Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Disminución de carga por viento en pared de invernadero mediante la modificación de perfil aerodinámico

Reduction of wind load on greenhouse walls by modifying the aerodynamic profile

Nava-Gómez, L.A.[a], Carrera-Escobedo, J.L.[b], Chávez-Romero, R.[a]*

[a] Programa de Ingeniería Mecánica; Universidad Autónoma de Zacatecas; C.P. 98000, Zacatecas, Zacatecas.
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3774-2335, https://orcid.org/0000-0003-4095-1516*
[b] Departamento de Ingeniería Mecatrónica; Universidad Politécnica de Zacatecas; C.P.99010, Fresnillo, Zacatecas.
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1761-8096.
narm2596@gmail.com; jlcarrera200@gmail.com; rchavez@uaz.edu.mx*

Innovación tecnológica: Se realiza un análisis computacional de fluidos de las cargas de viento ambientales sobre la estructura de un invernadero rústico para mejorar su comportamiento.

Área de aplicación industrial: En la disminución de costos de la construcción y mantenimiento de invernaderos rústicos e industriales.

Recibido: 21 enero 2026
Aceptado: 21 julio 2026

Abstract

This paper presents a computational fluid dynamics (CFD) analysis of structural issues and tearing of plastic sheeting in a rustic greenhouse. The aerodynamic profile was modified to increase the greenhouse's service life by reducing normal loads on its side walls. The modified aerodynamic profile stabilizes the structure under wind loads and reduces costs associated with replacing plastic sheeting. The analysis shows that the total wind thrust force reaches a minimum of 999 N when the windward wall is inclined at 60° relative to the ground. This inclination is therefore recommended for exterior greenhouse side walls to improve their durability under high wind speeds.

Keywords: Rustic greenhouse, CFD, wind loads, aerodynamic profile.

Resumen

En el presente trabajo se expone un análisis CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para resolver problemas estructurales y de desgarramiento de cubierta plástica presentes en un invernadero rústico. Mediante la modificación del perfil aerodinámico del invernadero se pretende incrementar su vida útil al disminuir cargas normales de las paredes laterales. Un mejor perfil aerodinámico estabiliza la estructura ante cargas de viento y disminuye costos relacionados con el reemplazo de películas plásticas. Del análisis se observa que la fuerza total de empuje del viento tiene un mínimo de 999N cuando la pared que recibe las cargas de viento tiene una inclinación de 60° respecto del piso. Por lo que se recomienda dar esta inclinación a las paredes laterales externas de los invernaderos para aumentar la vida útil de los mismos ante condiciones de viento a altas velocidades.

Palabras clave: Invernadero rústico, CFD, cargas de viento, perfil aerodinámico.

1. Introducción

En el presente trabajo se realiza un análisis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) por medio de un software especializado. Con este análisis se busca resolver problemas tanto estructurales como de desgarramiento de cubierta plástica que presenta un invernadero rústico. El invernadero a analizar está ubicado en el municipio de Guadalupe en la localidad de San Ramón, del Estado de Zacatecas, México, ver Figura 1.

Este invernadero ha sufrido daños estructurales por las cargas laterales que provocan las rachas de viento, lo que también ha generado una frecuente pérdida de las capas plásticas que protegen al cultivo, así como la deformación de una las caras laterales poniendo en riesgo la producción y la integridad tanto de la estructura del invernadero como del personal que permanezca en su interior.

En la literatura técnica, el estudio de flujos sobre cuerpos como los invernaderos se ha abordado mediante dos vertientes complementarias que son la experimentación a escala en túneles de viento y las simulaciones numéricas de mecánica de fluidos computacional. Dentro de los estudios experimentales se puede mencionar el trabajo realizado por Moriyama et al. (2008) quienes realizan una investigación experimental sobre los coeficientes de presión del viento (Cp) en invernaderos de estructura de tubos conocidos como pipe houses, los cuales tienen una estructura similar a los que se analizan en este estudio. Los autores encontraron que la distribución del valor del Cp cambia significativamente según la dirección del viento y que la combinación de alta succión externa y cambios en la presión interna genera grandes fuerzas de levantamiento que pueden causar el colapso de la estructura. Estudios como el de Kwon et al. (2016) muestran que el margen de error que se obtiene entre los resultados de las simulaciones y las mediciones en la experimentación son de alrededor del 4% lo cual puede ser considerado como un error pequeño. Por su parte, Liang et al. (2023) encontraron un error de 14% cuando intentaron replicar los resultados obtenidos por Richards y Hoxey (2012) con el modelo $\kappa - \varepsilon$ realizable.

