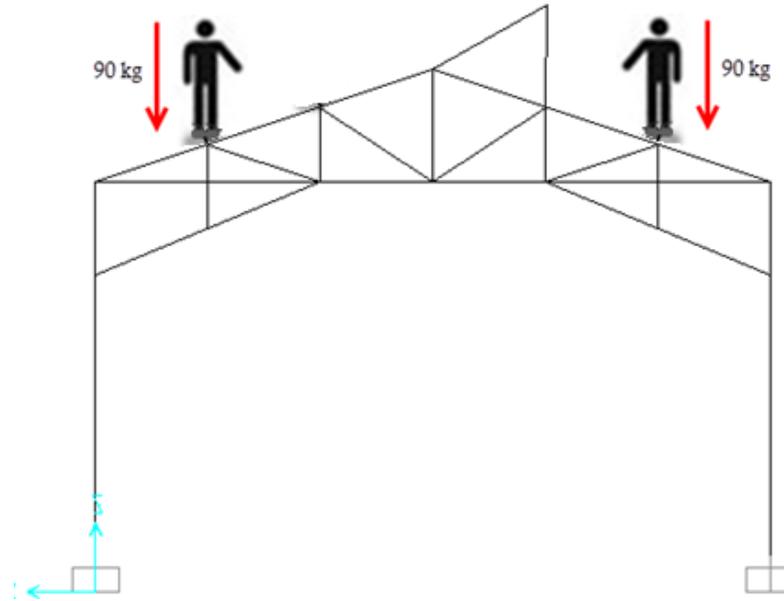
**Figura 5. 2** Aplicación de la carga de viento en el marco interno 3 para el caso de análisis 9

La Figura 5.2 ilustra la aplicación de las carga de viento en la dirección longitudinal en el sentido 2, es decir, el marco posterior a barlovento, en este caso, representa cargas de succión aplicadas en el marco 3 para el caso de análisis 9.



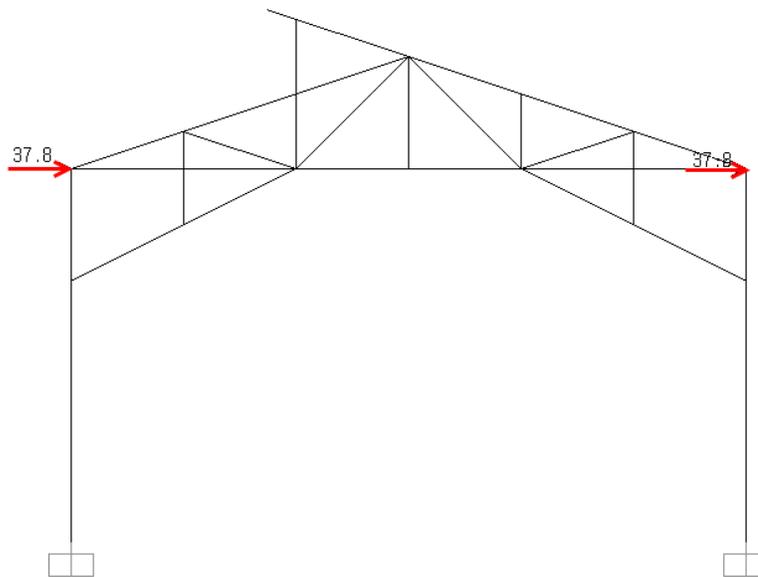
**Figura 5. 3** Aplicación de la carga de cultivos e instalaciones para el caso de análisis 9

La Figura 5.3 ilustra la aplicación de las carga temporales sobre la cuerda inferior de la estructura, en este caso, contempla la aplicación de las cargas de equipos y cultivos según su área tributaria.



**Figura 5. 4** Aplicación de la carga de mantenimiento para el caso de análisis 9

La Figura 5.4 ilustra la aplicación de la carga temporal de mantenimiento sobre el marco de la estructura.



**Figura 5. 5** Aplicación de la carga de sismo en el marco interno 3 para el caso de análisis 9

La Figura 5.5 ilustra la aplicación de la carga sísmica sobre el marco interno 3 de la estructura para el caso de análisis 9, dividida entre las 2 columnas.

### 5.3. Resultados del análisis estructural

Luego de incorporar las respectivas cargas en el modelo para los diferentes casos, se obtuvieron los esfuerzos máximos a ser soportados por la estructura.

La Tabla 5.7 presenta un resumen de los esfuerzos máximos para el caso base (caso 1) y los casos 2, 4, 6 y 8 (Invernaderos a nivel o en terraza en condiciones de pendientes de 20% y 40%) y dos tipos de exposición. En todos los casos se reportan los esfuerzos del mismo elemento para poder comparar los resultados. Cabe destacar que la tabla completa de esfuerzos exportada de SAP 2000 a Excel, consta de 44 000 líneas para cada caso, por lo que se hace imposible presentar todos los resultados.

**Tabla 5. 7** Esfuerzos máximos obtenidos para los casos de análisis 1, 2, 4, 6 y 8

Casos de análisis	Esfuerzos	Elemento	Combinación	Valor Máximo	Variación (caso base)
<b>Caso 1</b> (Caso base) -Pendiente 0% -A nivel -Categoría Exposición B	Axial	CI4	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	2566	-
	P (kgf)	CS6	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-2779	-
	Cortante	COL11	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	-239	-
	Vx (kgf)	COL13	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	240	-
	Cortante	COL06	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	-197	-
	Vy (kgf)	COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	203	-
	Momento	COL04	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	185	-
	My (kgf-m)	COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-200	-
	Momento	COL12	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	156	-
Mx (kgf-m)	COL13	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-156	-	
<b>Caso 2</b> -Pendiente 20% -Terraza -Categoría Exposición B  <b>Caso 4</b> -Pendiente 40% -Terraza -Categoría Exposición B	Axial	CI4	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	2494	-3%
	P (kgf)	CS6	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-2706	-3%
	Cortante	COL11	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	-263	10%
	Vx (kgf)	COL13	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	263	10%
	Cortante	COL06	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	-215	9%
	Vy (kgf)	COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	222	9%
	Momento	COL04	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	203	9%
	My (kgf-m)	COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-219	9%
	Momento	COL12	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	168	8%
Mx (kgf-m)	COL13	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-168	8%	

Casos de análisis	Esfuerzos	Elemento	Combinación	Valor Máximo	Variación (caso base)
<b>Caso 6</b> -Pendiente 20% -Terraza -Categoría Exposición C	Axial	CI4	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	1943	-24%
	P (kgf)	CS6	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-2144	-23%
	Cortante	COL11	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	-437	83%
	V <sub>x</sub> (kgf)	COL13	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	438	83%
<b>Caso 8</b> -Pendiente 40% -Terraza -Categoría Exposición C	Cortante	COL06	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	-352	79%
	V <sub>y</sub> (kgf)	COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	362	79%
	Momento	COL04	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	332	79%
	M <sub>y</sub> (kgf-m)	COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-358	79%
	Momento	COL13	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	284	82%
	M <sub>x</sub> (kgf-m)	COL12	(4)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>1</sub>	-283	82%
<b>*Nota:</b> <b>CI</b> = Cuerda Inferior <b>CS</b> = Cuerda Superior <b>COL</b> = Columna					

Como se observa en la tabla anterior, las combinaciones con carga de viento son las que rigen en el diseño del invernadero para todos los tipos de esfuerzo y combinaciones de carga. Como en los casos 2, 4, 6 y 8 la carga de viento aumenta respecto al caso base, los esfuerzos cortantes y de momento sobre el invernadero también aumentan.

Caso contrario ocurre con los esfuerzos axiales, en donde las presiones negativas o de succión generados en el techo disminuyen las cargas permanentes y temporales que actúan como fuerzas gravitacionales.

#### **5.4. Comprobación de las secciones y elementos de las estructuras**

Con los resultados del programa SAP 2000, se comprobó que las secciones de cada uno de los elementos cumpliera ante los esfuerzos máximos debidos a las diferentes combinaciones de carga.

En los 9 casos de análisis fueron evaluados los elementos para que cumplan con las condiciones de diseño establecidas por el método del LRFD. En donde se consideraron esfuerzos axiales a tensión y compresión, esfuerzos cortantes, esfuerzos de momento flector y combinaciones de esfuerzos axiales y momentos flector sobre los elementos de la estructura. Las secciones que no cumplieron con los requerimientos de diseño se cambiaron hasta encontrar una sección que si cumpla.

De manera ilustrativa se resume los procedimientos de comprobación de las secciones y elementos de las estructuras para el caso de las columnas y los arriostres de techo. Las Figuras 5.6 y 5.7 muestran los esfuerzos de momentos máximos generados en las columnas 20 y 13, los cuales son de 358 kgf/m y 284 kgf/m respectivamente, esfuerzos que la sección utilizada en el caso base de 72x72x1,8 no puede soportar.

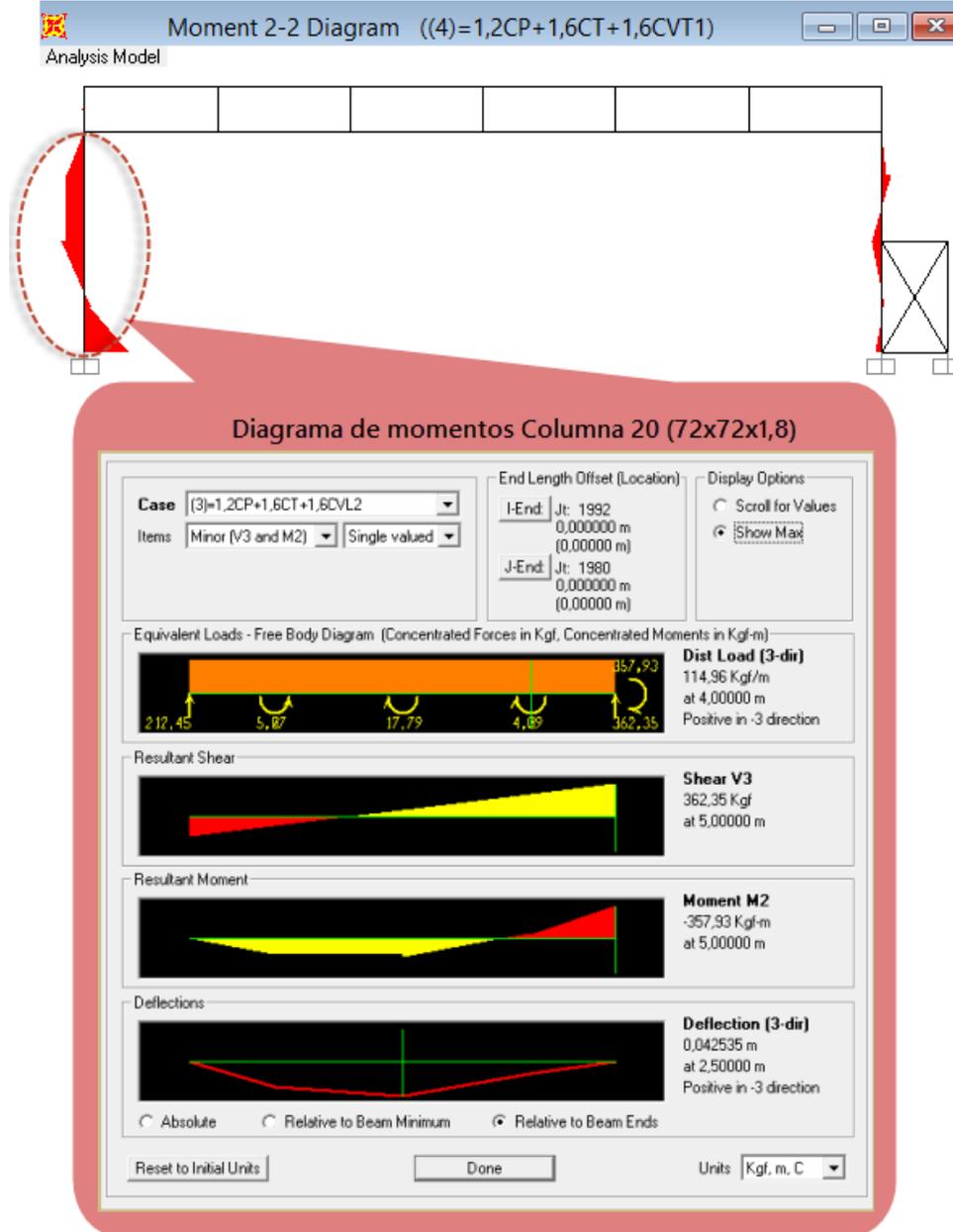


Figura 5. 6 Esfuerzos máximos aplicados sobre la Columna 20 del invernadero bajo las condiciones del caso 6 y 8

