

Calentamiento de Invernaderos con Energía Geotérmica en el Páramo Ecuatoriano

Campuzano M.*; Portilla A.**; Lowe C.N.***

*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador
e-mail: maria.campuzano@epn.edu.ec

**Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador
e-mail: angel.portilla@epn.edu.ec

***University of Central Lancashire, The Grenfell-Baines School of Architecture, Construction and Environment, Preston, United Kingdom
e-mail: cnlowe@uclan.ac.uk

Resumen: El presente estudio tiene como objetivo determinar la factibilidad de emplear energía geotérmica para cultivar productos en invernaderos de pequeña escala contribuyendo a la seguridad alimentaria, reducción de pobreza y conservación del páramo. Como parte de la metodología, se desarrolla un modelo matemático para diseñar el invernadero que cuenta con un intercambiador de calor de tubería sin aletas. Se escoge al tomate riñón como caso de estudio para determinar la factibilidad financiera. La energía geotérmica es considerada que proviene de manantiales que fluyen naturalmente o del flujo excedente de aplicaciones actuales o futuras como balnearios, centrales eléctricas, entre otras. El tamaño del intercambiador de calor es determinado del balance de energía del invernadero considerando pérdidas por la cubierta, paredes e infiltración de aire. Adicionalmente, se dimensiona la estructura del invernadero y el sistema de irrigación-fertilización. Después de calcular los indicadores financieros para diferentes escenarios, este estudio concluye que es técnicamente y financieramente factible producir tomates de invernadero utilizando un intercambiador de calor de PVC.

Palabras clave: Energía geotérmica, calentamiento de invernaderos, intercambiador de calor, páramo, tomates, factibilidad

Abstract: This study establishes the feasibility of using geothermal energy to heat small scale greenhouses to improve food security, poverty reduction and páramo conservation. As part of the methodology, a mathematical model is established to design the greenhouse which has a heat exchanger made of pipe without fins. Tomatoes are chosen as a case study crop and geothermal energy considered to come from naturally occurring hot springs or surplus from existing or future applications such as pools and power plants. The heat exchanger's power is determined from an energy balance for the greenhouse considering cover losses and air infiltration. The greenhouse structure and irrigation-fertilization system are sized so the financial feasibility could be determined. After calculating the financial indicators for different scenarios, this study concludes that is technically and financially feasible to produce greenhouse tomatoes using a heat exchanger made of PVC.

Keywords: Geothermal energy, greenhouse heating, heat exchanger, páramo, tomatoes, feasibility

1. INTRODUCCIÓN

El páramo actúa como una esponja capturando y filtrando el agua para distribuirla tierras abajo y está siendo erosionado por actividades incontroladas que ponen en peligro a las fuentes de agua [13]. Se estima que el 80% de la población del páramo ecuatoriano vive bajo la línea de la pobreza y 51% de los niños sufren de desnutrición crónica [14]. Contrario con el pensamiento de que el desarrollo es opuesto a la conservación del ecosistema, el proyecto Páramo Andino

(Conservación de la Diversidad en los Páramos de los Andes del Norte y Centrales) ha implementado cultivos orgánicos que han contribuido con el mejoramiento del bienestar de la población, seguridad alimentaria y seguridad del agua [6]. Sin embargo, es necesario desarrollar tecnologías locales para mejorar las actividades agrícolas que se practican en el frágil páramo ecuatoriano.

Comercialmente alrededor del mundo, varios productos como vegetales, frutas, flores, semillas de árboles y cactus crecen

en invernaderos que son calentados con energía geotérmica [11]. En el Ecuador, el calentamiento de invernaderos ha sido estudiado principalmente para la industria florícola [5], [19]. El país tiene un gran potencial geotérmico que se encuentra subutilizado debido a que sus aplicaciones actuales se han limitado a balnearios que representa un uso de 102,401 TJ/año [1]. Los trabajos previos se han enfocado principalmente en aplicaciones de alta temperatura y estimación del potencial geotérmico (e.j. [17], [3]). Sin embargo, es importante estudiar aplicaciones geotérmicas de baja temperatura (diferentes a balnearios) que puedan ser implementadas a pequeña escala para potenciar el desarrollo geotérmico en el Ecuador.

