

ESTIMACIÓN DEL REQUERIMIENTO DE ENERGÍA PARA CALEFACCIÓN EN INVERNADEROS AGRÍCOLAS, EN CUATRO CIUDADES DEL ESTADO DE CHIHUAHUA, DURANTE EL PERIODO INVERNAL

Plinio E. Castro-López, Jose A. Burciaga-Santos, Ignacio R.,
Martín-Domínguez* y Maria T. Alarcón-Herrera

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. (CIMAV)
Departamento de Energía Renovable y Protección al Medio Ambiente
Miguel de Cervantes 120. Complejo Industrial Chihuahua. 31109 Chihuahua, Chih. México.
*(614) 439-1148 ignacio.martin@cimav.edu.mx

RESUMEN

En éste trabajo se presenta una estimación del requerimiento energético para calefacción en que incurrir los invernaderos agrícolas en cuatro ciudades del estado de Chihuahua, para dos tipos de cultivos comunes en la región. Se utiliza un método basado en el denominado GHC (Grados hora para calefacción), en el cual se determina la diferencia de temperaturas entre el medio ambiente y la temperatura interior del invernadero (promedio recomendado para cada cultivo), y considerando constante tal diferencia durante un periodo de tiempo fijo (paso de integración), se puede calcular la carga térmica total para un periodo de tiempo extendido como una suma de diferencia de temperaturas, y en función del área expuesta y del coeficiente global de transferencia de calor de la envolvente del invernadero. A partir de datos climáticos de cada ciudad, y utilizando el generador de datos climáticos del paquete TRNSYS, se generan datos horarios de temperatura ambiente para cuatro ciudades y se determinan los gradientes de temperatura acumulados para cada una. Con tal información se puede establecer una comparación entre ellas sobre el consumo energético incurrido.

ABSTRACT

This paper presents an estimate of the heating energy requirement incurred by agricultural greenhouses in four cities in the state of Chihuahua, for two common crops of the region. This method is based on the concept of Heating Degree-Hours (HDH, °C-h), a measure of the temperature difference between the greenhouse and the environment. The inside temperature is the recommended average for each crop. If this difference is considered to be constant for a fixed period of time (integration step), the total heat load can be calculated for an extended period of time. It is calculated as a sum of temperature differences, and depends on the exposed area and overall heat transfer coefficient of the greenhouse covering material. Weather data for each city and the weather data generator in the TRNSYS software package were used to generate ambient temperature data for the four cities. With this, accumulated temperature gradients were determined for each city and their energy consumption was compared.

Palabras clave

Invernaderos, Costos, Energía, Grados-hora, TRNSYS

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

El cultivo realizado bajo invernadero se hace con el fin de obtener mejores rendimientos de producto por unidad de área superficial cultivada, así como una mayor calidad de producto, que la obtenida mediante métodos de cultivo tradicional. Un invernadero es toda aquella estructura cerrada, cubierta por materiales transparentes, dentro de la cual es posible obtener un microclima artificial y con ello cultivar plantas fuera de estación en condiciones óptimas. (Sheti, 2009; Teitel *et al.*, 2009; Bartazanas *et al.*, 2009). Este tipo de sistemas productivos requiere para su implementación, elevados consumos energéticos derivados de los procesos de climatización del mismo (Chinese *et al.*, 2005) y adicionalmente, del control automatizado de las variables que influyen en su producción (Meijaard, 1989). Se requiere de una fuente de energía para mantener dentro del rango óptimo, o de confort de la planta, la temperatura del microambiente dentro del invernadero, de acuerdo al tipo de cultivo. El desconocer, o no conocer a fondo los patrones de consumo y demanda máxima de energía de estos sistemas de producción, es siempre motivo de preocupación de los usuarios. Los combustibles fósiles que se utilizan actualmente como fuente de energía, son recursos limitados y son productos importados, razones que los convierten en productos con precios inciertos y por lo tanto, de gran importancia en la rentabilidad de estos sistemas (Huacuz, 2004). El cálculo del consumo energético por temporada es imprescindible para el diseño y selección de equipos de climatización en invernaderos. Existen modelos de simulación basados en principios termodinámicos, los cuales son resueltos numéricamente considerando ciertas condiciones iniciales de frontera y la arquitectura del edificación. Sin embargo su uso requiere de una serie de suposiciones las cuales no son muy aceptadas en aplicaciones prácticas, debido a las condiciones cambiantes e impredecibles del medio ambiente. En general el consumo de energía de un edificio depende de tres factores principales estos son, diseño arquitectónico, el material del cual está hecho y las condiciones climáticas de la región en la cual se encuentra situado. Los dos primeros factores son constantes, pero, las condiciones climáticas no, ya que estas varían a los largo del día, de estación en estación y de una región geográfica a otra. Por lo tanto el análisis energético juega un papel importante en el