Las circunstancias ya descritas permiten observar un diseño poco cuidadoso de la estructura del invernadero. Sin embargo, antes de pensar en realizar cambios costos en la estructura, se considera que el problema

puede resolverse realizando una mejora al diseño del perfil aerodinámico de la misma. Este rediseño lograría una disminución de las cargas por viento, reduciendo costos de mantenimiento por cambio de película plásticas y alargando la vida útil del invernadero en general. Por lo anterior, el presente trabajo se plantea el objetivo de evaluar la disminución de la carga de presión que se obtiene al modificar el perfil de la pared de barlovento de un invernadero típico de la región centro-norte de México. La hipótesis correspondiente para este objetivo es: la modificación del ángulo de inclinación de la pared de barlovento permite disminuir la carga que el viento produce sobre la misma.



Figura 1. Invernadero rústico analizado.

2. Antecedentes

Un invernadero es una construcción agrícola, con una cubierta traslúcida que tiene por objetivo modificar y controlar los principales factores ambientales que intervienen en el crecimiento y desarrollo de diferentes especies para su producción constante.

Aunque se tienen diferentes normativas respecto de la construcción de invernaderos, tales como, NMX-E-255-CNCP-2013, UNE-EN 13031-1, IS14462(1997), PNS/PAES415 por mencionar solo algunas, existe una cantidad importante de invernaderos llamados rústicos que son construidos sin atender dichas normativas, por lo que sus estructuras no siempre resisten las diversas cargas a las que se ven sometidas.

Los invernaderos son susceptibles de sufrir daños por varios factores ambientales como la radiación solar o el viento. Contra la radiación solar se suelen hacer mejoras al utilizar películas plásticas especiales para resistir la radiación solar en presencia de condiciones de alta humedad. Por otra parte, en lo que respecta al daño producido por las ráfagas de viento lo acostumbrado es reforzar las estructuras y cimentaciones de los invernaderos, lo que típicamente implica un nivel análisis y gasto considerable (Abid et al., 2025; Bárzaga et al., 2017; Gutiérrez-Castillo, 2023; Ojeda-Bustamante & Flores-Velázquez, 2015).

En lo que respecta a cargas por vientos en invernaderos, algunos estudios se pueden encontrar en los trabajos de Castillo Méndez y Rojano Aguilar (2017), López Bautista et al. (2016) y Ojeda-Bustamante y Flores-Velázquez (2015), donde se calculan las cargas de viento en la estructura o en la película plástica; también existen análisis de flujos de viento y cambios de presión dentro de los invernaderos considerando varios fenómenos físicos relacionados (Abid et al., 2025; Cabascango-Álvarez, 2019; Ojeda-Bustamante & Flores-Velázquez, 2015; Rafael, 2014). En el trabajo de Santoyo Guerrero y Ramírez-Mata (2017) se hace una

consideración de cargas posibles y se determina si la estructura será capaz de soportar dichas cargas; de manera similar, se analiza en los trabajos de Bárzaga et al. (2017) y Manzo Reyes et al. (2020). Amador et al. (2021) realizaron un estudio comparativo entre los coeficientes de presión (Cp) obtenidos mediante túneles de viento y simulaciones de dinámica de fluidos computacional, CFD y los establecidos por la normativa Eurocódigo EN1991-1-4 para cubiertas de naves industriales bajas. En este estudio, los autores toman como válidos sin diferencia alguna a la información proveniente de estudios numéricos y la que se obtuvo de estudios experimentales.

Wang et al. (2021) realizaron una revisión de la literatura en la que analizan los métodos y factores críticos para estimar los coeficientes de presión del viento (Cp) en invernaderos. Los principales métodos son la experimentación en campo a escala real, experimentación a escala en túneles de viento y simulación numérica mediante CFD. Los autores del artículo de revisión indican que existe una alta concordancia y validación entre los resultados numéricos y los experimentales, lo cual posiciona a la simulación por computadora como una herramienta precisa para el diseño estructural. Finalmente, concluyen que la simulación numérica mediante CFD es un método fiable, eficiente y visualmente claro que complementa y coincide satisfactoriamente con las pruebas experimentales.

Adicionalmente, el comportamiento del flujo de viento sobre invernaderos y estructuras similares también se ha caracterizado de forma experimental mediante ensayos en túnel de viento; por ejemplo, en el trabajo de Kwon et al. (2016) se midieron los coeficientes de presión de viento de cuatro tipos de invernaderos de un solo vano en función de la dirección del viento, la pendiente del techo y el radio de curvatura, mientras que en el trabajo de Moriyama et al. (2008) se ensayó un modelo rígido a escala 1:20 de un invernadero tipo túnel para analizar la influencia de las aberturas laterales sobre los coeficientes de presión internos y externos. Estos resultados experimentales han servido, a su vez, como referencia de validación para modelos numéricos, tal como se reporta en el trabajo de Kim et al. (2019), donde se comparan coeficientes de presión obtenidos mediante simulación de grandes escalas (LES) con mediciones de túnel de viento.