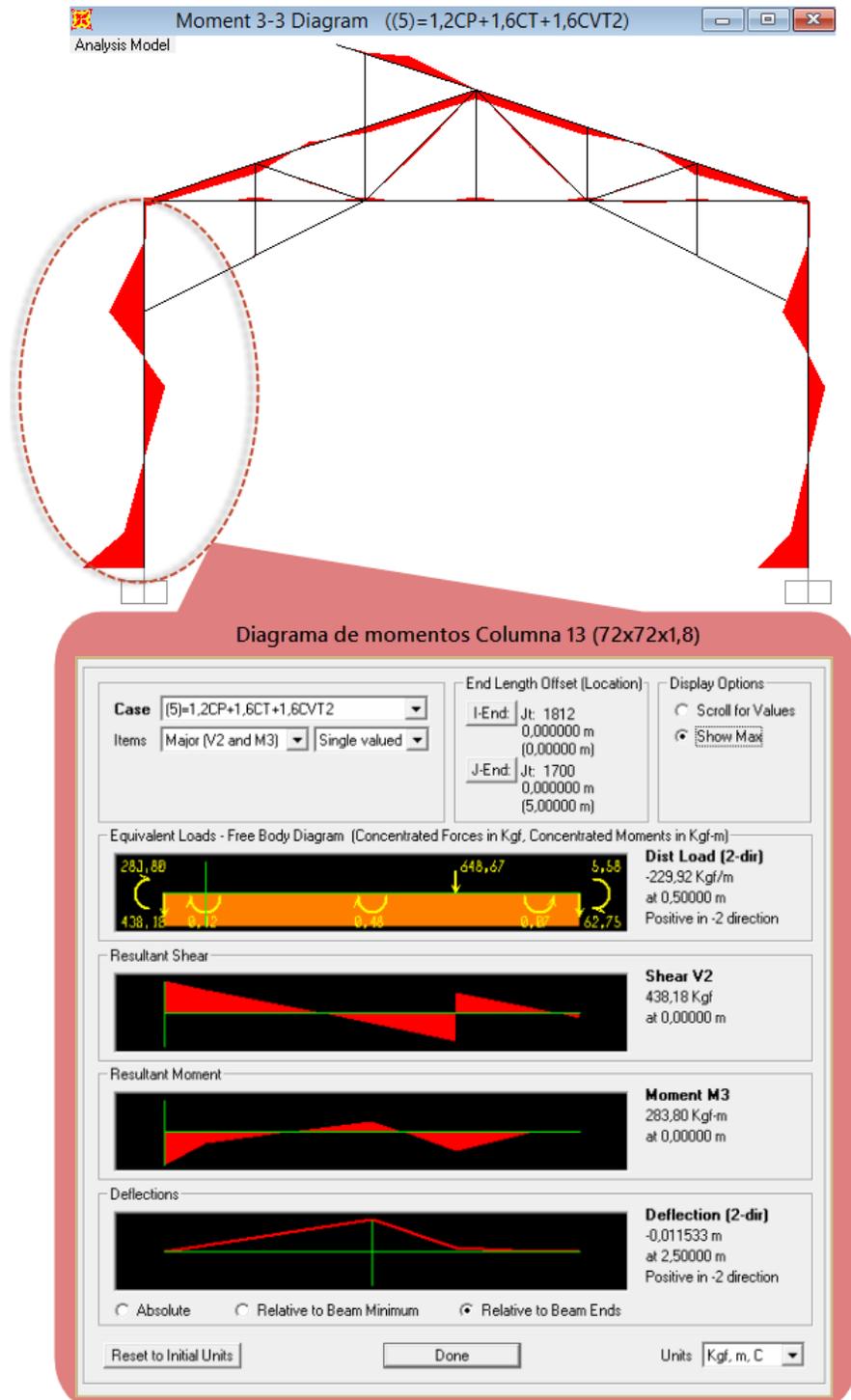


Figura 5. 7 Esfuerzos máximos aplicados sobre la Columna 13 del invernadero bajo las condiciones del caso 2 y 4

En las Tablas 5.8 y 5.9 se muestran dos ejemplos de las comprobaciones realizadas. Para los dos ejemplos, las secciones originales no resisten los esfuerzos generados en los casos 6 y 8, por lo que se aplica el cambio de sección de manera que sean resistentes.

La Tabla 5.8 muestra los esfuerzos últimos generados en la columna 20 para la combinación de carga 3, para los casos de análisis 2, 4, 6 y 8, contemplando 2 secciones diferentes, y la comprobación de esfuerzos axiales y flexión en los elementos ante el cumplimiento de las ecuaciones 6.5 a y 6.5 b, expuestas por Yu y LaBoube (2010), (Ver Anexo B, Tabla B.1).

**Tabla 5. 8** Ejemplo de comprobación de sección para la combinación de esfuerzos axiales y de flexión

Resultados SAP para Columna 20**				Comprobación fuerza axial y flexión				
para una combinación de carga (3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>				Sección	Eq.A*		Eq.B*	
Caso de Análisis	P kgf	Mx kgf-m	My kgf-m		Estatus	Estatus	Estatus	Estatus
<b>Caso 2</b> -Pendiente 20% -Terraza -Categoría Exposición B	-498	-219	1,3	72x72x1,8	0,9	Cumple	1	Cumple
<b>Caso 4</b> -Pendiente 40% -Terraza -Categoría Exposición B								
<b>Caso 6</b> -Pendiente 20% -Terraza -Categoría Exposición C	-433	-360	3	91x91x1,8	0,8	Cumple	0,9	Cumple
<b>Caso 8</b> -Pendiente 40% -Terraza -Categoría Exposición C	-376	-358	2	72x72x1,8	1,4	No cumple	1,6	No cumple

**Nota:**  
 \*El resultado de las Eq A y Eq B debe ser menor o igual que 1 para que la sección cumpla  
 Ver Anexo B referente a las ecuaciones para determinar la resistencia ante combinación de esfuerzos axiales y de flexión.  
 \*\* COL 20 = Columna 20, ver Figura 3.3

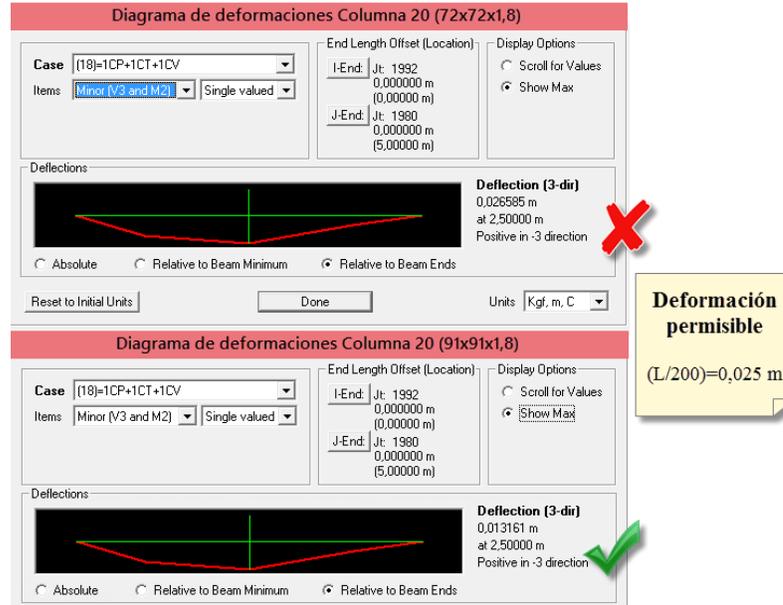
La Tabla 5.9 muestra los esfuerzos axiales generados en el arriostre de techo 27 (ATE 27), para la combinación de carga 5, para los casos de análisis 2, 4, 6 y 8, contemplando 2 secciones diferentes y la comprobación de esfuerzos axiales a compresión.

**Tabla 5. 9** Ejemplo de comprobación de sección ante esfuerzos de compresión

Resultados SAP para Arriostres de Techo bajo una combinación de carga (5)=1,2CP+1,6FRCT+1,6CVT <sub>2</sub>				Comprobación compresión*		
Elemento	Casos de Análisis	P	Sección	Carga Nominal	Carga Permisible	Estatus
		(kgf)		$P_n = A_e \cdot F_n$ (kgf)	$P_a = \Phi P_n$ (kgf)	
ATE27**	<b>Caso 2</b> -Pendiente 20% -Terraza -Categoría Exposición B <b>Caso 4</b> -Pendiente 40% -Terraza -Categoría Exposición B	1287	50x50x1,8	1933,2	1643,2	Cumple
ATE27	<b>Caso 6</b> -Pendiente 20% -Terraza -Categoría Exposición C	1727	50x50x1,8	1933,2	1643,2	No cumple
ATE27	<b>Caso 8</b> -Pendiente 40% -Terraza -Categoría Exposición C	1775	72x72x1,8	5745,5	4883,7	Cumple

**Nota:**  
 \*La carga axial resultante (P) debe ser menor que la carga permisible para que la sección cumpla  
 Ver Anexo B en lo referente a las ecuaciones para determinar la resistencia ante compresión  
 \*\* ATE 27 = Arriostre de Techo 27, Ver Figura 3.3

Por otra parte, debe de verificarse las deformaciones de cada uno de los elementos y compararlos con las deformaciones permitidas, lo anterior se puede ejemplificar en la Figura 5.8, donde se muestra que para los casos de análisis 6 y 8, las secciones originales de las columnas (72 x 72 x 1,8) no cumplen con las deformaciones permisibles, mientras que con las secciones ajustadas (91 x 91 x 1,8) si lo cumplen. Cabe recordar que para la verificación de deformación se debe utilizar una combinación de cargas que no esté factorizada, por ello se utilizó la combinación ultima de carga 18 (CU= 1 CP + 1 CT + 1 CV). Para la deformación permisible se utilizó la razón L/200, para el caso de columnas, L es la longitud no arriestrada, (L = 5 m).



**Figura 5. 8** Deformaciones en la Columna 20 para los casos 6 y 8 con la sección original (arriba) y la sección ajustada (abajo)

Al realizar los cambios de sección, el peso del invernadero aumenta, debido a una mayor área de los elementos, una vez comprobados los elementos se obtuvo la cantidad de acero necesaria para el invernadero para los diferentes casos de análisis. Lo anterior se muestra en la Tabla 5.10.

**Tabla 5. 10** Variación del peso de la estructura del invernadero según el caso de análisis

Casos de Análisis	Detalle	Peso acero Total (kg)	Variación respecto caso base
<b>Caso 1 (Caso Base)</b>	-Pendiente 0% -A nivel -Categoría Exposición B	3645,6	-
<b>Caso 2 y 4</b>	-Pendientes 20% y 40% -Terraza -Categoría Exposición B	3645,6	-
<b>Caso 3</b>	-Pendiente 20% -Pendiente -Categoría Exposición B	3723,3	2,1%
<b>Caso 5</b>	-Pendiente 40% -Pendiente -Categoría Exposición B	3808,0	4,5%
<b>Caso 6 y 8</b>	-Pendiente 20% y 40% -Terraza -Categoría Exposición C	3847	5,5%
<b>Caso 7</b>	-Pendiente 20% -Pendiente -Categoría Exposición C	3876,8	6,3%
<b>Caso 9</b>	-Pendiente 40% -Pendiente -Categoría Exposición C	3963	8,7%

En los casos de análisis 7 y 9, además del cambio de sección respecto al caso 1, al aumentar la pendiente y mantener la distancia horizontal entre marcos de 3 m, los elementos que conectan un marco con otro, deben aumentar su longitud, lo cual implica también un aumento en el peso de la estructura. Esta situación se ve reflejada en los casos 3 y 5, que a pesar de que no hay un cambio de sección, la diferencia de longitudes de los elementos produce la variación del peso.

Para los casos 6, 7, 8 y 9, fue necesario utilizar una sección con mayor área de acero en las columnas, por lo que se utilizó la sección 91 x 91 x 1,8, de igual manera se aumentó la sección de los Arriostres de techo, más cercanos a los extremos, los cuales son los que transmiten mayores cargas axiales. Las secciones utilizadas se muestran en la Tabla 5.11, en la cual los valores resaltados muestran las secciones cambiadas.