Este trabajo investiga la factibilidad de cultivar en zonas frías altas productos que normalmente no podrían crecer mediante el uso de invernaderos calentados con energía geotérmica, en el contexto de agricultura familiar y seguridad alimentaria, reduciendo el deterioro de este ecosistema, incrementando la producción de alimentos y el ingreso familiar.

2. METODOLOGÍA

La factibilidad de utilizar energía geotérmica para calentar invernaderos de pequeña escala en comunidades del páramo ecuatoriano se determinó usando métodos cualitativos y cuantitativos, así como información primaria y secundaria disponible. Productos con similares requerimientos de temperatura pueden ser cultivados en el mismo invernadero, sin embargo, este estudio se basa en el cultivo de un solo producto para determinar la factibilidad financiera.

Las condiciones del interior del invernadero están dadas por la temperatura mínima que requiere el cultivo durante la noche [7]. Los valores de velocidad del viento y temperatura exterior fueron determinados a una altitud promedio representativa del páramo. La temperatura y flujo promedios del agua termal se calculó de un grupo de datos experimentales de fuentes geotérmicas que pueden ser empleadas en esta aplicación [17]. En su trabajo, [17] determinó un error del 4.16% en las mediciones de caudal y un error del 5% en las de temperatura.

Teniendo en cuenta que el elemento más importante en el diseño del invernadero es el sistema de calentamiento [16], se desarrolla un modelo matemático empleando trabajos previos y ecuaciones de transferencia de calor [16], [9]. Para determinar la longitud de la tubería del intercambiador de calor, se calculan el calor necesario para mantener el invernadero a una temperatura constante (permite el crecimiento óptimo de las plantas) y el flujo de agua termal requerido.

Las especificaciones del invernadero y del intercambiador de calor que permitan maximizar el número de plantas que pueden ser cultivadas en condiciones óptimas fueron determinadas en base a un proceso iterativo utilizando el

modelo matemático desarrollado en el numeral 3. Para este proceso se considera lo siguiente: las dimensiones del invernadero deben estar de acuerdo a las especificaciones comerciales, el flujo de agua termal no debe exceder al máximo disponible y el área de cultivo debe cumplir los objetivos de conservación del páramo y debe permitir la ejecución normal de las actividades agrícolas.

El material del intercambiador de calor fue seleccionado teniendo en cuenta los materiales adecuados para el uso de la geotermia que existen en el mercado ecuatoriano y la temperatura de trabajo. Adicionalmente, para establecer la factibilidad técnica y financiera se determinaron las características constructivas del invernadero, los elementos del sistema de irrigación-fertilización y la distribución de las plantas. Una vez que las especificaciones más óptimas fueron determinadas en base al PVC, el sistema fue modelado con un intercambiador de un material de más alta conductividad térmica (hierro negro que es sustancialmente más caro que el PVC) para comparar las factibilidades financieras de los dos materiales.

Para realizar un cálculo aproximado de la cantidad de dióxido de carbono equivalente que es evitado cuando la energía geotérmica reemplaza el uso de combustibles fósiles en el calentamiento del invernadero se emplea un factor de emisión estándar para un régimen de operación establecido.

El cálculo de la inversión inicial, los ingresos y los costos de operación se determinaron utilizando precios unitarios publicados por la Cámara de la Industria de la Construcción de Quito y cotizaciones solicitadas para este trabajo. Los ingresos y egresos fueron determinados en base a la inflación anual considerando que esta se mantiene constante en la vida útil del proyecto. Se calcularon el flujo de caja, el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR), la relación costo beneficio (C/B) y el período de retorno para el escenario base y los distintos escenarios del análisis de sensibilidad variando los parámetros más críticos como el precio del tomate y su rendimiento anual.

Debido a que esta aplicación usa un flujo de agua existente y no realiza perforaciones para tomar el agua del acuífero, en este trabajo no se estudió los efectos de reinyectar el agua termal luego de pasar por el intercambiador de calor al considerarlos mínimos.

3. MODELO MATEMÁTICO

Para asegurar una temperatura de crecimiento óptima, el sistema de calentamiento del invernadero es diseñado para las condiciones pico (nocturnas) debido a que en el páramo, la variación diaria de temperatura puede ser comparada como verano durante el día e invierno durante la noche [13]. El modelo matemático fue realizado para el estado estable tomando en cuenta que la temperatura de operación del invernadero será mantenida con la ayuda de un sistema de control y las condiciones de temperatura ambiente, flujo y

temperatura de agua termal son valores promedios. La Fig. 1 muestra el esquema de calentamiento del invernadero y las pérdidas de calor.