Sin embargo, hasta este punto no se ha encontrado en la literatura especializada alguna propuesta de cambios en el perfil del invernadero para soportar cargas de viento sin modificaciones estructurales. En el presente trabajo un cambio en el perfil aerodinámico del invernadero se considera como alternativa, para disminuir los daños estructurales sin hacer cambios sustanciales en la estructura del invernadero rústico ya existente. Esta mejora, consiste en modificar la inclinación de las paredes del invernadero donde las cargas por viento son más recurrentes, la inclinación óptima se cuantifica por medio del método de elementos finitos.

3. Metodología

3.1. Características del invernadero rústico.

Para el presente estudio se ha considerado un invernadero rústico con techumbre parabólica como el que se muestra en la Figura 1. El invernadero se encuentra localizado en la localidad de San Ramón, en el municipio Guadalupe del Estado de Zacatecas, México, con coordenadas (22.682833, -102.552528). La localidad se encuentra a una altura de 2285 metros sobre el nivel del mar con una temperatura y presión atmosférica promedio de 20°C y 0.765 atm.

El invernadero se ve afectado por ráfagas de viento cuyas velocidades máximas se alcanzan en el mes de abril y son registradas por la Red de Monitoreo Agroclimático del Estado de Zacatecas del INIFAP, que tiene una estación en el mismo municipio. La velocidad máxima alcanzada es de 12 m/s (43.2 km/h) con dirección predominante del viento viniendo desde el suroeste. En la Figura 2 se muestra una imagen satelital del invernadero rústico analizado y su ubicación exacta, además se indica la dirección predominante del viento y la cara con mayores afectaciones.



Figura 2. Vista satelital de invernadero rústico analizado.

En este trabajo se realiza un análisis CFD, con el fin de predecir la interacción entre la pared del invernadero y las cargas de viento. Mediante este análisis se pretende modificar el diseño aerodinámico del invernadero e incrementar su vida útil, dando estabilidad a su estructura y disminuyendo costos por reemplazo de películas plásticas.

3.2. Ecuaciones relacionadas con el CFD

El modelo utilizado para modelar matemáticamente el flujo de aire alrededor del invernadero consta de la ecuación de continuidad, ec (1), y las ecuaciones de Navier-Stokes ecs. (2), (3) y (4). Debido a la variación casi aleatoria de las velocidades se utiliza un esquema con valores promedio de velocidad el cual causa la aparición de nuevos términos que usualmente son tratados mediante modelos de turbulencia. En este trabajo se selecciona el modelo $\kappa - \varepsilon$ estándar, ya que es uno de los más utilizados y validados en problemas de flujo turbulento y subsónico, con κ como la energía cinética de turbulencia y ε como tasa de disipación de la turbulencia. Se utiliza este modelo en estado estable ya que ha sido validado en repetidas ocasiones como se describe en estudios previos (Cengel & Cimbala, 2015; Launder & Spalding, 1972; Ojeda-Bustamante & Flores-Velázquez, 2015; Ricci, 2025; Versteeg & Malalasekera, 2007). Específicamente el modelo $\kappa - \varepsilon$ estándar fue utilizado en el modelado de un invernadero por Liang et al. (2023), encontrando una diferencia del 20% entre los valores obtenidos en un túnel de viento y los obtenidos con el modelo.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad \textbf{(Ec. 1)}$$

$$-\frac{\partial(p)}{\partial x} + div(\mu\ grad\ u) + S_{Mx} = 0 \quad \textbf{(Ec. 2)}$$

$$-\frac{\partial(p)}{\partial y} + div(\mu\ grad\ v) + S_{My} = 0 \quad \textbf{(Ec. 3)}$$

$$-\frac{\partial(p)}{\partial z} + div(\mu\ grad\ w) + S_{Mz} = 0 \quad \textbf{(Ec. 4)}$$

$$div(\rho k U) = div\left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} grad\ k\right] + 2\mu_t S_{ij}.S_{ij} - \rho\varepsilon \quad \textbf{(Ec. 5)}$$

$$div(\rho\varepsilon U) = div\left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} grad\ \varepsilon\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}2\mu_t S_{ij}.S_{ij} - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon}{k} \quad \textbf{(Ec. 6)}$$

Donde:
u, *v*, *w* son las componentes de la velocidad del fluido en la dirección de los ejes *x*, *y*, *z* respectivamente.
ρ es la densidad del fluido
p es la presión
S_{MX}, S_{MY}, S_{MZ}, son las fuentes de momentum en la dirección de los ejes *x*, *y*, *z* respectivamente.
μ es la viscosidad dinámica del fluido
μ_t es la viscosidad dinámica turbulenta
U es el vector de velocidades promedio
S_{ij} es la tasa de deformación
k es la energía cinética turbulenta
ε es la velocidad de disipación de la energía cinética turbulenta.

3.3. Condiciones de la simulación

Las propiedades cinemáticas del aire, tales como densidad y viscosidad dinámica son calculadas por medio de un software CFD a partir de la temperatura y presión del aire que, de acuerdo a la ubicación del invernadero, son de 20°C y 0.765 atm.