**Tabla 5. 11** Secciones utilizadas en la estructura del invernadero para los distintos casos de análisis

Elementos	Secciones Caso 1*, 2, 3, 4 y 5 (Categoría B)	Secciones Casos 6, 7, 8 y 9 (Categoría C)
Columnas	72 x 72 x 1,8	<b>91 x 91 x 1,8</b>
Arriostres Triangulo de Marco	50 x 50 x 1,8	50 x 50 x 1,8
Arriostres Frontales	50 x 50 x 1,8	50 x 50 x 1,8
Cuerda Superior	72 x 72 x 1,8	72 x 72 x 1,8
Cuerda Inferior	50 x 50 x 1,8	50 x 50 x 1,8
Ventana Cenital	50 x 50 x 1,8	50 x 50 x 1,8
Ventana Lateral	50 x 50 x 1,8	50 x 50 x 1,8
Arriostres entre Marcos	50 x 50 x 1,8	50 x 50 x 1,8
Arriostres de Techo	50 x 50 x 1,8	50 x 50 x 1,8 <b>72 x 72 x 1,8</b>
Largueros de Techo	72 x 72 x 1,8	72 x 72 x 1,8
Vigas de Techo	50 x 50 x 1,8	50 x 50 x 1,8
Elementos de Cercha	50 x 50 x 1,8	50 x 50 x 1,8
Columna de Puerta	50 x 50 x 1,8	50 x 50 x 1,8
Viga de Puerta	50 x 50 x 1,8	50 x 50 x 1,8
Arriostres de Puerta	50 x 50 x 1,8	50 x 50 x 1,8

\*Nota: Secciones propuestas por Acuña (2013)

Se volvió a realizar el análisis estructural de todos los casos con el programa SAP 2000 para comprobar los nuevos esfuerzos máximos generados por las nuevas secciones, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 5.12.

**Tabla 5. 12** Esfuerzos máximos obtenidos para todos los casos de análisis, incluyendo el cambio de secciones

Casos de análisis	Esfuerzos	Elemento	Combinación	Valor Máximo	Variación (caso base)
<b>Caso 1</b> (Caso base) -Pendiente 0% -A nivel -Categoría Exposición B	Axial P (kgf)	CI4	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	2566	-
		CS6	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-2779	-
	Cortante V <sub>x</sub> (kgf)	COL11	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	-239	-
		COL13	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	240	-
	Cortante V <sub>y</sub> (kgf)	COL06	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	-197	-
		COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	203	-
	Momento M <sub>y</sub> (kgf-m)	COL04	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	185	-
		COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-200	-
		COL12	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	156	-
Momentos M <sub>x</sub> (kgf-m)	COL13	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-156	-	
<b>Caso 2</b> -Pendiente 20% -Terraza -Categoría Exposición B  <b>Caso 4</b> -Pendiente 40% -Terraza -Categoría Exposición B	Axial P (kgf)	CI4	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	2494	-3%
		CS6	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-2706	-3%
	Cortante V <sub>x</sub> (kgf)	COL11	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	-263	10%
		COL13	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	263	10%
	Cortante V <sub>y</sub> (kgf)	COL06	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	-215	9%
		COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	222	9%
	Momento M <sub>y</sub> (kgf-m)	COL04	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	203	9%
		COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-219	9%
		COL12	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	168	8%
Momentos M <sub>x</sub> (kgf-m)	COL13	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-168	8%	
<b>Caso 3</b> -Pendiente 20% -Pendiente -Categoría Exposición B	Axial P (kgf)	CI4	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	2532	-1%
		CS6	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-2742	-1%
	Cortante V <sub>x</sub> (kgf)	COL11	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	-263	10%
		COL13	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	263	10%
	Cortante V <sub>y</sub> (kgf)	COL06	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	-215	9%
		COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	222	9%
	Momento M <sub>y</sub> (kgf-m)	COL04	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	203	9%
		COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-219	9%
		COL12	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	169	8%
Momentos M <sub>x</sub> (kgf-m)	COL13	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-168	8%	

Casos de análisis	Esfuerzos	Elemento	Combinación	Valor Máximo	Variación (caso base)
<b>Caso 5</b> -Pendiente 40% -Pendiente -Categoría Exposición B	Axial	CI4	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	2634	3%
	P (kgf)	CS6	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-2845	2%
	Cortante	COL11	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	-263	10%
	V <sub>x</sub> (kgf)	COL13	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	263	10%
	Cortante	COL06	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	-215	9%
	V <sub>y</sub> (kgf)	COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	222	9%
	Momento	COL04	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	202	9%
	M <sub>y</sub> (kgf-m)	COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-219	9%
Momento	COL12	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	170	9%	
M <sub>x</sub> (kgf-m)	COL13	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-169	9%	
<b>Caso 6</b> -Pendiente 20% -Terraza -Categoría Exposición C  <b>Caso 8</b> -Pendiente 40% -Terraza -Categoría Exposición C	Axial	CI4	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	1941	-24%
	P (kgf)	CS6	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-2179	-22%
	Cortante	COL11	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	-443	85%
	V <sub>x</sub> (kgf)	COL13	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	445	86%
	Cortante	COL06	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	-355	80%
	V <sub>y</sub> (kgf)	COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	361	78%
	Momento	COL04	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	345	86%
	M <sub>y</sub> (kgf-m)	COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-360	80%
Momento	COL13	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	297	90%	
M <sub>x</sub> (kgf-m)	COL12	(4)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>1</sub>	-295	90%	
<b>Caso 7</b> -Pendiente 20% -Pendiente -Categoría Exposición C	Axial	CI4	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	1967	-23%
	P (kgf)	CS6	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-2195	-21%
	Cortante	COL11	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	-443	85%
	V <sub>x</sub> (kgf)	COL13	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	445	86%
	Cortante	COL06	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	-355	80%
	V <sub>y</sub> (kgf)	COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	361	78%
	Momento	COL04	(2)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>1</sub>	345	86%
	M <sub>y</sub> (kgf-m)	COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-360	80%
Momento	COL13	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	297	90%	
M <sub>x</sub> (kgf-m)	COL12	(4)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>1</sub>	-296	90%	
<b>Caso 9</b> -Pendiente 40% -Pendiente -Categoría Exposición C	Axial	CI4	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	2069	-19%
	P (kgf)	CS6	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-2296	-17%
	Cortante	COL11	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	-444	85%
	V <sub>x</sub> (kgf)	COL13	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	446	86%
	Cortante	COL22	(4)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>1</sub>	-334	70%
	V <sub>y</sub> (kgf)	COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	375	85%
	Momento	COL22	(4)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>1</sub>	332	79%
	M <sub>y</sub> (kgf-m)	COL20	(3)=1,2CP+1,6CT+1,6CVL <sub>2</sub>	-374	87%
Momento	COL13	(5)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>2</sub>	298	91%	
M <sub>x</sub> (kgf-m)	COL12	(4)=1,2CP+1,6CT+1,6CVT <sub>1</sub>	-297	91%	

De la Tabla 5.12 se pueden mencionar las siguientes observaciones:

- Los 9 casos de análisis presentan variaciones importantes, principalmente causados por la categoría de exposición utilizada, en donde se obtuvo aumentos entre un 78% y un 90% en los esfuerzos cortantes y de momentos con respecto al caso base.
- La pendiente de los terrenos es un factor importante en los esfuerzos axiales generados. Al aumentar la pendiente, la elongación de los elementos que conectan un marco con otro generan un mayor peso del invernadero y por ende un aumento en la carga permanente, lo cual contrarresta el efecto de succión del viento, por lo que produce una reducción de los esfuerzos axiales.
- El efecto de la topografía también se puede observar en los casos que contemplan una exposición categoría B, donde los esfuerzos presentan incrementos entre un 9% y 10% respecto a un invernadero en condiciones de topografía regular o plana.

## 5.5. Costos diferenciales para los diferentes casos de análisis

Se definieron los costos unitarios que generan las mayores diferencias en el costo final de las estructuras, se establecieron las actividades representativas en las que se aplican estos costos. A estos costos se denominan costos diferenciales.

La Tabla 5.13 muestra los costos diferenciales por actividad a cada uno de los casos de análisis.

**Tabla 5. 13** Costos unitarios que generan costos diferenciales

Costos unitarios	
Costo de acero por kg	¢ 688,7/kg
Costo movimiento de tierra y traslado a una distancia de 5 km:	¢ 6.050/m <sup>3</sup>
Costo de mano de obra para estructuras de acero	Se definió el 40% del costo de los materiales de la estructura de acero

La Tabla 5.14 muestra los costos diferenciales para la instalación del prototipo de invernadero en terrenos nivelados.

**Tabla 5. 14** Costos diferenciales del invernadero bajo el caso de análisis 1

Caso 1 (Caso Base)	
Detalle	-Pendiente 0% -A nivel -Categoría Exposición B
Peso acero estructura:	3.645,6 kg
Costo acero estructura:	¢ 2.510.725
Costo de mano de obra para estructuras de acero:	¢ 1.004.290
<b>Costo TOTAL:</b>	<b>¢ 3.515.015</b>
<b>Costo TOTAL*:</b>	<b>US\$ 6.632</b>
<b>Costo Unitario</b>	<b>US\$ 41/ m<sup>2</sup></b>
<b>*Tipo de cambio utilizado ¢ 530/US\$</b>	

La Tabla 5.15 muestra los costos diferenciales para la instalación del prototipo de invernadero en terrenos con una pendiente del 20% y diferentes categorías de exposición.

**Tabla 5. 15** Costos diferenciales del invernadero bajo condiciones de pendiente a un 20%

	Caso 2	Caso 3	Caso 6	Caso 7
Detalle:	-Pendiente 20% -Terraza -Categoría Exposición B	-Pendiente 20% -Pendiente -Categoría Exposición B	-Pendiente 20% -Terraza -Categoría Exposición C	-Pendiente 20% -Pendiente -Categoría Exposición C
Área transversal de corte:	57,6 m <sup>2</sup>	0 m <sup>2</sup>	57,6 m <sup>2</sup>	0 m <sup>2</sup>
Ancho de corte:	15 m	0 m	15 m	0 m
Volumen de tierra a excavar:	864 m <sup>3</sup>	0 m <sup>3</sup>	864 m <sup>3</sup>	0 m <sup>3</sup>
Costo movimiento de tierra:	¢ 5.227.200	¢ 0	¢ 5.227.200	¢ 0
Peso acero estructura:	3.645,6 kg	3723,3 kg	3.847 kg	3.876,8 kg
Costo acero estructura:	¢ 2.510.725	¢ 2.564.237	¢ 2.649.430	¢ 2.669.952
Costo de mano de obra para estructuras de acero	¢ 1.004.290	¢ 1.025.695	¢ 1.059.772	¢ 1.067.981
<b>Costo TOTAL:</b>	<b>¢ 8.742.215</b>	<b>¢ 3.589.932</b>	<b>¢ 8.936.402</b>	<b>¢ 3.737.933</b>
<b>Costo TOTAL*:</b>	<b>US\$ 16.495</b>	<b>US\$ 6.774</b>	<b>US\$ 16.861</b>	<b>US\$ 7.053</b>
<b>Costo Unitario</b>	<b>US\$ 102 / m<sup>2</sup></b>	<b>US\$ 42 / m<sup>2</sup></b>	<b>US\$ 104 / m<sup>2</sup></b>	<b>US\$ 43,5 / m<sup>2</sup></b>
<b>*Tipo de cambio utilizado ¢ 530/US\$</b>				

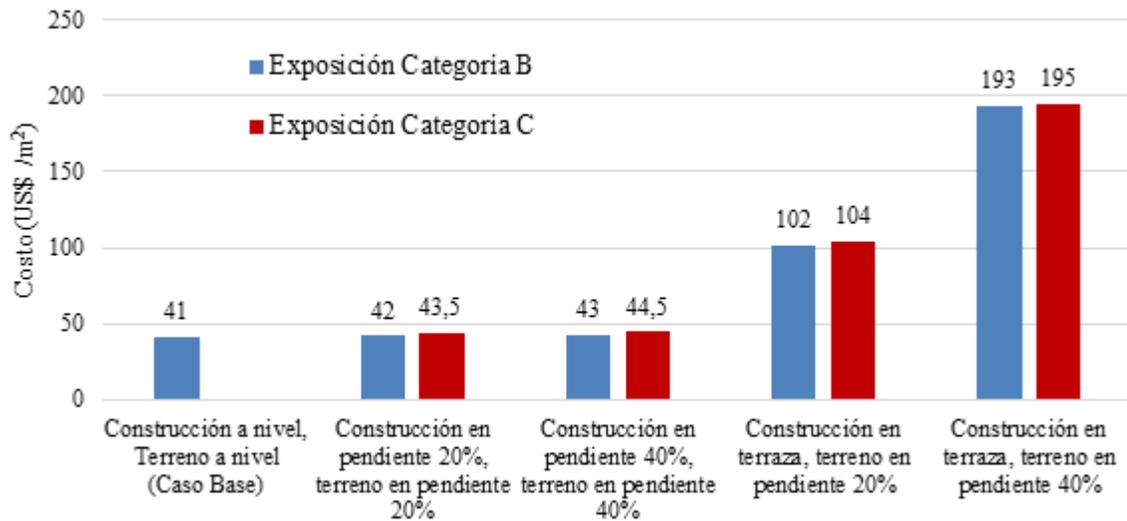
La Tabla 5.16 muestra los costos diferenciales para la instalación del prototipo de invernadero en terrenos con una pendiente del 40% y diferentes categorías de exposición.