Debido a la baja conductividad térmica del suelo se desprecian las pérdidas de calor por el piso. El diseño y dimensionamiento se lo realiza considerando el régimen de operación más crítico el cual sucede en las horas de la noche cuando no hay radiación solar. Por lo tanto, las pérdidas de calor del invernadero (q_g) cuando este se mantiene a una temperatura constante (T_g) se expresan como la suma de las pérdidas de calor por la cubierta y paredes (q_c) y la infiltración de aire (q_v) de acuerdo a la ecuación 1 [16]:

$$q_g = q_c + q_v \quad (1)$$

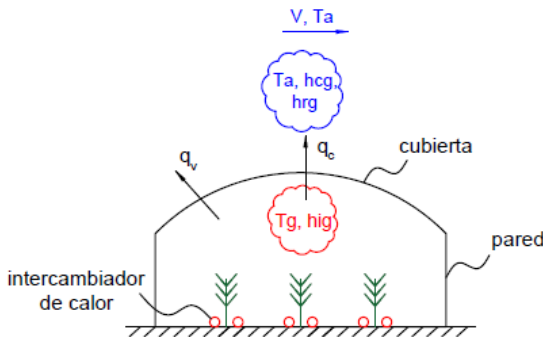


Figura 1. Esquema de las Pérdidas de Calor del Invernadero

Las pérdidas de calor por el área de la cubierta y las paredes (A_g) pueden ser calculadas con la siguiente ecuación (Fig. 2):

$$q_c = U_{gr} A_g (T_g - T_a) \quad (2)$$

donde

T_g = temperatura del aire interior del invernadero requerida por el cultivo

T_a = temperatura ambiente exterior

U_{gr} = coeficiente global de transferencia de calor entre el interior y el exterior del invernadero

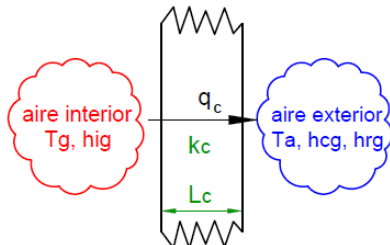


Figura 2. Intercambio de Calor entre el Interior y el Exterior del Invernadero a través de la Cubierta y Paredes

El coeficiente global de transferencia de calor (U_{gr}) se calcula en base a la ecuación 3:

$$U_{gr} = \frac{1}{\frac{1}{h_{ig}} + \frac{L_c}{k_c} + \frac{1}{h_{cg} + h_{rg}}} \quad (3)$$

donde

h_{ig} = coeficiente de transferencia de calor por convección para el aire interior del invernadero = 5.7 (W/m²K) [10]

L_c = espesor del material de la cubierta y paredes = 1.8x10⁻⁴ (m), para polietileno de baja densidad [7]

k_c = conductividad térmica del material de la cubierta y paredes (polietileno de baja densidad) = 0.45 (W/m²K) [7]

h_{cg} = coeficiente de transferencia de calor por convección para el aire exterior del invernadero

h_{rg} = coeficiente de transferencia de calor por radiación de la superficie exterior del invernadero y los alrededores

El coeficiente de transferencia de calor h_{cg} puede ser calculado considerando convección forzada sobre una placa plana empleado la ecuación 4, la cual es ampliamente utilizada para el dimensionamiento de sistemas solares sin mayores restricciones [4]:

$$h_{cg} = 2.8 + 3V \quad (4)$$

donde

V = velocidad del viento promedio (m/s)

Para el cálculo del coeficiente h_{rg} durante la noche se asume que la temperatura de la cubierta y paredes del invernadero es igual a la temperatura del aire interior (cálculo conservador) el mismo que se determina con la ecuación 5 [9]:

$$h_{rg} = 4\sigma \epsilon \left(\frac{T_g + T_a}{2} \right)^3 \quad (5)$$

donde

σ = constante de Stefan Boltzmann

ϵ = emisividad del material de la cubierta y paredes (polietileno) = 0.1 [15]