Se considera que la entrada del viento es desde la parte derecha del dominio computacional, con una velocidad media de 12 m/s (aproximadamente 43 km/h), ver Figura 3. En cuanto a la intensidad de turbulencia, depende de la rugosidad de la superficie del terreno donde se ubica el invernadero (Ruiz, 2018), de 0.05 para este caso, ya que se trata de una superficie plana y sin obstáculos, acorde a lo descrito en otros estudios (Barber, 2006; Lak-woo, 2015; Rafael, 2014). La escala de longitud se configuró en 0.01m.

La parte superior de la Figura 3 muestra el sólido tridimensional utilizado para las simulaciones numéricas, el cual tiene dimensiones de de 7.0 m de ancho por 12.0 m de largo, una altura máxima de 3.52 m y mínima en la cara a barlovento de 2.0 m. En la parte inferior de la Figura 3 se muestra el dominio computacional, aquí mismo se observa que se considera el invernadero y el suelo como sólidos interactuando con el resto del volumen que es ocupado por aire. Las dimensiones en la Figura 3 aparecen en centímetros.

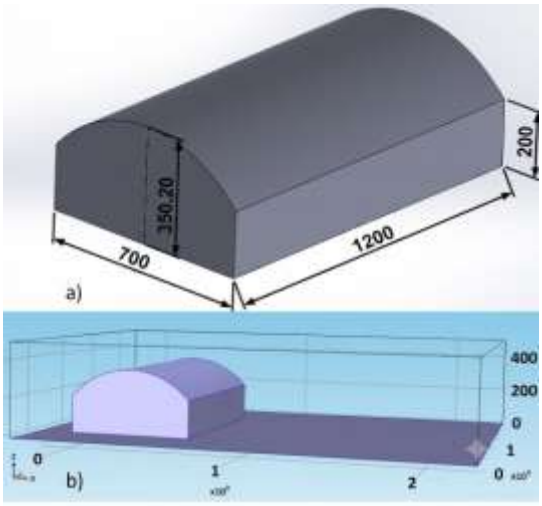


Figura 3. Modelado computacional del invernadero, a) sólido tridimensional, b) dominio computacional.

El mallado es del tipo no estructurado, tetraédrico libre. Para verificar la independencia de los resultados con el tamaño de la malla, se generan varios mallados con diferentes densidades y se calculan las presiones máximas hasta encontrar convergencia en la simulación, ver Figura 4. Los tamaños de malla utilizados fueron generados automáticamente al configurar el tamaño de malla como extremadamente gruesa, más gruesa, gruesa, normal y fina. El resultado se estabiliza en tamaño de malla normal y fina, de los cuales se utilizó la opción de tamaño normal para que la demanda computacional sea la más baja y con buenos resultados. El porcentaje de variación entre los valores de presión para la malla normal y la gruesa es de 0.325% la cual es casi 10 veces menor que la que se obtiene entre las mallas extremadamente gruesa y más gruesa, motivo por el cual se considera que no se obtendrán beneficios significativos si se sigue disminuyendo el tamaño de la malla. La variación no monótona que se observa puede deberse según se explica en el libro de Roache (2009) a los cambios bruscos en las fronteras de regiones de flujo cuando se utiliza un modelo de turbulencia RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes), dicho en otras palabras, la causa del comportamiento podría ser el cambio brusco en la dirección del aire al encontrarse de frente con la pared del invernadero, en conjunto con el uso de un modelo RANS de turbulencia. De acuerdo al mismo autor, otra posible causa es el gran tamaño de las mallas extra gruesas y gruesa.

Para resolver el problema no lineal se utilizó el método iterativo de Newton-Raphson. El problema completo se aborda con un enfoque totalmente acoplado. Esto significa que la presión y la temperatura se resuelven simultáneamente en cada iteración, en lugar de hacerlo de forma segregada (una variable a la vez). Este enfoque es más robusto para problemas con fuerte acoplamiento entre las ecuaciones. En el núcleo de cada iteración de Newton, se debe resolver un sistema de ecuaciones lineales a gran escala. Para ello, se emplea el solver directo PARDISO. El proceso iterativo de Newton continúa hasta que se cumple un criterio de convergencia. En este modelo, la tolerancia del solver no lineal se ha fijado en 10^{-4}. La solución numérica de este sistema de ecuaciones diferenciales parciales (EDPs) acopladas y no lineales se obtiene mediante el Método de los Elementos Finitos. El dominio geométrico se divide en un número finito de elementos más pequeños. Para este modelo, se utiliza una malla no estructurada de tetraedros con funciones de forma lineales. Las ecuaciones se resolvieron mediante el software COMSOL Multiphysics 5.3.