**Tabla 5. 16** Costos diferenciales del invernadero bajo condiciones de pendiente a un 40%

	Caso 4	Caso 5	Caso 8	Caso 9
Detalle:	-Pendiente 40% -Terraza -Categoría Exposición B	-Pendiente 40% -Pendiente -Categoría Exposición B	-Pendiente 40% -Terraza -Categoría Exposición C	-Pendiente 40% -Pendiente -Categoría Exposición C
Área transversal de corte:	143,4 m <sup>2</sup>	0 m <sup>2</sup>	143,4 m <sup>2</sup>	0 m <sup>2</sup>
Ancho de corte:	15 m	0 m	15 m	0 m
Volumen de tierra compactada a mover:	2.151 m <sup>3</sup>	0 m <sup>3</sup>	2.151 m <sup>3</sup>	0 m <sup>3</sup>
Costo movimiento de tierra:	¢ 13.013.550	¢ 0	¢ 13.013.550	¢ 0
Peso acero estructura:	3.645,6 kg	3808,0 kg	3.847 kg	3.963 kg
Costo acero estructura:	¢ 2.510.725	¢ 2.622.570	¢ 2.649.430	¢ 2.729.918
Costo de mano de obra para estructuras de acero	¢ 1.004.290	¢ 1.049.028	¢ 1.059.772	¢ 1.091.727
<b>Costo TOTAL:</b>	<b>¢ 16.528.565</b>	<b>¢3.671.598</b>	<b>¢ 16.722.752</b>	<b>¢3.821.195</b>
<b>Costo TOTAL*:</b>	<b>US\$ 31.186</b>	<b>US\$ 6928</b>	<b>US\$ 31.552</b>	<b>US\$ 7.209,8</b>
<b>Costo Unitario</b>	<b>US\$ 193/ m<sup>2</sup></b>	<b>US\$ 43/ m<sup>2</sup></b>	<b>US\$ 195/ m<sup>2</sup></b>	<b>US\$ 44,5/ m<sup>2</sup></b>
<b>*Tipo de cambio utilizado ¢ 530/US\$</b>				

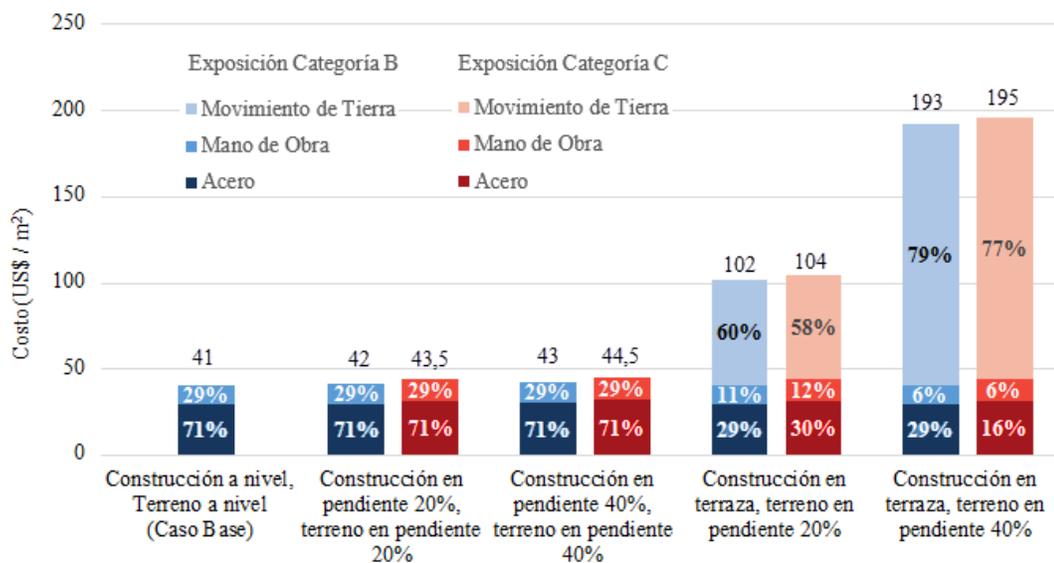
De acuerdo a las Tablas 5.15 y 5.16, la excavación y el traslado de tierra que implicaría hacer terrazas para la construcción de invernaderos, puede aumentar los costos desde 2,5 hasta 5 veces, dependiendo de la pendiente del sitio de construcción con respecto a invernaderos instalados en topografías planas. Sin embargo, si en las mismas pendientes los invernaderos se construyen en ladera no hay aumentos representativos del costo comparándolo con la misma instalación en plano.

Por otra parte, la categoría de exposición a la que se encuentre rodeada el sitio de construcción, puede provocar cambios de sección en la estructura, sin representar diferencias apreciables en los costos de instalación del invernadero. Lo anterior se resume en el Gráfico 5.1, el cual muestra los costos unitarios para costos diferenciales por unidad de área para los diferentes casos de análisis.



**Gráfico 5. 1** Costos diferenciales por unidad de área para un invernadero para todos los casos de análisis.

Como se observa en el Gráfico 5.1, si se construyen invernaderos siguiendo la pendiente del terreno, los costos incrementan de manera lineal 1US\$/m<sup>2</sup> por cada 20% de pendiente que se aumente. Por otra parte, si se utilizan terrazas en los terrenos de construcción, los costos aumentan exponencialmente al aumentar la pendiente, incluso el movimiento de tierra representa entre el 58% y el 79% de aumento en los costos diferenciales, tal y como muestra el Gráfico 5.2.



**Gráfico 5. 2** Costos por unidad de área para un invernadero desglosados por sus costos diferenciales

# Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones

## 6.1. Conclusiones

### Respecto a la hipótesis planteada

- ✓ Se concluye que no hay diferencias en la demanda de resistencia estructural de invernaderos en suelos horizontales respecto a invernaderos construidos en pendiente, siempre y cuando se mantenga la misma categoría de exposición, no fue necesario el cambio de secciones en los elementos.

### Respecto al efecto de la velocidad del viento

- ✓ El Reglamento de Construcciones en su artículo XX, especifica una velocidad de ráfaga máxima de viento de 100 km/h como velocidad de diseño para todo el país. Sin embargo, haciendo un análisis detallado tomando como ejemplo Fraijanes, las velocidades de ráfaga máxima no superan los 85 km/h. Esta diferencia de velocidades tiene un efecto directo en la inversión inicial, situación que ejemplifica la necesidad de estudios detallados de los sitios de construcción.
- ✓ La presión básica de viento de la zona de Fraijanes calculada con la metodología ASCE (2010), es un 30% menor que la calculada con la metodología especificada en el Reglamento de Construcciones.
- ✓ Establecer el periodo de retorno adecuado para el diseño estructural, tomando en cuenta la vida útil de cada componente estructural, hace más preciso el diseño. Para coberturas plásticas se sugiere trabajar con un periodo de retorno de 20 años, lo que genera presiones máximas 42% menores que las presiones calculadas para una ráfaga de 100 km/h. Para estructuras de acero se sugiere trabajar con un periodo de retorno de 185 años, lo que genera presiones máximas 35% menores que las presiones calculadas para una ráfaga de 100 km/h.

- ✓ Este análisis demuestra la importancia de revisar nuestro Reglamento de Construcciones en cuanto al cálculo de la velocidad del viento, específicamente para instalaciones de ambientes protegidos, además de la importancia de hacer un estudio de viento referenciado a la zona específica.

### **Respecto a la construcción de invernaderos en ladera**

- ✓ Se confirmó que para invernaderos en pendiente la carga de viento sigue siendo la que rige el diseño de las estructuras de ambientes protegidos, ya que los máximos esfuerzos se obtuvieron cuando alguna de las combinaciones tiene presente la carga de viento.
- ✓ Las diferencias en los esfuerzos cortantes y de momentos flectores en las columnas son proporcionales al cambio en la presión de velocidad de viento, esto se observa de mejor manera en la Tabla 5.11 en los casos de análisis 2, 3, 4 y 5 que presentan un aumento entre el 8% y el 10%.
- ✓ El cambio en la categoría de exposición y el aumento del factor de topografía son impactantes en los esfuerzos que debe soportar la estructura. Pasar de un tipo de exposición B a C sumado a un cambio en la topografía de plano a ladera puede generar aumentos en la presión básica del viento de hasta un 78%.
- ✓ La metodología ASCE (2010) genera una mayor presión de succión en el techo que se encuentra en la mitad del invernadero hacia barlovento. Esta succión es contrarrestada por las fuerzas gravitacionales de las cargas permanentes y temporales, generando una disminución en los esfuerzos axiales.

- ✓ Los cambios de sección en las columnas y los arriostres de techos, en los casos de pendiente de 20% y 40% para una categoría de exposición C, generan aumentos en la cantidad de acero utilizada en su instalación del 5% al 9%.
  
- ✓ Se demostró que construir invernaderos en pendiente, resistentes y adecuados a las condiciones del lugar, sin hacer terrazas, disminuye los costos en la inversión inicial desde 2,5 hasta 5 veces respecto a construirlos en terrazas. Lo anterior se debe en mayor parte a que los costos de excavación y traslado de tierra crecen de manera exponencial al aumentar la pendiente del terreno y por ende tienen mayor peso en los costos de construcción.

## **6.2. Recomendaciones**

Se deben hacer más estudios de amenaza por viento con vida útil de 5 y 25 años en otras zonas del país, para confirmar si es recomendable usar diferentes conceptos de riesgo en diferentes partes de la estructura.

Para el diseño y selección de coberturas plásticas se propone utilizar un periodo de retorno de 20 años asociado a una probabilidad de ocurrencia del 20% de al menos un evento de diseño, lo cual está acorde con una vida útil del plástico de 5 años y poca probabilidad de ocupación humana al ocurrir el evento de diseño

Para las estructuras metálicas se propone utilizar un periodo de retorno de 185 años asociado a una probabilidad de ocurrencia del 12,5% de al menos un evento de diseño, lo cual está acorde con una vida útil de la estructura de 25 años y poca ocupación humana al ocurrir el evento de diseño.

El país requiere un código de viento para el diseño de infraestructura, en el que se presente la información de ráfaga de 3 segundos a 10 m de altura. Este código permitiría tener mapas zonificados de velocidades de viento y categorías de exposición de las diferentes zonas del país, así como la incorporación del uso del factor de riesgo para estructuras agrícolas o misceláneas. También debería incluir otros aspectos como la vida útil de los materiales de acuerdo a su resistencia estructural del plástico y el acero (preferiblemente con pruebas de túnel de viento), el efecto de la topografía, la categoría de exposición y factores de sobrecarga.

La descripción de las categorías B o C en la metodología ASCE (2010) es muy escueta, y el uso de una u otra categoría combinado con el factor de topografía impacta hasta en un 78% las presiones básicas del viento, por lo que deben caracterizarse en una forma más precisa.

Se sugiere que el PITTA de Ambientes Protegidos promueva el reporte de ráfagas de viento por el IMN, esto debido a que por el uso de estaciones meteorológicas digitales, se determina el promedio de la velocidad de viento de manera horaria. Esto ayudaría a un cálculo más preciso de las cargas de viento sin depender de factores para convertir la velocidad promedio horaria a valores de ráfaga de viento.

La construcción de invernaderos en laderas contribuye al control de erosión de los terrenos y optimiza el manejo en los sistemas de riego al aprovechar de mejor manera la energía potencial debido al cambio de elevación. Sin embargo, existen interrogantes como el manejo ergonómico a lo interno del invernadero, como el caminar de los productores durante las cosechas, situación que en pendientes elevadas puede dificultar estar labor. Por lo que la ingeniería en el diseño de un invernadero deberá considerar todos estos factores.

Ante un evento de ráfaga de viento máxima, es de gran conveniencia permitir la rotura del plástico a una magnitud definida, lo cual hace que no sea necesario diseñar la estructura principal para cargas mayores, esto de acuerdo a la vida útil de los materiales y el costo de los mismos, razón por la que se genera un reto para la innovación agrícola sobre el mejor diseño para la unión o fijamiento de los materiales plásticos de cobertura con la estructura principal.

Ante la dificultad de poder realizar pruebas estructurales in situ, ya sea por temas económicos o bien climatológicos ante la incertidumbre de que ocurra un evento máximo de ráfaga de viento durante el tiempo de estudio, se recomienda el uso de pruebas en túneles de viento para poder cuantificar la resistencia estructural de este tipo de tecnologías y estructuras.