desarrollo y diseño de sistemas de calefacción para edificaciones. A pesar de que existen varios métodos, los cuales varían en complejidad y exactitud, el método de grados-hora es uno de los más usados para el análisis de uso de energía en edificaciones. Este método asume que los requerimientos de energía para la climatización de edificios es proporcional a la diferencia de temperatura existente entre la temperatura base (ó de confort) y la temperatura promedio horaria.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo fue presentar una estimación del requerimiento energético para calefacción que incurren los invernaderos agrícolas en cuatro ciudades del estado de Chihuahua, para dos tipos de cultivos comunes en la región. Lo anterior basado en el método horas-grado

METODOLOGÍA

Método Grados-Hora

El método grados-hora es un índice cuantitativo diseñado para reflejar la demanda de energía para calentar o enfriar una edificación en base a la temperatura ambiente (Coskun, 2010). Este método establece que mientras más se aleje dicha temperatura de las condiciones de confort, mayor es la necesidad de climatización de un espacio, ya sea tanto para enfriamiento en climas cálidos o calefacción en climas fríos.

Los grados-hora se calculan sumando simplemente las diferencias existentes entre la temperatura ambiente (T_i) y la temperatura de referencia (T_b), la cual es la temperatura que se desea mantener en el interior de la edificación. La sumatoria se extiende al periodo de tiempo que se desea analizar, y se toman los valores de la diferencia de temperaturas en intervalos de tiempo fijos, usualmente cada hora. En la figura 1 se muestra el concepto de horas-grado en forma gráfica. El método asume que la temperatura ambiente puede considerarse como una constante durante intervalos de tiempo de una hora, y por ello la cantidad de calor que fluye a través de la envolvente del edificio durante esa hora es:

$$Q = U * A * (T_b - T_i) = U * A * \Delta T \quad (1)$$

En la ecuación anterior, el coeficiente global de transferencia de calor (U) y el área de la envolvente del edificio (A), son constantes, por lo cual la sumatoria de las diferencias de temperatura, tomadas cada hora, al multiplicarse por U y A corresponde a la cantidad de calor que fluyó durante el periodo de tiempo considerado. Para evitar que ganancias de calor se cancelen con pérdidas de calor, se requiere considerarlas por separado, esto es, sumar solo diferencias positivas o negativas, lo que equivale a considerar por separado las cargas de calefacción de las de enfriamiento.

De manera formal, las horas-grado (HDH por sus siglas en ingles) se definen como:

$$HDH = \sum_{i=1}^n (T_b - T_i) \quad (2)$$

Ésta ecuación solo es válida en el caso de calefacción, para toda $T_i < T_b$. Dado que las cargas de enfriamiento, durante el verano, incluyen las ganancias de calor por irradiación solar, éste método no es muy adecuado para su estimación, ya que el modelo se basa en flujos de calor convectivos. Sin embargo, para el caso de requerimientos de calefacción, el efecto solar no interviene, y el método permite una estimación simple y suficientemente aproximada de la energía perdida por el edificio por convección

hacia el medio ambiente, siempre y cuando se conozca el comportamiento de la temperatura exterior.