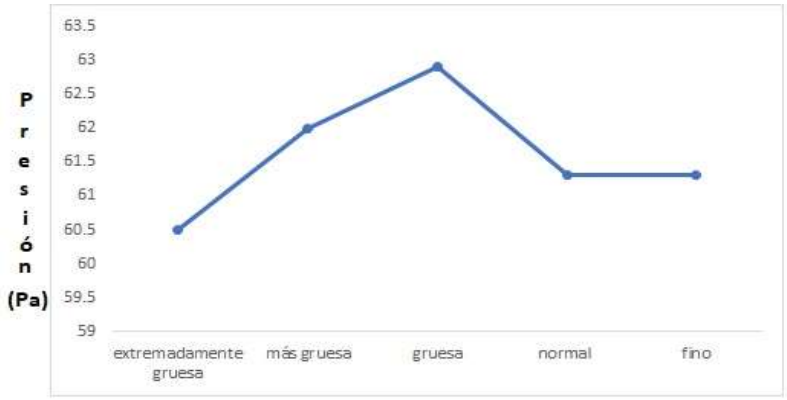


Figura 4. Variación de la presión máxima según el tamaño de la malla.

El mallado resultante se observa en la Figura 5 y cuenta con las siguientes características:

Número de grados de libertad resueltos 31722
Número de elementos de vértice 16
Número de elementos de arista: 298
Número de elementos de contorno: 3496
Número de elementos: 30619

También en la Figura 5 se muestran las condiciones de frontera. La cara de la derecha es la entrada de aire, la cual se configuró a 12 m/s. Las caras frontal, superior y posterior se configuran como contornos abiertos, la cara inferior se configura como una pared con la condición no deslizamiento y la cara lateral izquierda se configura como salida.

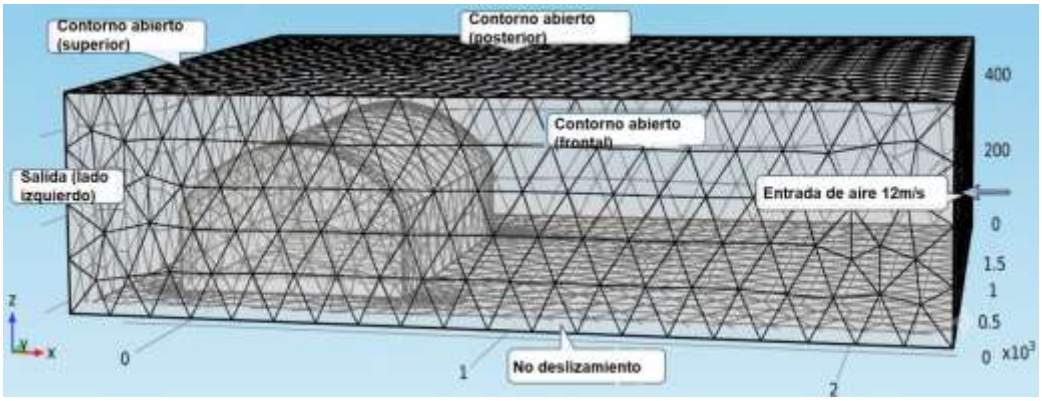


Figura 5. Mallado del dominio computacional y condiciones de frontera.

4. Discusión de resultados

En la Figura 6 se muestran las líneas de flujo del viento de las simulaciones con el perfil inicial de a) 90°, b) 45° y c) 15°. Se puede observar que entre menor sea el ángulo, el flujo del viento pasa sobre el invernadero con cambios menos bruscos en la dirección de su velocidad. Lo anterior implica que, entre más pequeño sea el ángulo, menor será la resistencia que opone la pared al viento (o barlovento), haciéndola más aerodinámica. Asimismo, se evidencia la formación de vórtices en la pared de sotavento, fenómeno que propicia la aparición de regiones de baja presión. Este comportamiento es consistente con los resultados reportados por López Bautista et al. (2016), Liang et al. (2023) y Kwon et al. (2016), quienes observaron patrones similares de generación de vórtices y distribución de bajas presiones en la pared de sotavento de las configuraciones analizadas.

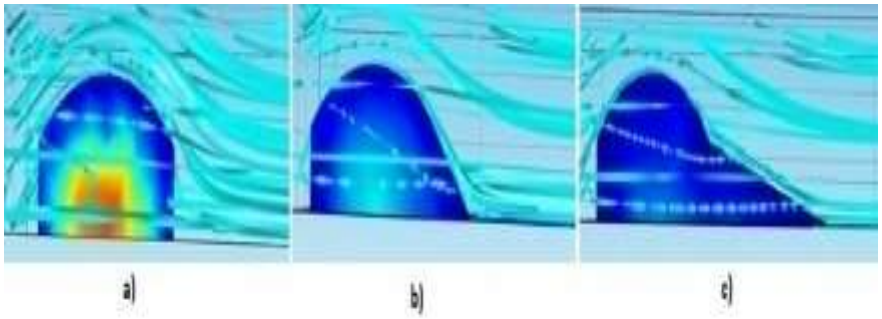


Figura 6. Líneas de flujo del viento sobre el invernadero.