Las pérdidas por infiltraciones (q_v) son calculadas con la ecuación 6 [10]:

$$q_v = \rho_a C_a V_g ACH (T_g - T_a) \quad (6)$$

donde

ρ_a = densidad del aire (evaluada a T_a)

C_a = calor específico del aire (evaluado a T_a)

V_g = volumen del invernadero, calculado de acuerdo a su geometría

ACH = número de intercambios de aire por hora = 0.5 [12]

El flujo de agua termal (\dot{m}_w) requerido para el calentamiento del invernadero se determina considerando que las pérdidas de calor del invernadero (q_g) son iguales al calor entregado por el agua termal. Para estado estable en un líquido incompresible, el flujo de agua termal puede ser expresado con la ecuación 7 [9]:

$$\dot{m}_w = \frac{q_g}{c_w(T_{wi} - T_{wo})} \quad (7)$$

donde

C_w = calor específico del agua termal (a la temperatura promedio del ingreso y salida del intercambiador de calor)

T_{wi} = temperatura del agua termal (al ingreso del intercambiador de calor)

T_{wo} = temperatura del agua termal (a la salida del intercambiador de calor)

El balance energético para un intercambiador de calor de tubería sin aletas, donde el aire a temperatura constante (T_g) está alrededor del tubo por donde fluye el agua termal (Fig. 3), permite determinar la longitud de la tubería (L) con la siguiente fórmula [9]:

$$L = \frac{q_g}{\pi D \Delta T_{lm} U} \quad (8)$$

donde

U = coeficiente global de transferencia de calor del intercambiador de calor entre el agua termal y el aire interior del invernadero

D = diámetro nominal de la tubería

ΔT_{lm} = diferencia media logarítmica de temperaturas

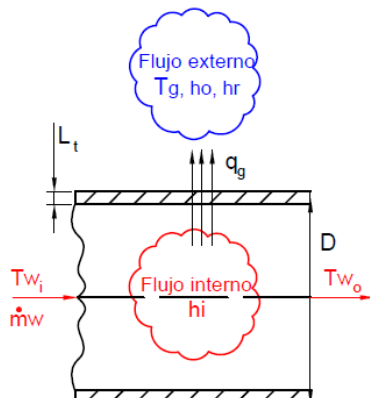


Figura 3. Transferencia de Calor desde el Intercambiador de Calor

La diferencia media logarítmica de temperaturas es calculada con ayuda de la Fig. 4 y con la ecuación 9:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_o - \Delta T_i}{\ln\left(\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i}\right)} \quad (9)$$

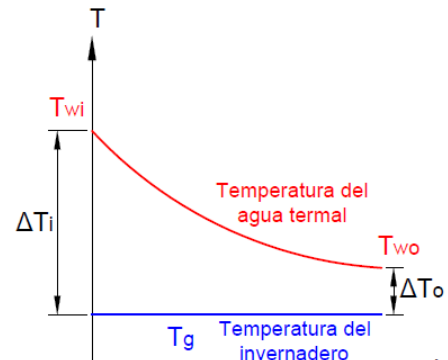


Figura 4. Distribución de Temperatura a lo largo del Intercambiador de Calor

El coeficiente global (U) puede ser calculado con la siguiente relación:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{L_t}{k_t} + \frac{1}{h_o + h_r}} \quad (10)$$

donde

h_i = coeficiente de convección para flujo interno

L_t = espesor de la tubería

k_t = conductividad térmica de la tubería

h_o = coeficiente de convección para flujo externo

h_r = coeficiente de radiación desde la tubería

Considerando flujo interno turbulento totalmente desarrollado dentro de la tubería, el coeficiente de convección (h_i) se determina con la siguiente expresión [9]:

$$h_i = \frac{0.0395 Re^{3/4} Pr^{1/3} \times k_i}{D} \quad (11)$$

donde

Re = número de Reynolds

Pr = número de Prandtl

k_i = conductividad térmica del agua termal

D = diámetro nominal de la tubería

Las propiedades del agua termal son evaluadas a la temperatura promedio de ingreso y de salida al intercambiador de calor.