Aplicación a cultivos agrícolas

La temperatura base (T_b) se tomo de acuerdo al tipo de cultivo, promediando las temperaturas mínimas óptimas para cada uno proporcionadas por el IDAE (2008), como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de temperatura adecuados para cultivos hortícolas en invernadero.

Cultivo	Temperatura Óptima °C	Temperatura Base °C
Tomate	13-16	14.5
Pepino	18-20	19

Variación de la temperatura ambiente

Para la aplicación del método grados-hora se requiere conocer la variación horaria de la temperatura ambiente, exterior al edificio que se desea evaluar. Para ello se pueden utilizar registros de temperatura históricos, si existen, o bien se puede recurrir a modelos matemático – estadísticos, que puedan generar tal información a partir datos climáticos y geográficos disponibles de la región.

Generación de datos climáticos

En este trabajo se utilizó la capacidad de generar datos climáticos horarios del paquete de simulación TRNSYS, basado en datos climáticos históricos (experimentales), tales como la temperatura promedio mensual, irradiación solar, humedad relativa y altitud. La obtención de la información climática requerida por el modelo de TRNSYS se analiza en otro trabajo (Martín-Domínguez y Hernández-Álvarez, 2002), en el cual se presentan los datos de cuatro ciudades del estado de chihuahua. Con lo anterior fue posible estimar las necesidades energéticas de calefacción para invernaderos situados en las ciudades de Chihuahua, Cd. Juárez, Temósachic y Nuevo Casas Grandes, del estado de Chihuahua.

Energía necesaria para calefacción.

Una vez determinado los HDH para cada ciudad y cultivo, se obtuvo la energía necesaria por metro cuadrado de superficie expuesta, para mantener el invernadero dentro de la temperatura óptima requerida por el cultivo mediante de la ecuación (3).

$$Q_{cal}(year) = U * A * HDH \quad (3)$$

En donde:

$Q_{cal}(year)$ es la cantidad de energía requerida para mantener la temperatura deseada (T_b) en el interior del invernadero, por calefacción, durante un año. U es el coeficiente global de transferencia de calor del material de cubierta. A es el área de la envolvente del invernadero.

Para este trabajo se consideraron 3 tipos de materiales para la envolvente del invernadero, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Coeficiente global de transferencia de calor, para materiales utilizados en la envolvente de invernaderos agrícolas (IDAE, 2008).

Material	U (W / m ² °C)	Incremento %
Policarbonato	3.5	Referencia
Vidrio hortícola	6.7	+ 91
Polipropileno	11.20	+ 220

Costo de energía por unidad de superficie expuesta.

Para determinar el costo de la energía requerida para calefacción, por metro cuadrado de área superficial expuesta, se consideró la posibilidad de utilizar 3 diferentes tipos de combustibles comunes, utilizados para la calefacción de invernaderos. Los valores del poder calorífico neto de cada uno se obtuvieron de la CONAE, y se muestran en la Tabla 3, junto con el costo actual de adquisición.

Tabla 3.- Combustibles considerados.

Combustible	Poder Calorífico MJ / L	Costo \$ / L
Combustóleo	40.20	6.66
Diesel	34.97	8.48
Gas L.P	23.48	4.67

RESULTADOS

Se procedió a generar los datos horarios de temperatura ambiente, para las 24 horas de cada día de un año, para cada una de las ciudades consideradas. Esto se hizo utilizando el modelo de generador de clima de TRNSYS, alimentado con los datos climáticos promedio mensuales de cada ciudad, como se menciono en párrafos anteriores.

Se procedió a calcular las cantidades de calor perdidas anualmente, por unidad de área de la superficie de la envolvente del invernadero, resultantes de utilizar los tres tipos de materiales de construcción, y los costos resultantes de utilizar tres diferentes combustibles para suministrar la energía térmica requerida para mantener el invernadero a la temperatura base deseada, como se muestra a continuación.