Los resultados mostrados en la Figura 6 relativos a la pared de barlovento se refuerzan con lo que se muestra en la Figura 7, en la cual los contornos de presión en la pared que recibe predominantemente el impacto del flujo del viento. También se puede observar en esta figura que la presión máxima que se genera sobre la pared disminuye al modificar la estructura del invernadero, empezando en a) $61.6Pa$, pasando por b) $54.8Pa$ y finalmente cayendo hasta c) $40.7Pa$. Si se usan los coeficientes de presión obtenidos por López Bautista et al. (2016) la presión en el inciso a) sería de 53 Pa, un valor cercano al obtenido en este estudio cuya diferencia puede deberse a la diferencia en la forma física de los invernaderos considerados en los diferentes estudios o a que los estudios consideran diferentes velocidades del viento. Por otra parte, Aissa et al. (2024) reportan coeficientes de presión de 1 y ligeramente mayores, con lo cual se podría predecir una presión tan alta como 66 Pa. De esta manera, se puede decir que los resultados encontrados en este estudio están en el rango de lo esperado. En cualquier caso, tanto el estudio de López Bautista et al. (2016) como el de Aissa et al. (2024) y el presente coinciden en que las cargas positivas máximas se encuentran en la pared de barlovento.

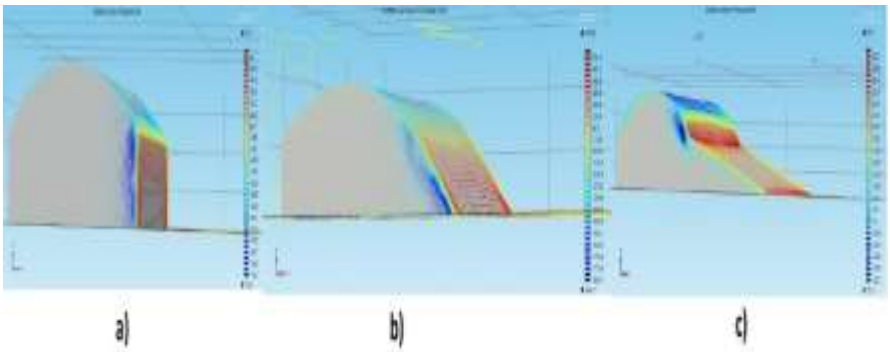


Figura 7. Contornos de presión. a) Pared a 90° b) Pared a 45° c) Pared a 15°.

Usando el método estándar de integración numérica, es posible integrar la distribución de presión sobre la cara a barlovento a fin de encontrar la fuerza total ejercida sobre el invernadero. Las fuerzas resultantes se muestran en la Tabla 1, donde se puede apreciar que la fuerza depende tanto de la presión como de la superficie y que, al disminuir el ángulo de inclinación de la pared, se incrementa la superficie de la misma, por lo que la fuerza total en la cara aumenta, aunque el ángulo de inclinación disminuya. Se encontró que la fuerza tiene un mínimo cuando el ángulo de la pared es de 60°.

Tabla 1. Carga de viento en la pared del invernadero.

Ángulo	90º	75º	65º	**60º**	55º	45º	30º	15º
Fuerza total (N)	1104	1022	1005	999	1003	1032	1309	1406
% Inc fuerza	0.00	-7.43	-8.97	-9.51	-9.15	-6.52	18.57	27.36
% Inc área pared	0.00	3.33	10.42	15.42	22.08	41.25	189.17	286.25

Del análisis se aprecia que al inclinar la pared lateral a 60° respecto del piso la fuerza del viento sobre la cara de barlovento disminuiría 9.51% a costa de un incremento del área de la cara de un 15.42%. Con los datos obtenidos se puede obtener un coeficiente de presión de 0.76, el cual puede ser útil para fines de comparación con otros estudios o bien con normas técnicas.