Considerando convección natural sobre un cilindro horizontal y un número de Rayleigh (Ra) menor a 10^{12} , el coeficiente h_o se calcula con la siguiente ecuación [9]:

$$h_o = \frac{k_o}{D} \left\{ 0.60 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr_o} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (12)$$

donde

k_o = conductividad térmica del aire

D = diámetro nominal de la tubería

Pr_o = número de Prandtl

Las propiedades son evaluadas a la temperatura media entre la superficie del tubo y del invernadero.

El coeficiente h_r es calculado con la siguiente ecuación:

$$h_r = 4\sigma \epsilon_t \left(\frac{T_g + \left(\frac{T_{wi} + T_{wo}}{2} \right)}{2} \right)^3 \quad (13)$$

donde

ϵ_t = emisividad de la superficie de la tubería

La cantidad de dióxido de carbono equivalente que será evitada (C_f) cuando la energía geotérmica reemplaza el consumo de diésel se puede determinar mediante la siguiente relación:

$$C_f = EF \times m_f \quad (14)$$

donde

EF = factor de emisión para el diésel = 2.6008 kgCO₂e/l [2]

m_f = cantidad de diésel consumida anualmente

El diésel consumido anualmente (m_f) para calentar el invernadero puede ser calculado mediante la siguiente expresión (basado en IDAE, 2008):

$$m_f = \frac{q_g}{CV \times \eta_b} \times t \quad (15)$$

donde

q_g = pérdidas de calor del invernadero

t = tiempo que el quemador está prendido por año

CV = valor calorífico bruto = 11 kWh/l [2]

η_b = eficiencia del quemador

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Posterior al modelo matemático, para la simulación del comportamiento del invernadero se consideraron los parámetros que se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros Principales empleados en la Simulación del Modelo Matemático

Parámetro	Valor	Referencia
Condiciones Exteriores del Invernadero		
Temperatura	5.5 °C	[8]
Velocidad del Viento (V)	1.2 m/s	[8]
Condiciones Interiores del Invernadero		
Temperatura	14.5 °C	[7]
Características del Agua Termal		
Temperatura	61.1 °C	[17]*
Flujo Disponible	10 kg/s	[17]*

*Valores promedios de los datos que pueden ser empleados en esta aplicación

Para el análisis de resultados se considera la relación que tienen el diámetro y la longitud de la tubería (Fig. 5), así como la relación entre flujo másico y la longitud de la tubería (Fig. 6) cuando se mantienen el resto de parámetros constantes.

En la Fig. 5 se aprecia que diámetros pequeños requieren longitudes grandes que demandan la instalación del tubo en varias vueltas en el invernadero, lo que complica su construcción, operación y mantenimiento a diferencia de que diámetros grandes requieren longitudes menores que permiten instalar el intercambiador en una sola vuelta para facilitar las actividades de cultivo dentro del invernadero.

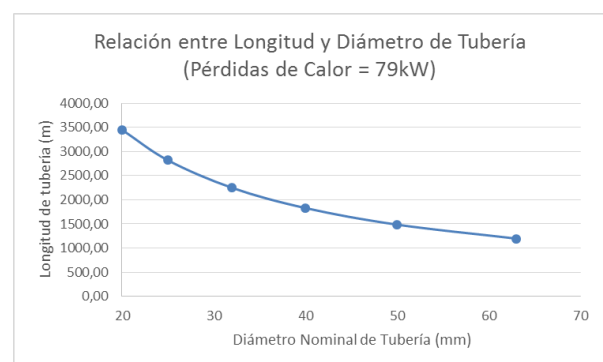


Figura 5. Relación entre Longitud y Diámetro de la Tubería, (cuando el resto de parámetros se mantienen constantes)

De la Fig. 6, para una misma área de cultivo se aprecia que flujos másicos pequeños demandan longitudes grandes de tubería, lo que en cierta medida volvería no factible al proyecto al necesitar un intercambiador de calor más grande

que tiene un mayor costo y ocupa mayor espacio en el invernadero.