Grados-hora anuales

Utilizando una hoja de cálculo electrónica, se procedió a obtener las diferencias entre las temperaturas base de cada cultivo y las temperaturas ambientales de cada ciudad (gradiente térmico), para cada hora del año. Se filtraron los resultados para eliminar las diferencias negativas ($T_i > T_b$) que corresponden a carga de enfriamiento, y se obtuvieron las sumatorias anuales. Esto puede apreciarse en las figuras 2 y 3, que muestran el comportamiento del gradiente térmico para los dos cultivos analizados, en dos periodos de cuatro días cada uno. Las sumas anuales de grados-hora, para cada cultivo y ciudad, se presentan en la figura 4, en donde se aprecia el efecto del clima local.

Requerimiento de energía

Al multiplicar los resultados mostrados en la figura 4 por los valores del coeficiente global de transferencia de calor de cada

material de construcción considerado, se obtienen los flujos de energía mostrados en la figura 5. El caso más favorable mostrado corresponde a un cultivo de tomate en Chihuahua, en un invernadero construido en policarbonato, que supone un requerimiento anual de calefacción de 50 kW·h/m², mientras que cultivar pepino en Temósachic, en un invernadero de polipropileno requiere 617 kW·h/m².

Tipo de cultivo

Como se observa de la Tabla 1, de los cultivos considerados para este trabajo, el pepino requiere una temperatura base superior en 5.5°C a la del tomate para su óptimo desarrollo. Esta es pequeña diferencia de temperatura, sin embargo, aproximadamente duplica el requerimiento de energía para calefacción del pepino, en comparación con el del tomate, lo cual puede observarse en las figuras 4 y 5, para todas las ciudades consideradas.

Una razón para explicar lo anterior, se puede inferir de las figuras 2 y 3, en donde se puede observar que si bien las temperaturas base de ambos cultivos difieren siempre en solo 5.5°C, los gradientes térmicos de calefacción varían continuamente debido al comportamiento de la temperatura ambiente, y en el caso del tomate puede llegar a hacerse cero durante periodos de tiempo en que el gradiente térmico requerido por el pepino aún tiene valores positivos. Este efecto, contabilizado a lo largo de un año de operación se refleja en un requerimiento de aproximadamente el doble de energía para el pepino.

Localización geográfica del invernadero

El efecto de las condiciones climáticas locales se puede observar en la figura 4 y en la Tabla 4, donde se muestra que las condiciones climáticas de la ciudad de Chihuahua son las más favorables de las 4 ciudades consideradas, para ambos cultivos, mientras que Temósachic, situada en la Sierra Tarahumara, presenta las condiciones más desfavorables para la operación de invernaderos agrícolas. Es de notarse que el incremento de energía requerida entre diferentes ciudades, varía para los cultivos considerados, como puede verse en la Tabla 4. El incremento en grados-hora anuales, entre las ciudades de Chihuahua y Temósachic para el caso del tomate, es de 118%, mientras que para el caso del pepino es de solo 83%.

Tabla 4.- Sumatorias de grados-hora acumulados por año.

	Tomate		Pepino	
	Grados-hora	%	Grados-hora	%
Chihuahua	14,268	Referencia	30,066	Referencia
Cd. Juárez	21,009	+ 47	38,611	+ 28
Nuevo Casas Grandes	23,342	+ 63	42,849	+ 42
Temósachic	31,105	+ 118	55,055	+ 83

Tipo de material de la envolvente

El efecto del material de construcción de la envolvente del invernadero se puede apreciar en las figuras 6 y 7, en donde se observa que las diferencias en los costos incurridos corresponden directamente a las diferencias en el valor del coeficiente global de transferencia de calor de cada material, como se presenta en la Tabla 2. Si se toma como referencia el costo de calefacción incurrido utilizando policarbonato, utilizar vidrio hortícola supone

un aumento del 91% en el costo, y utilizar película de polipropileno incrementa el costo en 220%, para un mismo cultivo y ciudad.