Inclinaciones mayores de la pared lateral generan fuerzas totales mayores ya que, aunque la presión disminuye, el área aumenta, lo que implica que además de la película plástica también deben agregarse soportes para que sostengan dicha película plástica sin deformarse por su propio peso y por la presión de las cargas de viento, lo que se traduciría en costos adicionales. Los resultados obtenidos corresponden a una velocidad del viento de 12 m/s y a la dirección predominante registrada en el sitio de estudio. Para otras velocidades, es de esperarse que el patrón general del flujo alrededor del invernadero permanezca similar, sin embargo, la magnitud de las presiones y de la fuerza resultante aumentará aproximadamente con el cuadrado de la velocidad del viento. Por otra parte, si cambia la dirección del viento las regiones de máxima presión se moverán hacia otras superficies del invernadero. En consecuencia, los valores cuantitativos aquí obtenidos son representativos de la condición crítica correspondiente a la dirección predominante del viento en la zona de estudio, mientras que otras orientaciones requerirían simulaciones específicas. Finalmente, el costo de las modificaciones necesarias para disminuir la carga por viento y por ende incrementar la vida útil se pueden estimar si se considera el costo actual del plástico y el perfil tubular y la mano de obra. Se estima que el costo del plástico es de aproximadamente 270 pesos (unos 15 dólares), el perfil tubular ronda los 1000 pesos (58 dólares). La mano de obra es más difícil de cotizar, sin embargo, una costumbre común suele ser cobrar por este concepto tanto como se haya gastado en insumos, por lo cual, el precio total de las modificaciones puede estimarse en 2540 pesos (147 dólares). Hay que considerar que también se incrementa el área protegida en la que se puede cultivar. La reducción esperada en la frecuencia de sustitución de la cubierta plástica, la disminución de intervenciones de mantenimiento y el incremento de la vida útil de la estructura son aspectos que constituyen una línea de investigación futura para evaluar la rentabilidad de la propuesta.

El presente trabajo expone algunas limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. En primer lugar, el modelo numérico no fue validado mediante mediciones experimentales propias. En su lugar, la consistencia del modelo se evaluó mediante la comparación con resultados experimentales y numéricos previamente reportados para invernaderos de geometría similar, observándose una concordancia satisfactoria.

En segundo lugar, las simulaciones se realizaron considerando un flujo tridimensional en estado estacionario mediante las ecuaciones RANS y el modelo de turbulencia estándar $k-\varepsilon$. Esta aproximación permite obtener el campo medio de velocidades y presiones, sin embargo, no reproduce explícitamente

fenómenos transitorios como el desprendimiento periódico de vórtices.

Finalmente, el estudio se desarrolló para la velocidad máxima y la dirección predominante del viento registradas en la localidad analizada. En consecuencia, los resultados deben interpretarse como representativos de dicha condición de diseño y no necesariamente de otras condiciones meteorológicas. Estudios futuros podrán incorporar simulaciones transitorias mediante LES o DES, diferentes velocidades y direcciones del viento, así como una validación experimental que permita cuantificar con mayor precisión la capacidad predictiva del modelo.

5. Conclusiones

En el presente estudio se modeló matemáticamente el comportamiento del aire sobre la pared de barlovento de un invernadero rústica con techumbre parabólica con el fin de minimizar la fuerza que el viento ejerce sobre la estructura. Se encontró que la presión que se ejerce por el viento sobre la pared disminuye siempre que disminuye el ángulo de la pared, sin embargo, la fuerza resultante no disminuye siempre, sino que encuentra un mínimo cuando el ángulo de la pared es de 60°. Lo anterior se puede explicar si se considera que la superficie de la pared se incrementa al disminuir el ángulo de la pared.

Al modificar el perfil aerodinámico de un invernadero rústico las cargas debidas al viento disminuyen hasta un 9.51% con un incremento del área de pared del 15.42%. Está disminución puede traducirse en mayor estabilidad de la estructura del invernadero, sin tener que recurrir al reforzamiento de la estructura actual del invernadero.

Para el análisis CFD, el tamaño de malla se definió por medio de un análisis de sensibilidad donde al probar diversos tamaños de malla se encontró un grado de estabilidad en el cálculo de las presiones máximas por carga de viento al utilizar las opciones automáticas de mallado normal y fino del software utilizado.

Este análisis puede ser utilizado para el diseño de invernaderos más ligeros y por ende más económicos, con comportamientos más estables ante condiciones de viento a alta velocidad. Este rediseño puede alargar la vida útil de los invernaderos y reducir la contaminación del medio ambiente por el desgarre y reposición de películas plásticas, que, por lo general, son resistentes a rayos UV y por lo tanto con periodos de biodegradación muy grandes.

Si bien en este trabajo no se presenta una validación experimental, los resultados obtenidos muestran una buena concordancia con distribuciones de presión y cargas reportadas previamente para invernaderos de geometría similar. Esta consistencia con la literatura permite pensar que el modelo físico utilizado es adecuado, sin embargo, no constituye por sí misma una validación del modelo.

6. Agradecimientos

Se agradece a los propietarios del Rancho el 18, los hermanos Luis Alberto y Jorge González Hernández por las facilidades otorgadas para la realización del presente trabajo.

7. Referencias

Abid, H., Ketata, A., Lajnef, M., Chiboub, H., & Driss, Z. (2025). Enhancing climate control and management in arid conditions: A numerical study on the impact of roof pitch angle on greenhouse climates. *Journal of Engineering Research*, *13*, 1716–1731.