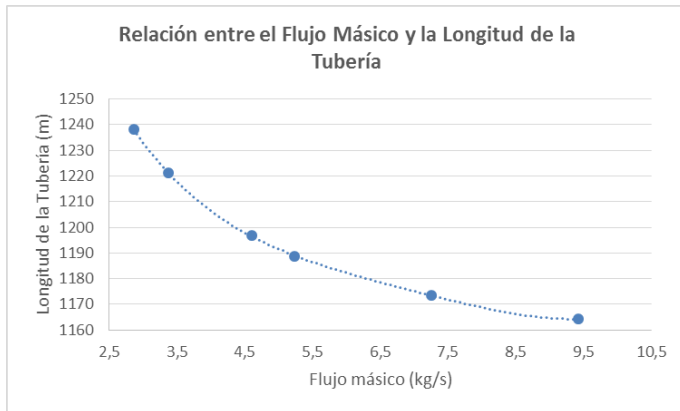


Figura 6. Relación entre Flujo Másico de Agua Termal y Longitud de la Tubería

La tabla 2 presenta la configuración más óptima obtenida luego de realizar las diferentes iteraciones. Los resultados del modelo matemático demuestran que es técnicamente factible producir tomates de invernadero en el páramo ecuatoriano al mantener el invernadero a la temperatura de 14.5 °C.

Tabla 2. Configuración Final del Invernadero y el Intercambiador de Calor

Parámetro	Valor
Intercambiador de Calor	
Diámetro nominal de la tubería (D)	63 mm
Longitud de la tubería (L)	1202 m*
Flujo másico del agua termal (\dot{m}_w)	4.6 kg/s o l/s
Diferencia de temperaturas del agua termal al ingreso y salida del intercambiador de calor ($T_{wi} - T_{wo}$)	41 °C
Pérdidas de calor del invernadero (q_g)	78.96 kW
Coefficiente global de transferencia de calor (U)	7.49 W/m ² K
Invernadero (área de cultivo de 720 m²)	
Número de naves (n)	4
Altura principal (H)	4m
Altura secundaria (h)	3m
Ancho de la nave (W)	6m
Largo (l)	32m
Número de plantas a cultivar	1,957
Rendimiento del tomate (kg/año)	33,269

*La longitud real del intercambiador es mayor a la calculada debido a las necesidades de instalación del mismo dentro del invernadero y hacia la fuente

La Fig. 7 muestra el esquema del invernadero en estudio.

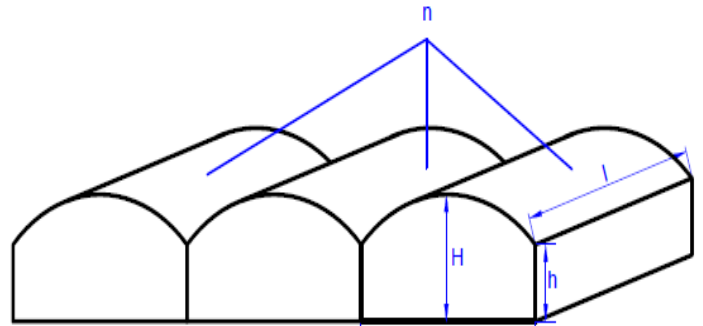


Figura 7. Esquema de las Dimensiones del Invernadero

El área de cultivo empleada en este estudio (0.0720 hectáreas¹) cumple el concepto de agricultura familiar y no desplaza a otro cultivo debido a que únicamente representa el 2.06% del área promedio (3.48 hectáreas) cultivada por familia en el Ecuador [18]. A pesar de que la conservación del páramo busca emplear áreas reducidas para el cultivo, un proyecto debe ajustarse a diferentes superficies, menores temperaturas y/o caudales del agua termal dentro de los límites del ecosistema. El proyecto al emplear un intercambiador de calor que requiere un flujo de 4.6 l/s (cuando el máximo disponible es 10 l/s), permitiría que áreas superiores fueran cultivadas cuando se haya ganado experiencia. Otras áreas también podrían ser cultivadas desarrollando iniciativas en el sub-páramo (área entre el páramo y el bosque) con el fin de que las partes altas sean preservadas lo que requeriría intercambiadores de calor más pequeños al ser las temperaturas ambientales más altas en estas zonas.