## Bibliografía

- Acuña, N. (2013). *Procedimiento de Análisis y Diseño Estructural de Invernaderos en Acero Laminado en Frío para Costa Rica*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Costa Rica.
- Aguilera, M. A. (2007). *Estimación de funciones de distribución de probabilidad, para caudales máximos en la región del Maule*. (Memoria para optar por el título de Ingeniero Forestal). Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales, Chile. Obtenido de [http://eias.utralca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/tesis\\_de\\_grado/aguilera\\_a.pdf](http://eias.utralca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/tesis_de_grado/aguilera_a.pdf)
- Alpi, A., & Tognoni, F. (1991). *Cultivos en invernadero* (Tercera ed.). Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Virginia, USA: American Society of Civil Engineers.
- Asociación de Estados del Caribe (AEC). (2003). *Código Modelo de Construcción para Cargas de Viento*. Recuperado el 28 de Septiembre de 2014, de <http://www.eird.org/cd/acs/Espanol/spanmodel.html>
- Barquero, G. (2003). *Principios para la producción agrícola en invernadero. Experiencias en Costa Rica* (Primera ed.). San José, Costa Rica: Mundo Gráfico, S.A.
- Beer, F., Johnston, R., & Eisenberg, E. (2007). *Mecánica vectorial para Ingenieros. Estática* (Octava ed.). México: McGraw-Hill.
- Benito, J. L., & Carretero, J. (2011). *Principios básicos de estructuras metálicas* (Segunda ed.). Madrid, España: Visión Libros.
- Briassoulis, D., Gratraud, J., Mistriotis, A., Russo, G., Suay-Cortes, R., von Elsner, B., von Zabeltits, C., Waaijberg, D. (2000). Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouses in European Union Countries: Part I, Design Requirements. *Journal of Agricultural Engineering Research*.
- Castilla, N. (2007). *Invernaderos de Plástico. Tecnología y Manejo* (Segunda ed.). Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA). (2010). *Código Sísmico de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA). (2013). *Comentarios al Código Sísmico de Costa Rica 2010*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Comité Europeo de Normalización. (2002). *Norma Europea EN 13 301-1: Invernaderos: Proyecto y Construcción. Parte I: Invernaderos para producción comercial*. Madrid, España: AENOR.

- Durán, J. (2013). *Diseño de estructuras en bambu para agricultura protegida*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Costa Rica.
- Durán, L. (2012). *Viento*. Recuperado el 23 de Abril de 2014, de Taller Virtual de Meteorología y Clima.: <http://meteolab.fis.ucm.es/meteorologia/viento>
- Espinoza, J. (2006). *Parámetros para el cálculo y diseño de estructuras tipo invernadero y comparación con estructuras metálicas convencionales*. (Trabajo para obtener el grado de Ingeniero Civil). Escuela Politécnica del Ejército Ecuador, Carrera de Ingeniería Civil, Ecuador.
- Estrada, J. (2012). *Guía para la construcción de invernaderos o fitotoldos*. Bolivia: FAO. Obtenido de Sitio web de FAO: <http://www.fao.org/3/a-as968s.pdf>
- Fundación para la innovación tecnológica (Cotec). (2009). *Invernaderos de Plástico* (Primera ed.). Madrid, España: Gráficas Arias Montano, SA. Obtenido de sitio web de Cotec: <http://www.cotec.es/>
- García, A. (2013). *Análisis de distribuciones estadísticas alternativas a las tradicionales para la optimización de los caudales de cálculo empleados en los estudios hidrológicos*. (Tesis de Doctorado). Universidad de Extremadura España, Escuela de Ingenierías Industriales, España.
- González, O. (2003). *Análisis estructural*. D.F, México: Editorial Limusa.
- González, R. (2005). *Vida útil ponderada en de edificaciones*. (Tesis de Maestría). Universidad Estatal a Distancia de Costa Rica, Escuela de Ciencias Exactas y Naturales, Costa Rica.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura (IICA). (2014). *Estrategia regional para la investigación y adaptación de frijol y maíz dentro de escenarios de cambio climático para los próximos años (2013-2020)*. San José, Costa Rica: Conlith, S.A.
- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agrícola en Costa Rica (INTA), Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI). (2005). *Producción en Ambientes Protegidos y/o Controlados*. San José, Costa Rica. Obtenido de Sitio web del MAG: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00098.PDF>
- Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU). (1983). *Reglamento de Construcciones*. San José, Costa Rica: Imprenta Nacional.
- International Council Code (ICC). (2012). *International Building Code*.
- Jaramillo, J. O. (2004). *Análisis clásico de estructuras*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Unibiblos.

- Maggio, G. (s.f.). *Análisis estadístico de valores extremos*. Obtenido de Sitio web de NOLDOR S.R.L.: [http://www.noldor.com.ar/noldorweb/consultor/Variables\\_extremas.pdf](http://www.noldor.com.ar/noldorweb/consultor/Variables_extremas.pdf)
- Marín, F. (2010). *Cuantificación y Valoración de Estructuras y Procesos de Producción Agrícola Bajo Ambientes Protegidos en Costa Rica*. San José, Costa Rica: Imprenta Nacional.
- McCormac, J. (2010). *Análisis de Estructuras. Métodos Clásico y Matricial* (Cuarta ed.). México D.F: Alfaomega.
- Modesti, M., Schettini, E., Stefani, L., Ugel, E., Vox, G., & Zanon, M. (2009). Plástico super resistente puesto a prueba en invernaderos. *Horticultura*, 30-32.
- Molina, J., Velilla, E., & Villada, F. (2009). Modelo de Vida Útil para Estructuras Acero-Zinc Utilizadas en la Transmisión de Energía Eléctrica en Colombia. *Información Tecnológica, Vol. 20*(N° 6), 57-66. doi:10.1612/inf.tecnol.4132it.0
- National Greenhouses Manufacturers Association (NGMA). (2004). *Structural Design Manual*. Harrisburg, Estados Unidos: Disponible en <http://www.ngma.com>.
- Organización de las Naciones Unidas para Alimentación y la Agricultura (FAO). (2011). *Rural structures in the tropics. Desing and development*. Roma, Italia.
- Patiño, M. (2007). *Mapa de velocidades de viento para Costa Rica*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Costa Rica.
- Rámirez, R., Aguilar, J., & León, R. (2010). *Introducción a los cultivos protegidos bajo cobertura plástica en Costa Rica*. San José, Costa Rica: Imprenta Nacional.
- Sachs, P. (1978). *Wind Forces in Engineering* (Segunda ed.). Londres, Inglaterra: Editorial Pergamon.
- Serrano, Z. (2005). *Construcción de invernaderos* (Tercera ed.). Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Universidad de Arizona. (2012). *University of Arizona Controlled Environment Agriculture Center*. Obtenido de Total Areas in Major Greenhouse Production Countries: <http://cals.arizona.edu/ceac/sites/ag.arizona.edu.ceac/files/WorldGreenhouseStats.pdf>
- Ven Te Chow, Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. (J. Saldarriaga, Trad.) Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Vinnakota, S. (2006). *Estructuras de acero: Comportamiento y LRFD*. (I. Sanchez, J. Espinosa, & E. Pineda, Trads.) México: McGraw-Hill.
- Yu, W., & LaBoube, R. (2010). *Cold- Formed Steel Design* (Cuarta ed.). New Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.

## Anexos

### Anexo A: Variables para la metodología ASCE (2010)

**Tabla A. 1** Categorización de la rugosidad y exposición

Categoría	Rugosidad	Exposición
B	Zonas urbanas y suburbanas, bosques y terreno con numerosas obstrucciones	Para estructuras con altura menos a los 9,1 m, se aplica en donde la rugosidad del terreno se considera B; la dirección del viento predomina por más de 457 m sin obstrucciones. Para estructuras de altura mayor a 9,1 m, se aplica terrenos de rugosidad B, en donde la dirección del viento predomina por más de 792 m o 20 veces la altura de la estructura, predominando la mayor
C	Terreno abierto con escasas obstrucciones, con estructuras de altura menor a los 9,1 m	Aplica cuando la exposición B o D no aplican
D	Terreno plano, sin obstrucciones, incluyendo cuerpos de agua	Aplica en los casos en donde la rugosidad se considera como D, prevaleciendo la velocidad del viento por más de 1.524 m o 20 veces la altura de la estructura, predominando la mayor. La exposición D aplica cuando se tienen rugosidad B o C y sitio se encuentra a 183 m o 20 veces la altura de la estructura

Fuente: ASCE (2010), traducido por Duran (2013)

**Tabla A. 2** Factor de Topografía,  $K_{zt}$

**Equations:**

$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2$$

$K_1$  determined from table below

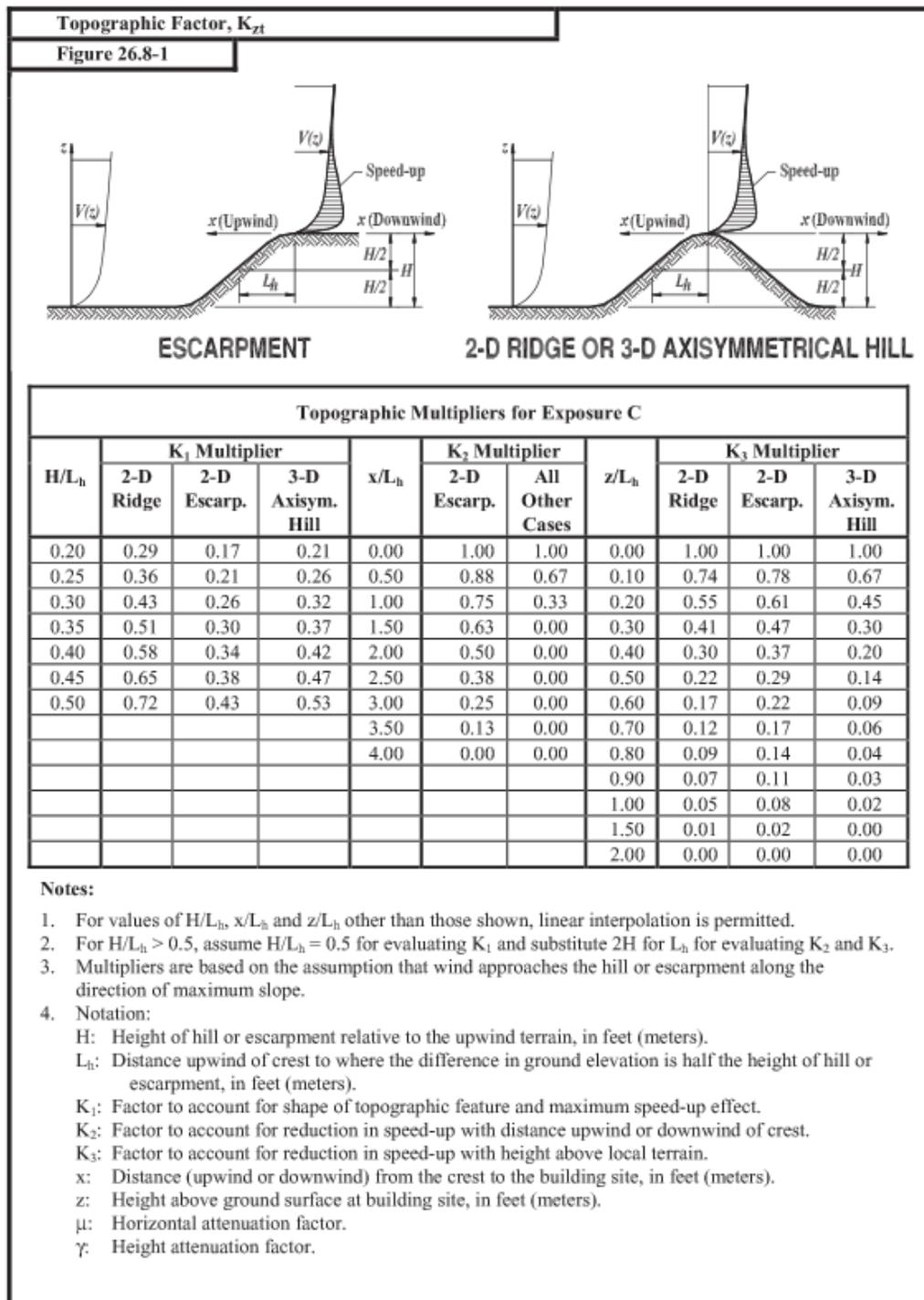
$$K_2 = \left(1 - \frac{|x|}{\mu L_h}\right)$$

$$K_3 = e^{-\gamma z/L_h}$$

Parameters for Speed-Up Over Hills and Escarpments						
Hill Shape	$K_1/(H/L_h)$			$\gamma$	$\mu$	
	Exposure				Upwind of Crest	Downwind of Crest
	B	C	D			
2-dimensional ridges (or valleys with negative H in $K_1/(H/L_h)$ )	1.30	1.45	1.55	3	1.5	1.5
2-dimensional escarpments	0.75	0.85	0.95	2.5	1.5	4
3-dimensional axisym. hill	0.95	1.05	1.15	4	1.5	1.5

Fuente: ASCE (2010)

Tabla A. 3 Factor de topografía,  $K_{zt}$  (continuación)



Fuente: ASCE (2010)

Tabla A. 4 Factor de direccionalidad,  $K_d$

Structure Type	Directionality Factor $K_d^*$
<b>Buildings</b>	
Main Wind Force Resisting System	0.85
Components and Cladding	0.85
<b>Arched Roofs</b>	0.85
<b>Chimneys, Tanks, and Similar Structures</b>	
Square	0.90
Hexagonal	0.95
Round	0.95
<b>Solid Freestanding Walls and Solid Freestanding and Attached Signs</b>	0.85
<b>Open Signs and Lattice Framework</b>	0.85
<b>Trussed Towers</b>	
Triangular, square, rectangular	0.85
All other cross sections	0.95

\*Directionality Factor  $K_d$  has been calibrated with combinations of loads specified in Chapter 2. This factor shall only be applied when used in conjunction with load combinations specified in Sections 2.3 and 2.4.