Combustible utilizado

Los costos de operación de un mismo invernadero, para un mismo cultivo, se ven fuertemente afectados por el tipo de combustible que se utilice. En la tabla 5 se puede observar que el utilizar Diesel supone un incremento del 46% ó utilizar gas L.P. un 20% en el costo, respecto al combustóleo.

Tabla 5.- Costo por unidad de energía.

Combustible	Costo	Incremento en Costo
	\$/ (kW-h)	%
Combustóleo	0.596	Referencia
Gas L.P.	0.716	+ 20
Diesel	0.873	+ 46

En las figuras 6 y 7 se muestra el costo, por unidad de área de superficie expuesta de invernadero, requerido para mantener los cultivos analizados en las temperaturas base, para las ciudades consideradas. Para cada caso, el incremento en costo debido al combustible es el mismo que se presenta en la Tabla 5.

CONCLUSIONES

De los parámetros analizados en éste trabajo se puede concluir que la selección del material de construcción de la envolvente del invernadero tiene el mayor impacto en el costo de calefacción. El incremento de costo entre utilizar policarbonato y polipropileno es de 220%.

El segundo parámetro más importante resultó ser la elección del sitio. Entre las ciudades incluidas en éste estudio, seleccionar Temósachic incrementa el requerimiento de calefacción, con respecto a Chihuahua, en un 83% si se cultiva pepino, y hasta un 118% si se cultiva tomate. (No olvidar que el cultivo de pepino requiere el doble de energía que el del tomate, por ello los porcentajes de cambio entre ciudades resultan menores para el pepino).

La elección del combustible tiene el menor efecto en el costo, comparado con los dos otros parámetros analizados, sin embargo aún así es de considerarse. Utilizar Diesel resulta ser 46% más caro que utilizar combustóleo, a los precios actuales.

El efecto combinado de los factores aquí analizados se aprecia si se considera que el caso más favorable: tomate, Chihuahua, policarbonato y combustóleo, resulta en un costo de 30 \$ / m² año, mientras que el caso más desfavorable: pepino, Temósachic, polipropileno y Diesel, resulta en un costo de 538 \$ / m² año.

Conjuntando los resultados aquí presentados con datos sobre el valor de mercado de los cultivos analizados, productividad esperada por unidad de área, costos de construcción y de transporte, se puede determinar la rentabilidad de cada caso y con ello ayudar a la toma de decisiones de inversión.

REFERENCIAS

Bartazanas, T.; Tchamitchian, M. y Kittas, C. (2005). Influence of heating method on greenhouses microclimate and energy consumption. Biosystems Engineering 91:487-499

Chinese, D.; Meneghetti, A. y Nardin, G. (2005). Waste to energy based greenhouse heating: exploring viability conditions trough optimization models. Renewable Energy 30:1573-1586

Huacuz, J.M. (2005). The road to green power in Mexico - reflections on the prospects for the large scale and sustainable implementation of renewable energy. Energy Policy 33:2087-2099

Instituto para diversificación y ahorro de energía (IDAE) (2008). Ahorro y eficiencia energética en invernaderos.

Martín-Domínguez, I.R. y Hernández-Álvarez, R. (2002). Datos climáticos de cuatro ciudades del estado de Chihuahua, para la simulación de uso de energía en edificaciones utilizando el paquete TRNSYS. Artículo ERE 01-49. Memorias de la 26 Semana Nacional de Energía Solar. ANES:181-185. Noviembre 11-15. Chetumal, Q.R. México.

Meijaard, I.D. (1989). The economic evaluation of energy reduction and substitution techniques. Acta Horticulturae. 245:520-529

Sethi, V.P. (2009). On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation. Solar Energy 83:21-38.