Algunos autores (ej. [10]) desprecian las pérdidas de calor por radiación desde el invernadero (ecuación 5). En este trabajo si las pérdidas por radiación hubiesen sido despreciadas existiría un error del 1.24%. Realizando un análisis similar, se determinó que el coeficiente global de transferencia de calor no varía su valor cuando no se considera la conducción de la cubierta y paredes del invernadero. Consecuentemente, el modelo matemático puede ser simplificado despreciando la radiación desde el invernadero y la conducción de la cubierta y paredes sin incurrir en un error considerable. Cuando se analizó el caso de despreciar la conductividad térmica de la pared del tubo del intercambiador de calor, se determinó que esto generaría un error del 29.56% en el cálculo de la longitud del intercambiador de calor.

La cantidad de dióxido de carbono equivalente que sería evitada si la energía geotérmica reemplaza al diésel es relativamente pequeña para esta aplicación (19.15 tCO₂e; tabla 3), consecuentemente, no sería factible aplicar al mecanismo de desarrollo limpio.

¹ 1 hectare = 10,000 square metres

Tabla 3. Análisis del Escenario donde Diésel es Reemplazado por Geotermia

Consumo de Diésel (litro/año)	13,804.14
Dióxido de Carbono Evitado (tCO₂e/año)	35.90

En base a los resultados de los cálculos financieros de este estudio (tabla 4), este proyecto es financieramente factible debido a que el valor actual neto (115,143.67 USD) es positivo, la tasa interna de retorno (43.01%) es superior a la tasa de interés (4.78%), el período de retorno (3.18 años) es menor a la vida del proyecto (15 años) y la relación costo beneficio (7.01) es positiva, por lo tanto, se recomienda su implementación. Los escenarios de sensibilidad para mayor y menor rendimiento demuestran que el proyecto es muy rentable para altos rendimientos y poco rentable cuando el rendimiento disminuye sustancialmente como consecuencia de prácticas agrícolas deficientes. Un mayor precio de venta del tomate de invernadero hace más atractivo financieramente al proyecto mientras que precios menores reducen las ganancias (pero el proyecto aún permanece factible en el análisis).

Tabla 4. Escenario Base y de Sensibilidad para el Proyecto (variando los precios del tomate y su rendimiento anual de acuerdo al mercado)

	Escenario Base	Menor Precio	Mayor Precio
	0.6 USD/kg	0.36 USD/kg	0.92 USD/kg
Inversión Inicial	19,156.36		
Tasa de Interés	4.78%		
VAN	115,143.67	21,744.82	239,675.46
TIR	43.01%	12.80%	88.08%
Período de Retorno	3.16	7.79	1.21
C/B	7.01	2.14	13.51

	Escenario Base	Menor Rendimiento	Mayor Rendimiento
	8.5kg/plant	6 kg/planta	9.43 kg/plant
Inversión Inicial	19,156.36		
Tasa de Interés	4.78%		
VAN	115,143.67	46,468.04	140,691.00
TIR	43.01%	20.93%	51.66%
Período de Retorno	3.16	5.74	2.51
C/B	7.01	3.43	8.34

La decisión de emplear un intercambiador de calor de PVC fue validada por el análisis presentado en la tabla 5. Un intercambiador de calor hecho de hierro negro a pesar de ser más pequeño que uno de PVC es significativamente más caro convirtiendo al proyecto en inviable.

Tabla 5. Escenario donde el Intercambiador de Calor es hecho de Hierro Negro en vez de PVC

	Inversión Inicial(US D)	VAN(US D)	TIR(%)	Período de Retorno (años)
PVC	19,156.36	115,143.67	43.01	3.16
Hierro Negro	78,084.75	- 417.58	4.74	11.53

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTURO

Cultivar productos que normalmente no crecen en el páramo es factible técnicamente y financieramente en un invernadero calentado geotérmicamente cuando se emplea un intercambiador de calor de PVC. El área propuesta en estudio no desplazaría otros cultivos al representar únicamente el 2.06% del área promedio cultivado por familia en el Ecuador. A pesar de que el invernadero analizado en este estudio es para el cultivo de tomate, el mismo invernadero permite cultivar otros productos como la lechuga y el pimiento [7], ya que tienen temperaturas de crecimiento similares diversificando los cultivos en el páramo cuando se haya ganado experiencia en el cultivo asistido con geotermia. Fue importante realizar varias iteraciones para obtener los parámetros del invernadero ya que se permitió reducir la inversión inicial y los costos de operación con un funcionamiento óptimo del invernadero.