Fuente: ASCE (2010)



Tabla A. 6 Coeficientes de presión interna,  $GC_{pi}$

Enclosure Classification	$(GC_{pi})$
Open Buildings	0.00
Partially Enclosed Buildings	+0.55 -0.55
Enclosed Buildings	+0.18 -0.18

**Notes:**

1. Plus and minus signs signify pressures acting toward and away from the internal surfaces, respectively.
2. Values of  $(GC_{pi})$  shall be used with  $q_z$  or  $q_h$  as specified.
3. Two cases shall be considered to determine the critical load requirements for the appropriate condition:
  - (i) a positive value of  $(GC_{pi})$  applied to all internal surfaces
  - (ii) a negative value of  $(GC_{pi})$  applied to all internal surfaces

Fuente: ASCE (2010)

**Tabla A. 7** Coeficiente de presión externa,  $C_p$ , para tipo de cerramiento cerrado o parcialmente cerrado

Main Wind Force Resisting System – Part 1		All Heights											
Figure 27.4-1 (cont.)		External Pressure Coefficients, $C_p$											
Enclosed, Partially Enclosed Buildings		Walls & Roofs											
<b>Wall Pressure Coefficients, <math>C_p</math></b>													
Surface	L/B	$C_p$								Use With			
Windward Wall	All values	0.8								$q_e$			
Leeward Wall	0-1	-0.5								$q_h$			
	2	-0.3											
	$\geq 4$	-0.2											
Side Wall	All values	-0.7								$q_h$			
<b>Roof Pressure Coefficients, <math>C_p</math>, for use with <math>q_h</math></b>													
Wind Direction	Windward										Leeward		
	Angle, $\theta$ (degrees)										Angle, $\theta$ (degrees)		
	h/L	10	15	20	25	30	35	45	$\geq 60^\circ$	10	15	$\geq 20$	
Normal to ridge for $\theta \geq 10^\circ$	$\leq 0.25$	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	-0.2	0.0*	0.4	0.4	0.01 $\theta$	-0.3	-0.5	-0.6
	0.5	-0.9	-0.7	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	0.0*	0.01 $\theta$	-0.5	-0.5	-0.6	
	$\geq 1.0$	-1.3**	-1.0	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	0.0*	0.01 $\theta$	-0.7	-0.6	-0.6	
Normal to ridge for $\theta < 10^\circ$ and Parallel to ridge for all $\theta$	$\leq 0.5$	Horiz distance from windward edge				$C_p$		*Value is provided for interpolation purposes. **Value can be reduced linearly with area over which it is applicable as follows					
		0 to h/2				-0.9, -0.18							
		h/2 to h				-0.9, -0.18							
		h to 2h				-0.5, -0.18							
$\geq 1.0$	0 to h/2				-1.3**, -0.18		Area (sq ft)		Reduction Factor				
	> h/2				-0.7, -0.18		$\leq 100$ (9.3 sq m)		1.0				
							250 (23.2 sq m)		0.9				
> h/2				-0.7, -0.18		$\geq 1000$ (92.9 sq m)		0.8					

**Notes:**

- Plus and minus signs signify pressures acting toward and away from the surfaces, respectively.
- Linear interpolation is permitted for values of  $L/B$ ,  $h/L$  and  $\theta$  other than shown. Interpolation shall only be carried out between values of the same sign. Where no value of the same sign is given, assume 0.0 for interpolation purposes.
- Where two values of  $C_p$  are listed, this indicates that the windward roof slope is subjected to either positive or negative pressures and the roof structure shall be designed for both conditions. Interpolation for intermediate ratios of  $h/L$  in this case shall only be carried out between  $C_p$  values of like sign.
- For monoslope roofs, entire roof surface is either a windward or leeward surface.
- For flexible buildings use appropriate  $G_f$  as determined by Section 26.9.4.
- Refer to Figure 27.4-2 for domes and Figure 27.4-3 for arched roofs.
- Notation:  
 $B$ : Horizontal dimension of building, in feet (meter), measured normal to wind direction.  
 $L$ : Horizontal dimension of building, in feet (meter), measured parallel to wind direction.  
 $h$ : Mean roof height in feet (meters), except that eave height shall be used for  $\theta \leq 10$  degrees.  
 $z$ : Height above ground, in feet (meters).  
 $G$ : Gust effect factor.  
 $q_e, q_h$ : Velocity pressure, in pounds per square foot ( $N/m^2$ ), evaluated at respective height.  
 $\theta$ : Angle of plane of roof from horizontal, in degrees.
- For mansard roofs, the top horizontal surface and leeward inclined surface shall be treated as leeward surfaces from the table.
- Except for MWFRS's at the roof consisting of moment resisting frames, the total horizontal shear shall not be less than that determined by neglecting wind forces on roof surfaces.

#For roof slopes greater than  $80^\circ$ , use  $C_p = 0.8$

Fuente: ASCE (2010)

Tabla A. 8 Coeficiente de presión externa,  $C_N$ , para tipo de cerramiento abierto

Main Wind Force Resisting System – Part 1		$0.25 \leq h/L \leq 1.0$			
Figure 27.4-5	Net Pressure Coefficient, $C_N$	<b>Pitched Free Roofs</b> $\theta \leq 45^\circ, \gamma = 0^\circ, 180^\circ$			
Open Buildings					
Roof Angle, $\theta$	Load Case	Wind Direction, $\gamma = 0^\circ, 180^\circ$			
		Clear Wind Flow		Obstructed Wind Flow	
		$C_{NW}$	$C_{NL}$	$C_{NW}$	$C_{NL}$
7.5°	A	1.1	-0.3	-1.6	-1
	B	0.2	-1.2	-0.9	-1.7
15°	A	1.1	-0.4	-1.2	-1
	B	0.1	-1.1	-0.6	-1.6
22.5°	A	1.1	0.1	-1.2	-1.2
	B	-0.1	-0.8	-0.8	-1.7
30°	A	1.3	0.3	-0.7	-0.7
	B	-0.1	-0.9	-0.2	-1.1
37.5°	A	1.3	0.6	-0.6	-0.6
	B	-0.2	-0.6	-0.3	-0.9
45°	A	1.1	0.9	-0.5	-0.5
	B	-0.3	-0.5	-0.3	-0.7

Notes:

- $C_{NW}$  and  $C_{NL}$  denote net pressures (contributions from top and bottom surfaces) for windward and leeward half of roof surfaces, respectively.
- Clear wind flow denotes relatively unobstructed wind flow with blockage less than or equal to 50%. Obstructed wind flow denotes objects below roof inhibiting wind flow (>50% blockage).
- For values of  $\theta$  between 7.5° and 45°, linear interpolation is permitted. For values of  $\theta$  less than 7.5°, use monoslope roof load coefficients.
- Plus and minus signs signify pressures acting towards and away from the top roof surface, respectively.
- All load cases shown for each roof angle shall be investigated.
- Notation:  
 $L$  : horizontal dimension of roof, measured in the along wind direction, ft. (m)  
 $h$  : mean roof height, ft. (m)  
 $\gamma$  : direction of wind, degrees  
 $\theta$  : angle of plane of roof from horizontal, degrees

Fuente: ASCE (2010)

Tabla A. 9 Coeficiente de presión externa,  $C_N$ , para tipo de cerramiento abierto (continuación)

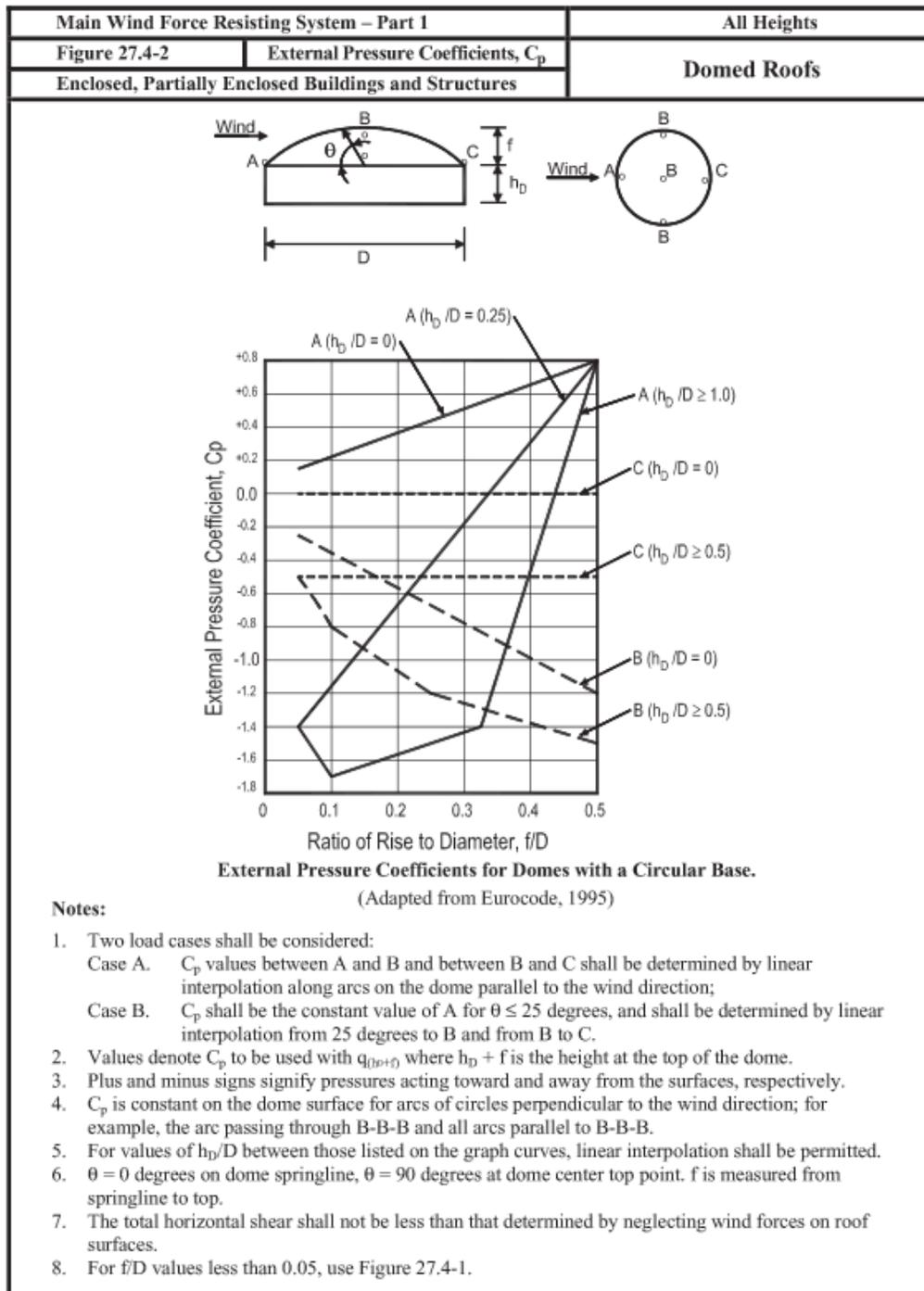
Main Wind Force Resisting System – Part I			$0.25 \leq h/L \leq 1.0$	
Figure 27.4-7	Net Pressure Coefficient, $C_N$		Free Roofs	
Open Buildings			$\theta \leq 45^\circ, \gamma = 90^\circ, 270^\circ$	
Horizontal Distance from Windward Edge	Roof Angle $\theta$	Load Case	Clear Wind Flow $C_N$	Obstructed Wind Flow $C_N$
$\leq h$	All Shapes	A	-0.8	-1.2
	$\theta \leq 45^\circ$	B	0.8	0.5
$> h, \leq 2h$	All Shapes	A	-0.6	-0.9
	$\theta \leq 45^\circ$	B	0.5	0.5
$> 2h$	All Shapes	A	-0.3	-0.6
	$\theta \leq 45^\circ$	B	0.3	0.3

Notes:

- $C_N$  denotes net pressures (contributions from top and bottom surfaces).
- Clear wind flow denotes relatively unobstructed wind flow with blockage less than or equal to 50%. Obstructed wind flow denotes objects below roof inhibiting wind flow (>50% blockage).
- Plus and minus signs signify pressures acting towards and away from the top roof surface, respectively.
- All load cases shown for each roof angle shall be investigated.
- For monoslope roofs with theta less than 5 degrees,  $C_N$  values shown apply also for cases where gamma = 0 degrees and 0.05 less than or equal to h/L less than or equal to 0.25. See Figure 27.4-4 for other h/L values.
- Notation:  
 $L$  : horizontal dimension of roof, measured in the along wind direction, ft. (m)  
 $h$  : mean roof height, ft. (m). See Figures 27.4-4, 27.4-5 or 27.4-6 for a graphical depiction of this dimension.  
 $\gamma$  : direction of wind, degrees  
 $\theta$  : angle of plane of roof from horizontal, degrees

Fuente: ASCE (2010)

**Tabla A. 10** Coeficiente de presión externa,  $C_p$ , para techos en arco



Fuente: ASCE (2010)

**Tabla A. 11** Coeficiente de presión externa,  $C_p$ , para techos en arco

Main Wind Force Resisting System and Components and Cladding – Part 1		All Heights		
Figure 27.4-3	External Pressure Coefficients, $C_p$	Arched Roofs		
Enclosed, Partially Enclosed Buildings and Structures				
Conditions	Rise-to-span ratio, $r$	$C_p$		
		Windward quarter	Center half	Leeward quarter
Roof on elevated structure	$0 < r < 0.2$	-0.9	$-0.7 - r$	-0.5
	$0.2 \leq r < 0.3^*$	$1.5r - 0.3$	$-0.7 - r$	-0.5
	$0.3 \leq r \leq 0.6$	$2.75r - 0.7$	$-0.7 - r$	-0.5
Roof springing from ground level	$0 < r \leq 0.6$	$1.4r$	$-0.7 - r$	-0.5

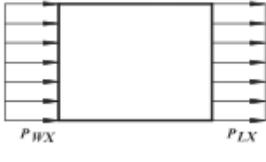
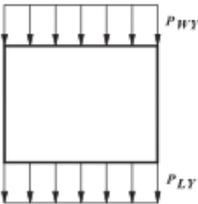
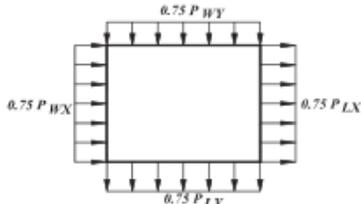
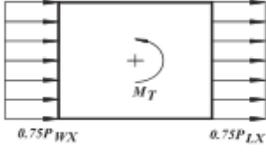
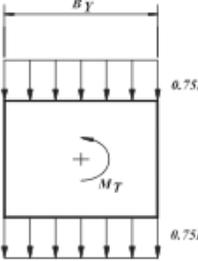
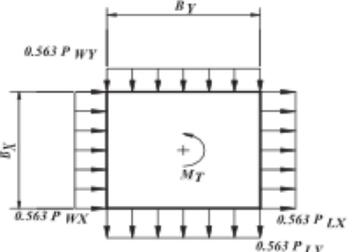
\*When the rise-to-span ratio is  $0.2 \leq r \leq 0.3$ , alternate coefficients given by  $6r - 2.1$  shall also be used for the windward quarter.

**Notes:**

1. Values listed are for the determination of average loads on main wind force resisting systems.
2. Plus and minus signs signify pressures acting toward and away from the surfaces, respectively.
3. For wind directed parallel to the axis of the arch, use pressure coefficients from Fig. 27.4-1 with wind directed parallel to ridge.
4. For components and cladding: (1) At roof perimeter, use the external pressure coefficients in Fig. 30.4-2A, B and C with  $\theta$  based on spring-line slope and (2) for remaining roof areas, use external pressure coefficients of this table multiplied by 0.87.

Fuente: ASCE (2010)

Tabla A. 12 Casos de diseño para carga de viento

Main Wind Force Resisting System – Part I		All Heights
Figure 27.4-8	Design Wind Load Cases	
 <p><b>CASE 1</b></p>	 <p><b>CASE 2</b></p>	 <p><b>CASE 3</b></p>
 <p><b>CASE 2</b></p>	 <p><b>CASE 4</b></p>	 <p><b>CASE 4</b></p>
$M_T = 0.75 (P_{WX} + P_{LX}) B_X e_X \quad e_X = \pm 0.15 B_X$		
$M_T = 0.75 (P_{WY} + P_{LY}) B_Y e_Y \quad e_Y = \pm 0.15 B_Y$		
$M_T = 0.563 (P_{WX} + P_{LX}) B_X e_X + 0.563 (P_{WY} + P_{LY}) B_Y e_Y \quad e_X = \pm 0.15 B_X \quad e_Y = \pm 0.15 B_Y$		
<p><b>Case 1.</b> Full design wind pressure acting on the projected area perpendicular to each principal axis of the structure, considered separately along each principal axis.</p> <p><b>Case 2.</b> Three quarters of the design wind pressure acting on the projected area perpendicular to each principal axis of the structure in conjunction with a torsional moment as shown, considered separately for each principal axis.</p> <p><b>Case 3.</b> Wind loading as defined in Case 1, but considered to act simultaneously at 75% of the specified value.</p> <p><b>Case 4.</b> Wind loading as defined in Case 2, but considered to act simultaneously at 75% of the specified value.</p> <p><b>Notes:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Design wind pressures for windward and leeward faces shall be determined in accordance with the provisions of 27.4.1 and 27.4.2 as applicable for building of all heights.</li> <li>Diagrams show plan views of building.</li> <li>Notation: <ul style="list-style-type: none"> <li><math>P_{WX}, P_{WY}</math>: Windward face design pressure acting in the x, y principal axis, respectively.</li> <li><math>P_{LX}, P_{LY}</math>: Leeward face design pressure acting in the x, y principal axis, respectively.</li> <li><math>e (e_X, e_Y)</math>: Eccentricity for the x, y principal axis of the structure, respectively.</li> <li><math>M_T</math>: Torsional moment per unit height acting about a vertical axis of the building.</li> </ul> </li> </ol>		

Fuente: ASCE (2010)

## Anexo B: Comprobación de la resistencia de elementos ante combinación de esfuerzos

Tabla B. 1 Comprobación de elementos ante cargas axiales y de flexión, según método LRFD

### C5.2.2 LRFD and LSD Methods

The *required strengths* [factored compression and moments]  $\bar{P}$ ,  $\bar{M}_x$ , and  $\bar{M}_y$  shall be determined using first-order elastic analysis and shall satisfy the following interaction equations. Alternatively, the required strengths [factored axial force and moment]  $\bar{P}$ ,  $\bar{M}_x$ , and  $\bar{M}_y$  shall be determined in accordance with Appendix 2 and shall satisfy the following interaction equations using the values for  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$ ,  $C_{mx}$ , and  $C_{my}$  specified in Appendix 2. In addition, each individual ratio in Eqs. (6.61)–(6.63) shall not exceed unity.

For *singly symmetric* unstiffened angle sections with unreduced *effective area*,  $\bar{M}_y$  shall be permitted to be taken as the required flexural strength [factored moment] only. For other angle sections or singly symmetric unstiffened angles for which the effective area ( $A_e$ ) at stress  $F_y$  is less than the *full unreduced crosssectional area* ( $A$ ),  $\bar{M}_y$  shall be taken either as the required flexural strength [factored moment] or the required flexural strength [factored moment] plus  $(\bar{P})L/1000$ , whichever results in a lower permissible value of  $\bar{P}$ :

$$\frac{\bar{P}}{\phi_c P_n} + \frac{C_{mx} \bar{M}_x}{\phi_b M_{nx} \alpha_x} + \frac{C_{my} \bar{M}_y}{\phi_b M_{ny} \alpha_y} \leq 1.0 \quad (6.61)$$

$$\frac{\bar{P}}{\phi_c P_{no}} + \frac{\bar{M}_x}{\phi_b M_{nx}} + \frac{\bar{M}_y}{\phi_b M_{ny}} \leq 1.0 \quad (6.62)$$

When  $\bar{P}/\phi_c P_n \leq 0.15$ , the following equation may be used in lieu of the above two equations:

$$\frac{\bar{P}}{\phi_c P_n} + \frac{\bar{M}_x}{\phi_b M_{nx}} + \frac{\bar{M}_y}{\phi_b M_{ny}} \leq 1.0 \quad (6.63)$$

where  $\bar{P}$  = required compressive axial strength [factored compressive force]

=  $P_u$  (LRFD)

=  $P_f$  (LSD)

$\phi_c$  = 0.85 (LRFD)

= 0.80 (LSD)

$P_n$  = nominal axial strength [resistance] determined in accordance with Section C4

and  $\bar{M}_x$ ,  $\bar{M}_y$  are the required flexural strengths [factored moments] with respect to centroidal axes of effective section determined for required compressive axial strength [factored axial force] alone:

$$\bar{M}_x = M_{ux} \quad \bar{M}_y = M_{uy} \quad (\text{LRFD})$$

$$\bar{M}_x = M_{fx} \quad \bar{M}_y = M_{fy} \quad (\text{LSD})$$

Fuente: Yu y LaBoube (2010)

Tabla B. 2 Comprobación de elementos ante cargas de compresión

**C4 Concentrically Loaded Compression Members**

The available axial strength [factored compressive resistance] shall be the smaller of the values calculated in accordance with this Section and Sections 5.10 and 5.13, where applicable.

**C4.1 Nominal Strength for Yielding, Flexural, Flexural-Torsional, and Torsional Buckling**

Section C4.1 shall apply to members in which the resultant of all loads acting on the member is an axial load passing through the centroid of the effective section calculated at the stress,  $F_n$ , defined in Section C4. 1 of the Specification.

(a) The nominal axial strength [compressive resistance],  $P_n$ , shall be calculated in accordance with Eq. (5.53). The safety factor and resistance factors in this section of the specification shall be used to determine the allowable axial strength or design axial strength [factored compressive resistance] in accordance with the applicable design method in Section 3.3.1, 3.3.2, or 3.3.3:

$$P_n = A_e F_n \quad (5.53)$$

$$\Omega_c = 1.80 \quad (\text{ASD})$$

$$\phi_c = \begin{cases} 0.85 & (\text{LRFD}) \\ 0.80 & (\text{LSD}) \end{cases}$$

where  $A_e$  is the effective area calculated at stress  $F_n$ . For sections with circular holes,  $A_e$  is determined in accordance with Section B2.2(a), subject to the limitations of that section. If the number of holes in the effective length region times the hole diameter divided by the effective length does not exceed 0.015, it is permitted to determine  $A_e$  by ignoring the holes. For closed cylindrical tubular members,  $A_e$  is provided in Section C4.1.5.  $F_n$  shall be calculated as follows:

$$F_n = \begin{cases} (0.658^{\lambda_c^2}) F_y & \text{for } \lambda_c \leq 1.5 & (5.54) \\ \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) F_y & \text{for } \lambda_c > 1.5 & (5.55) \end{cases}$$

where  $\lambda_c = \sqrt{F_y/F_e}$  and  $F_e$  is the least of the applicable elastic flexural, torsional, and flexural-torsional buckling stress determined in accordance with Sections C4.1.1–C4.1.5.

(b) Concentrically loaded angle sections shall be designed for an additional bending moment as specified in the definitions of  $M_x$ ,  $M_y$  (ASD) or  $\overline{M}_x$ ,  $\overline{M}_y$  (LRFD or LSD) in Section C5.2.