Aissa, M., Dadda, B., Boutelhig, A., & Laouar, S. (2024). Numerical investigation of aerodynamic behaviors inside and outside a tunnel greenhouse. *Journal of Renewable Energies*, *1*(1), 15–29. https://doi.org/10.54966/jreen.v1i1.1378

Amador, M. A., Fernández Lorenzo, I., López Llanusa, A., & Parnás, V. B. E. (2021). Estudio comparativo de coeficientes de presión normativos y experimentales en cubiertas de naves industriales. *Ingeniería y Desarrollo*, *39*(2), 298–314. https://doi.org/10.14482/inde.39.2.725.4

Barber, T. (2006). Aerodynamic ground effect: A case study of the integration of CFD and experiments. *International Journal of Vehicle Design*, *40*(4).

Bárzaga, J., Morales, Y., Mena, E., Beltrán, R., & Morales-Leslie, J. (2017). Análisis numérico a un invernadero tipo túnel bajo cargas de vientos fuertes en Cuba. *UTCiencia. Ciencia y Tecnología al Servicio del Pueblo*, *4*(2), 62–70.

Cabascango-Álvarez, M. J. (2019). *Modelamiento del flujo de aire forzado en un invernadero* [Tesis, Universidad Técnica del Norte].

Castillo Méndez, J. C., & Rojano Aguilar, A. (2017). Simulación de la cubierta plástica de invernadero usando elementos finitos. En *III Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII 2017*. Puebla, México.

Cengel, Y., & Cimbala, J. (2015). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications*. McGraw-Hill.

Gutiérrez-Castillo, A. (2023). *Diseño de estabilidad estructural en invernaderos considerando acero y madera en el distrito La Yarada Los Palos – Tacna* [Tesis, Universidad Privada de Tacna].

Kim, R., Lee, I., Yeo, U., & Lee, S. (2019). Estimating the wind pressure coefficient for single-span greenhouses using a large eddy simulation turbulence model. *Biosystems Engineering*, *188*, 114–135. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.009

Kwon, K., Kim, D., Kim, R., Ha, T., & Lee, I. (2016). Evaluation of wind pressure coefficients of single-span greenhouses built on reclaimed coastal land using a large-sized wind tunnel. *Biosystems Engineering*, *141*, 58–81. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.11.007

Lak-woo, K. (2015). *Evaluation of wind pressure coefficients of greenhouses using wind tunnel test and numerical model* [Tesis, Seoul National University].

Launder, E., & Spalding, B. (1972). *Lectures in mathematical models of turbulence*. Academic Press.

Liang, Z., He, G., Li, Y., Gao, Z., Ren, X., Wu, Q., Zhao, S., & Xu, J. (2023). Analysis of wind pressure coefficients for single-span arched plastic greenhouses located in a valley region using CFD. *Agronomy*, *13*(2), 553. https://doi.org/10.3390/agronomy13020553

López Bautista, V., Villaseñor Perea, C. A., López Canteña, G. de J., Carrillo García, M., & Cervantes Osornio, R.

(2016). Análisis de coeficientes de la fuerza del viento y comportamiento del flujo sobre un modelo de invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *7*(4), 821–832.

Manzo Reyes, J. L., Vargas Ferrer, J., & Mayoral Arzaba, E. H. (2020). Diseño y simulación de invernadero germinador con uniones mecánicas mediante la comparación de un invernadero real usando SolidWorks Simulation y Flow Simulation. En *Innovación en biotecnología 2* (pp. 57–72). Red Iberoamericana de Academias de Investigación A.C.

Moriyama, H., Sase, S., Uematsu, Y., & Yamaguchi, T. (2008). Wind pressure coefficient of a pipe-framed greenhouse and influence of the side gable openings using a wind tunnel. *Journal of the Society of Agricultural Structures, Japan*, *38*(4), 237–248.

Ojeda-Bustamante, W., & Flores-Velázquez, J. (2015). *Consideraciones agronómicas para el diseño de invernaderos típicos de México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Rafael, G. R. (2014). *Análisis de flujo ambiental y propuesta metodológica para simulaciones CFD aplicadas a la ventilación natural de invernaderos* [Tesis, Universitat Politècnica de València].

Ricci, A. (2025). Review of OpenFOAM applications in the computational wind engineering: From wind environment to wind structural engineering. *Meccanica*, *60*, 1695–1735.

Richards, P., & Hoxey, R. (2012). Pressures on a cubic building—Part 1: Full-scale results. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *102*, 72–86.

Roache, P. J. (2009). *Fundamentals of verification and validation*. Hermosa Publishers.

Ruiz, C. G. R. (2018). *Evaluación de modelos computacionales en CFD para la predicción del comportamiento del viento alrededor de edificios* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes].

Santoyo Guerrero, L. M., & Ramírez-Mata, J. L. (2017). Simulación y análisis estructural de invernadero para cultivo de hortalizas. *Revista del Desarrollo Urbano y Sustentable*, *3*(9), 60–65.

Versteeg, H., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. Pearson Education Limited.

Wang, C., Nan, B., Wang, T., Bai, Y., & Li, Y. (2021). Wind pressure acting on greenhouses: A review. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *14*(2), 1–8. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211402.5261