No se incurriría en un error considerable si el modelo matemático despreciara las pérdidas por conducción de la cubierta y por radiación del invernadero. Sin embargo, trabajos futuros podrían considerar un modelo matemático más complejo con cortinas térmicas internas lo que mejoraría la eficiencia del sistema y requiriendo el uso de software de simulación en base a elementos finitos. La factibilidad financiera pudiera ser calculada tomando en cuenta los beneficios sociales y ambientales (como la mejora en la seguridad alimentaria y conservación de fuentes de agua y biodiversidad) con el fin de volverlo más atractivo el proyecto a inversión pública o internacional.

REFERENCIAS

- [1] B. Beate y Rodney Salgado. "Geothermal country update for Ecuador, 2005–2010," en *Proceedings World Geothermal Congress*, Bali, Indonesia, 2010.
- [2] Carbon Trust, *Energy and Carbon Conversion Factors Fact Sheet*, Carbon Trust, Londres, Reino Unido, 2013.

- [3] W. J. Carrasco y W. F. Naula, "Caracterización y elaboración de un inventario de fuentes geotérmicas de baja entalpía en la provincia de Chimborazo y propuesta de creación de un centro de investigación de energía geotérmica en la ESPOCH," Tesis de Grado, Escuela de Física y Matemática, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2012.
- [4] J. A. Duffie y W. A., Beckman, W. *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3^{era} Edn., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, Estados Unidos de América, 2006.
- [5] M. Erazo y J. Sánchez, "Control y supervisión de variables en un sistema de antiheladas, riego y ventilación para optimizar los cultivos bajo invernadero," Tesis de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Electrónica e Instrumentación, Universidad de las Fuerzas Armadas, Latacunga, 2011.
- [6] S. Flores, U. Groten, S. Lugo y P. Mena. *Gente, Vida y Agua en los Cerros: Una sistematización del Proyecto Páramo Andino en el Ecuador*, Ecociencia, Quito, 2012.
- [7] IDAE, *Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos*, Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, Madrid, España, 2008.
- [8] INAMHI, *Anuario Meteorológico*, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, Quito, Ecuador, 2010.
- [9] F. Incropera, D. Dewitt, T. Bergman y A. Lavine, *Introduction to Heat Transfer*, 5^{ta} Edn., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, Estados Unidos de América, 2007.
- [10] M. Kıyan, E. Bingöl, M. Melikoğlu y A. Albostan A, "Modelling and simulation of a hybrid solar heating system for greenhouse applications using Matlab/Simulink," *Energy Conversion and Management*, vol. 72, no. 1, pp 147-155, Ag. 2013.
- [11] J. W. Lund, "Direct utilization of geothermal energy," *Energies*, vol. 3, no. 8, pp 1443-1471, Ag. 2010.
- [12] F. McQuiston, J. Parker y J. Spitzer. *Heating, Ventilating and Air Conditioning: Analysis and Design*. 6^{ta} Edn., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, Estados Unidos de América, 2005.
- [13] P. Mena y R. Hofstede, "Los páramos ecuatorianos," *Botánica Económica de los Andes Centrales*, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia. 2006, pp. 91-109.
- [14] MIP (Mecanismo de Información de Páramos) (2011, nov. 2). *Ecuador: Diagnósticos rápidos en territorios de páramo*. Recuperado de: <http://www.paramo.org/node/2586>, 12 de agosto de 2014.
- [15] Optotherm (2014). *Emissivity Table*. Recuperado de: <http://www.optotherm.com/emiss-table.htm>, 12 de julio de 2014.
- [16] C. Panagiotou, *Geothermal Greenhouse Design*, United Nations University, Geothermal Training Program, Iceland, Report 11, 1996.
- [17] B. F. Pilicita, "Estudio de fuentes termales, fallas geológica, descarga de calor en la caldera de Chacana y el aprovechamiento actual del recurso geotérmico," tesis de ingeniería, Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2013.
- [18] S. Salcedo, L. Guzmán, (ed.) *Agricultura Familiar en América Latina y el Caribe: Recomendaciones de Política*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Santiago, Chile, 2014.
- [19] R. Taipe y C. Acosta, "Diseño y construcción de un modelo de intercambiador de calor de celdas parabólicas con almacenamiento térmico, para calentamiento de un invernadero de 40m²," Tesis de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, 2006.