Coskun, C. (2010). A novel approach to degree-hour calculation: Indoor and outdoor reference temperature based degree-hour calculation Energy 35:2455-2460

Teitel, M.; Barak, M. y Antler, A. (2009). Effect of cyclic heating and thermal screen on nocturnal heat loss and microclimate of a greenhouse. Biosystems Engineering 102:162-170

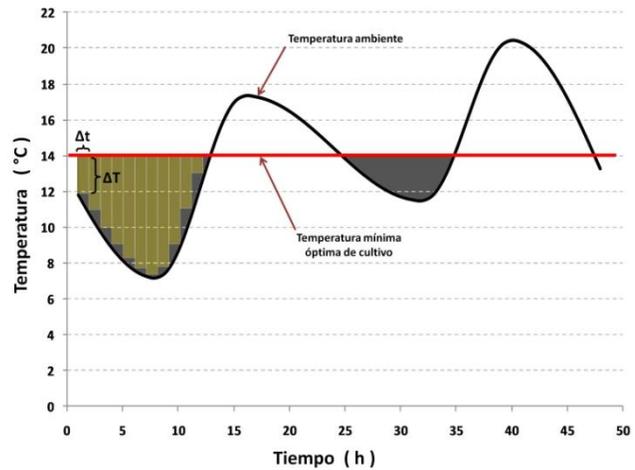


Figura 1 Cálculo de grados-hora acumulados

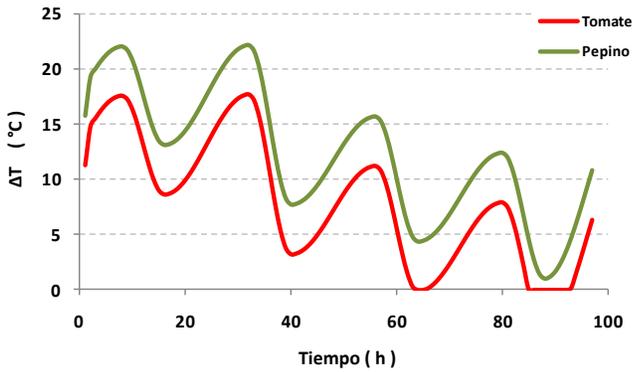


Figura 2 Gradiente térmico 1 – 4 Enero

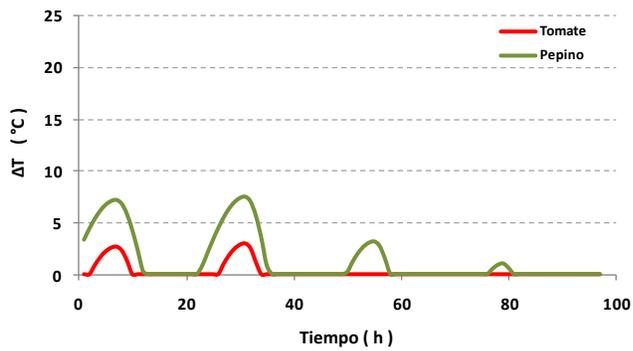


Figura 3 Gradiente térmico 1 – 4 Mayo

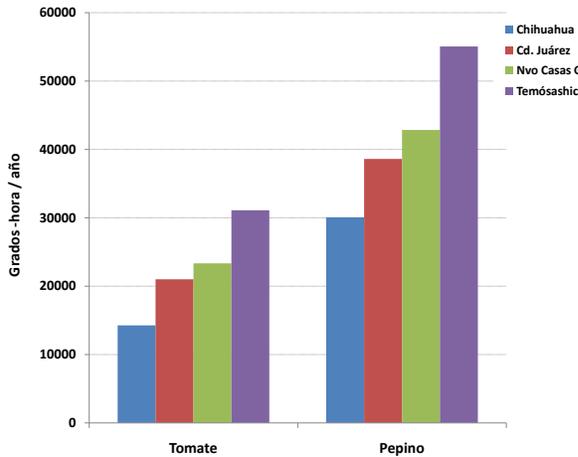


Figura 4 Comparación de grados hora acumulados anualmente para los dos cultivos en cuatro ciudades del estado