Fuente: Yu y LaBoube (2010)

## Anexo C: Pruebas estadísticas para la bondad de ajuste

Tabla C. 1 Prueba Kolmogorov-Smirnov

<b>Prueba Kolmogorov-Smirnov</b>								
<b>Definición</b>								
La variable estadística de Kolmogorov-Smirnov (D) se basa en la máxima diferencia vertical entre las funciones de acumuladas de distribución empírica y teórica								
$D = \max_{1 \leq i \leq n} \left( F(x_i) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F(x_i) \right)$								
<b>Prueba de la hipótesis</b>								
La hipótesis nula y la hipótesis alternativa son:								
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>H_0</math>: Los datos siguen la distribución especificada;</li> <li>• <math>H_A</math>: Los datos no siguen la distribución especificada.</li> </ul>								
La hipótesis sobre la forma de distribución será rechazada según el nivel de significación escogido ( $\alpha$ ) y si la variable D es mayor que el valor crítico obtenido de las tablas. Los valores de $\alpha$ (0,01, 0,05, etc.) generalmente son usados para evaluar la hipótesis nula ( $H_0$ ) a diferentes niveles de confianza. El valor de 0,05 es el típicamente utilizado en la mayoría de aplicaciones, sin embargo, en algunas industrias críticas, un valor menor de $\alpha$ puede ser aplicado.								
<b>Test de Kolmogorov-Smirnov sobre Bondad de Ajuste</b>								
<i>n</i>	<i>Nivel de significación <math>\alpha</math></i>							
	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.005	0.002	0.001
1	0.90000	0.95000	0.97500	0.99000	0.99500	0.99750	0.99900	0.99950
2	0.68337	0.77639	0.84189	0.90000	0.92929	0.95000	0.96838	0.97764
3	0.56481	0.63604	0.70760	0.78456	0.82900	0.86428	0.90000	0.92065
4	0.49265	0.56522	0.62394	0.68887	0.73424	0.77639	0.82217	0.85047
5	0.44698	0.50945	0.56328	0.62718	0.66853	0.70543	0.75000	0.78137
6	0.41037	0.46799	0.51926	0.57741	0.61661	0.65287	0.69571	0.72479
7	0.38148	0.43607	0.48342	0.53844	0.57581	0.60975	0.65071	0.67930
8	0.35831	0.40962	0.45427	0.50654	0.54179	0.57429	0.61368	0.64098
9	0.33910	0.38746	0.43001	0.47960	0.51332	0.54443	0.58210	0.60846
10	0.32260	0.36866	0.40925	0.45562	0.48893	0.51872	0.55500	0.58042
11	0.30829	0.35242	0.39122	0.43670	0.46770	0.49539	0.53135	0.55588
12	0.29577	0.33815	0.37543	0.41918	0.44905	0.47672	0.51047	0.53422
13	0.28470	0.32549	0.36143	0.40362	0.43247	0.45921	0.49189	0.51490
14	0.27481	0.31417	0.34890	0.38970	0.41762	0.44352	0.47520	0.49753
15	0.26589	0.30397	0.33750	0.37713	0.40420	0.42934	0.45611	0.48182
16	0.25778	0.29472	0.32733	0.36571	0.39201	0.41644	0.44637	0.46750
17	0.25039	0.28627	0.31796	0.35528	0.38086	0.40464	0.43380	0.45540

Fuente: Programa EasyFit

Tabla C. 2 Prueba Anderson-Darling

**Prueba Anderson-Darling**

**Definición**

El procedimiento de Anderson-Darling es una prueba que permite comparar el ajuste de una función de distribución acumulada observada con una función de distribución acumulada esperada. La variable estadística de Anderson-Darling ( $A^2$ ) se define como:

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1) \cdot [\ln F(X_i) + \ln(1 - F(X_{n-i+1}))]$$

**Prueba de la hipótesis**

La hipótesis nula y la hipótesis alternativa son:

- $H_0$ : Los datos siguen la distribución especificada;
- $H_A$ : Los datos no siguen la distribución especificada.

La hipótesis sobre la forma de distribución será rechazada según el nivel de confianza escogido ( $\alpha$ ) y si la variable  $A^2$  es mayor que el valor crítico obtenido de las tablas. Los valores de  $\alpha$  (0,01, 0,05, etc.) generalmente son usados para evaluar la hipótesis nula ( $H_0$ ) a diferentes niveles de confianza. El valor de 0,05 es el típicamente utilizado en la mayoría de aplicaciones, sin embargo, en algunas industrias críticas, un valor menor de  $\alpha$  puede ser aplicado.

En general, los valores críticos de la estadística de prueba Anderson-Darling dependen de la distribución específica que se está probando. Sin embargo, las tablas de valores críticos para muchas distribuciones (excepto varios los más utilizados) no son fáciles de encontrar.

La prueba de Anderson-Darling implementada en EasyFit utiliza los mismos valores críticos para todas las distribuciones. Estos valores se calculan utilizando la fórmula de aproximación, y dependen sólo el tamaño de la muestra.

Case	Adjusted test statistic	1 - $\alpha$			
		0.900	0.950	0.975	0.990
All parameters known	$A_n^2$ for $n \geq 5$	1.933	2.492	3.070	3.857
$N(\bar{X}(n), S^2(n))$	$\left(1 + \frac{4}{n} - \frac{25}{n^2}\right) A_n^2$	0.632	0.751	0.870	1.029
$\text{Expo}(\bar{X}(n))$	$\left(1 + \frac{0.6}{n}\right) A_n^2$	1.070	1.326	1.587	1.943
$\text{Weibull}(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$	$\left(1 + \frac{0.2}{\sqrt{n}}\right) A_n^2$	0.637	0.757	0.877	1.038
$\text{Log-logistic}(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$	$\left(1 + \frac{0.25}{\sqrt{n}}\right) A_n^2$	0.563	0.660	0.769	0.906

Fuente: Programa EasyFit

Tabla C. 3 Prueba Chi-Cuadrado

### Prueba Chi-Cuadrado

La prueba de Chi-cuadrado se utiliza para determinar si una muestra proviene de una población con una distribución específica. Esta prueba se aplica a los datos agrupados, por lo que el valor de la estadística de prueba depende del intervalo de los datos. Tenga en cuenta que esta prueba sólo está disponible para datos de muestras continuas.

Aunque no existe una elección óptima para el número de intervalos ( $k$ ), hay varias fórmulas que se pueden utilizar para calcular este número basado en el tamaño de la muestra ( $N$ ). Por ejemplo, EasyFit emplea la siguiente fórmula empírica:

$$k = 1 + \log_2 N$$

#### Definición

La variable estadística de Chi-Cuadrado ( $\chi^2$ ) se define como:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i},$$

Donde  $O_i$  es la frecuencia observada para el intervalo  $i$ , y  $E_i$  es la frecuencia esperada para el intervalo  $i$  calculado por

$$E_i = F(x_2) - F(x_1),$$

Donde  $F$  es la función de frecuencia acumulada de la distribución de probabilidad de ser probado, y  $x_1, x_2$  son los límites de intervalo  $i$ .

#### Prueba de la hipótesis

La hipótesis nula y la hipótesis alternativa son:

- $H_0$ : Los datos siguen la distribución especificada;
- $H_A$ : Los datos no siguen la distribución especificada.

La hipótesis sobre la forma de distribución será rechazada, según el nivel de confianza escogido ( $\alpha$ ), si la prueba estadística es mayor que el valor crítico definido por:

$$\chi^2_{1-\alpha, k-1}$$

Es decir, la función de frecuencia acumulada inversa del Chi-Cuadrado con  $k-1$  grados de libertad y un nivel de confianza de  $\alpha$ . Aunque el número de grados de libertad se puede calcular como  $k-c-1$  (donde  $c$  es el número de parámetros estimados), EasyFit calcula como  $k-1$  ya que este tipo de prueba es menos probable que rechazar el ajuste en el error.

Los valores de  $\alpha$  (0,01, 0,05, etc.) generalmente son usados para evaluar la hipótesis nula ( $H_0$ ) a diferentes niveles de confianza. El valor de 0,05 es el típicamente utilizado en la mayoría de aplicaciones, sin embargo, en algunas industrias críticas, un valor menor de  $\alpha$  puede ser aplicado.

Fuente: Programa EasyFit

## Anexo D: Carga de viento para los diferentes casos de análisis

Presiones en las caras del invernadero, Caso 1 (Caso base)			
Viento Longitudinal		Viento Transversal	
<b>Cara Barlovento</b>	26,8 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Cara Barlovento</b>	26,8 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Cara Sotavento</b>	-16,9 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Cara Sotavento</b>	-20,9 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Cara Lateral</b>	-24,8 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Cara Lateral</b>	-24,8 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Techo 0-h/2</b>	-28,8 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Techo Barlovento</b>	-22,3 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Techo h/2-h</b>	-28,8 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Techo Sotavento</b>	-22,8 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Techo h-2h</b>	-20,9 kgf/m <sup>2</sup>		
<b>Techo &gt;2h</b>	-16,9 kgf/m <sup>2</sup>		

Presiones en las caras del invernadero, Caso 2, 3, 4, 5			
Viento Longitudinal		Viento Transversal	
<b>Cara Barlovento</b>	29,3 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Cara Barlovento</b>	29,3 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Cara Sotavento</b>	-18,4 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Cara Sotavento</b>	-22,8 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Cara Lateral</b>	-27,1 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Cara Lateral</b>	-27,1 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Techo 0-h/2</b>	-31,5 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Techo Barlovento</b>	-24,4 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Techo h/2-h</b>	-31,5 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Techo Sotavento</b>	-25 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Techo h-2h</b>	-22,8 kgf/m <sup>2</sup>		
<b>Techo &gt;2h</b>	-18,4 kgf/m <sup>2</sup>		

Presiones en las caras del invernadero, Caso 6, 7, 8, 9			
Viento Longitudinal		Viento Transversal	
<b>Cara Barlovento</b>	47,9 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Cara Barlovento</b>	47,9 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Cara Sotavento</b>	-30,2 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Cara Sotavento</b>	-37,2 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Cara Lateral</b>	-44,3 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Cara Lateral</b>	-44,3 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Techo 0-h/2</b>	-51,4 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Techo Barlovento</b>	-39,9 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Techo h/2-h</b>	-51,4 kgf/m <sup>2</sup>	<b>Techo Sotavento</b>	-40,8 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Techo h-2h</b>	-37,2 kgf/m <sup>2</sup>		
<b>Techo &gt;2h</b>	-30,2 kgf/m <sup>2</sup>		

## Anexo E: Carga sísmica para los diferentes casos de análisis

Cargas Sísmicas, Caso 1 (Caso base)			
Sismo transversal			
Marco	Peso Marco (kg)	Coefficiente Sismo	Cortante Base (kg)
Frontal	676,9	0,146	98,8
Posterior	595,5	0,146	86,9
Marco Central 1	499,1	0,146	72,9
Marco Central 2	489,6	0,146	71,5
Marco Central 3	489,6	0,146	71,5
Marco Central 4	489,6	0,146	71,5
Marco Central 5	499,1	0,146	72,9
Sismo Longitudinal			
Estructura	Peso (kg)	Coefficiente Sismo	Cortante Base (kg)
Total	3739,6	0,146	546,0

Cargas Sísmicas, Casos 2 y 4			
Sismo transversal			
Marco	Peso Marco (kg)	Coefficiente Sismo	Cortante Base (kg)
Frontal	676,9	0,146	98,8
Posterior	595,5	0,146	86,9
Marco Central 1	499,1	0,146	72,9
Marco Central 2	489,6	0,146	71,5
Marco Central 3	489,6	0,146	71,5
Marco Central 4	489,6	0,146	71,5
Marco Central 5	499,1	0,146	72,9
Sismo Longitudinal			
Estructura	Peso (kg)	Coefficiente Sismo	Cortante Base (kg)
Total	3739,6	0,146	546,0

Cargas Sísmicas, Caso 3			
Sismo transversal			
Marco	Peso Marco (kg)	Coefficiente Sismo	Cortante Base (kg)
Frontal	680,3	0,146	99,3
Posterior	597,4	0,146	87,2
Marco Central 1	503,8	0,146	73,6
Marco Central 2	494,2	0,146	72,2
Marco Central 3	494,2	0,146	72,2
Marco Central 4	494,2	0,146	72,2
Marco Central 5	503,8	0,146	73,6
Sismo Longitudinal			
Estructura	Peso (kg)	Coefficiente Sismo	Cortante Base (kg)
Total	3768,1	0,146	550,1

Cargas Sísmicas, Caso 5			
Sismo transversal			
Marco	Peso Marco (kg)	Coefficiente Sismo	Cortante Base (kg)
Frontal	689,1	0,146	100,6
Posterior	603,9	0,146	88,2
Marco Central 1	517,5	0,146	75,6
Marco Central 2	507,5	0,146	74,1
Marco Central 3	507,5	0,146	74,1
Marco Central 4	507,5	0,146	74,1
Marco Central 5	517,5	0,146	75,6
Sismo Longitudinal			
Estructura	Peso (kg)	Coefficiente Sismo	Cortante Base (kg)
Total	3850,6	0,146	562,2

Cargas Sísmicas, Casos 6 y 8			
Sismo transversal			
Marco	Peso Marco (kg)	Coefficiente Sismo	Cortante Base (kg)
Frontal	724,2	0,146	105,7
Posterior	642,8	0,146	93,9
Marco Central 1	529,3	0,146	77,3
Marco Central 2	507,8	0,146	74,1
Marco Central 3	499,7	0,146	73,0
Marco Central 4	507,8	0,146	74,1
Marco Central 5	529,3	0,146	77,3
Sismo Longitudinal			
Estructura	Peso (kg)	Coefficiente Sismo	Cortante Base (kg)
Total	3941,0	0,146	575,4

Cargas Sísmicas, Caso 7			
Sismo transversal			
Marco	Peso Marco (kg)	Coefficiente Sismo	Cortante Base (kg)
Frontal	727,8	0,146	106,3
Posterior	644,9	0,146	94,2
Marco Central 1	534,4	0,146	78,0
Marco Central 2	512,5	0,146	74,8
Marco Central 3	504,3	0,146	73,6
Marco Central 4	512,5	0,146	74,8
Marco Central 5	534,4	0,146	78,0
Sismo Longitudinal			
Estructura	Peso (kg)	Coefficiente Sismo	Cortante Base (kg)
Total	3970,8	0,146	579,7