Requerimiento de energía

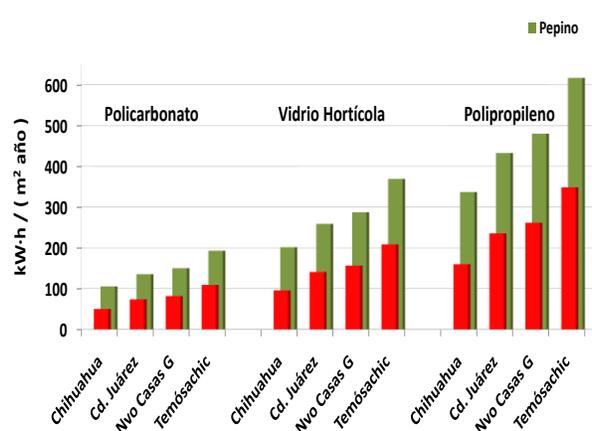


Figura 5 Requerimiento de energía demandada por cultivo para tres materiales de evolvente en las cuatro ciudades del estado

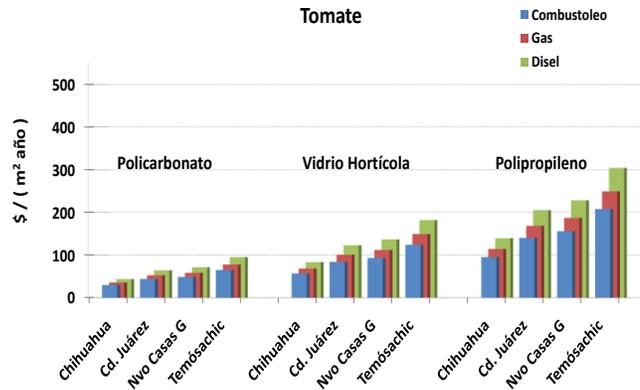


Figura 6 Costos asociados al insumo energético para la operación de invernaderos de tomate en cuatro ciudades del estado

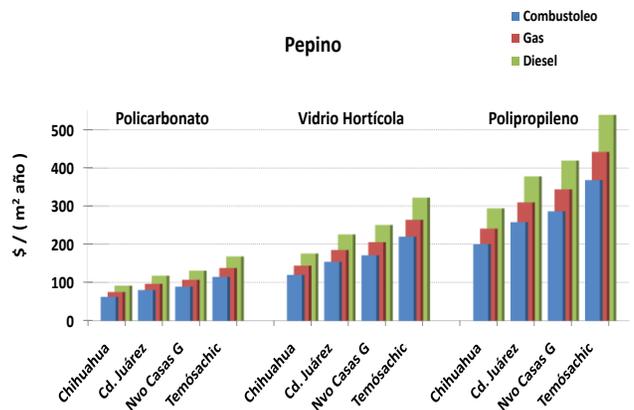


Figura 7 Costos asociados al insumo energético para la operación de invernaderos de pepino en cuatro ciudades del estado



XXXIV Semana Nacional de Energía Solar



Guanajuato 2010
Económico Independencia

Por la Independencia y Revolución Energéticas de México

La Asociación Nacional de Energía Solar, AC, y la Universidad de Guanajuato, organizan la XXXIV Semana Nacional de Energía Solar a celebrarse del 4 al 9 de Octubre de 2010 en la Ciudad de Guanajuato, Gto.

- Conferencias Magistrales
- Cursos de Actualización
- Sesiones Técnicas
- Foro Industrial
- Premio al Emprendedor Solar
- Concurso de Embarcaciones Solares
- Concurso de Pintura Infantil



Informes e Inscripciones:
<http://www.anes.org>

Guanajuato es México, México eres tu... ¡Celebra!

