

# **Avances en optimización de colectores solares para secado de productos agrícolas**

**Carlos Armando De Castro  
Orlando Porras Rey**

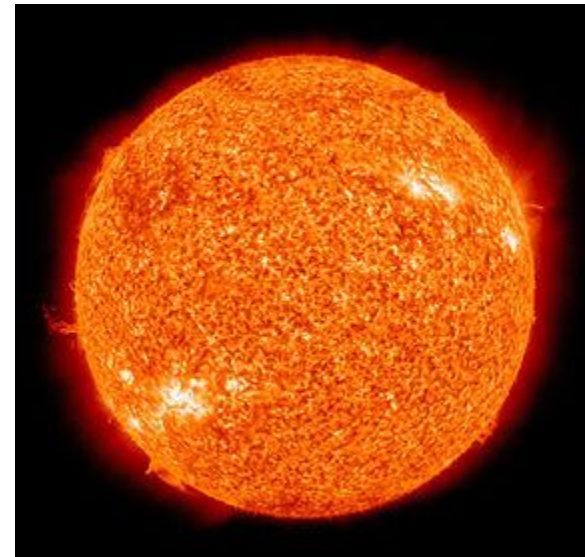
**Universidad de los Andes  
Departamento de Ingeniería Mecánica  
2012**

# Secado de productos agrícolas

- Evita el ataque de micro-organismos.
- Mejor calidad del producto.
- Mayores tiempos de almacenamiento.
- Más facilidad en el transporte.

# ¿Por qué solar?

- Energía gratuita.
- Limpia.
- Disponible en todo el territorio nacional (y el mundo).



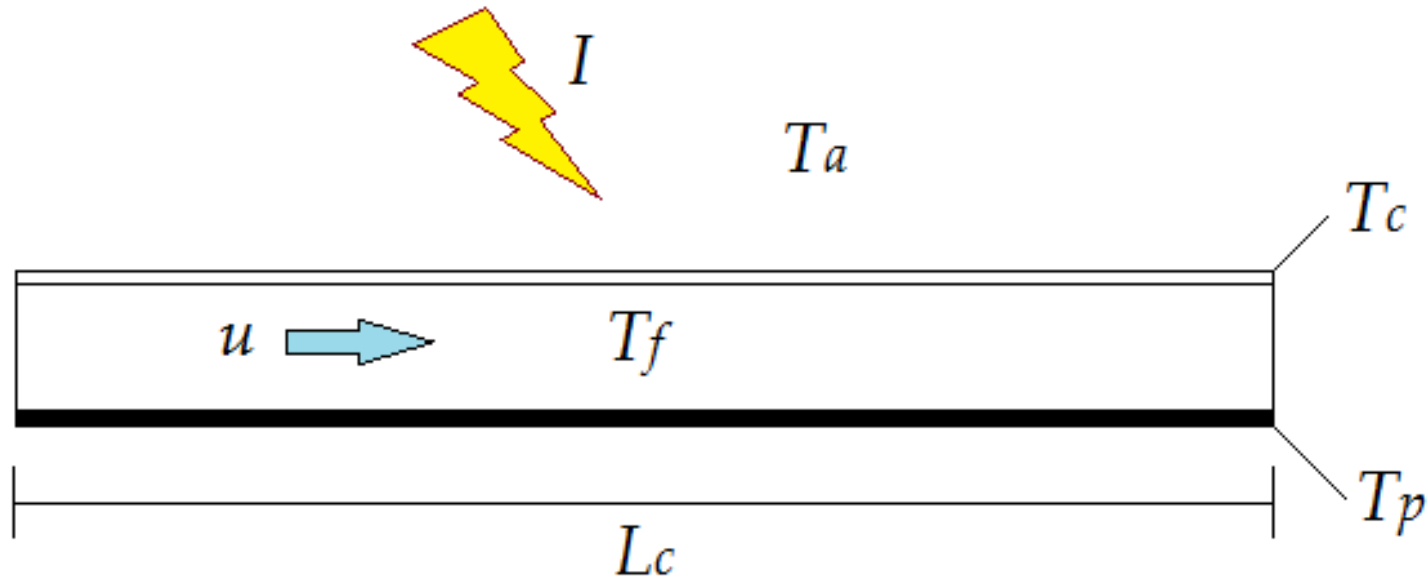
Wikipedia

# Optimización

- Asegura que se aproveche al máximo el recurso de la radiación solar.
- Acelera aún más los procesos del manejo post-cosecha de los agricultores.

# Geometría

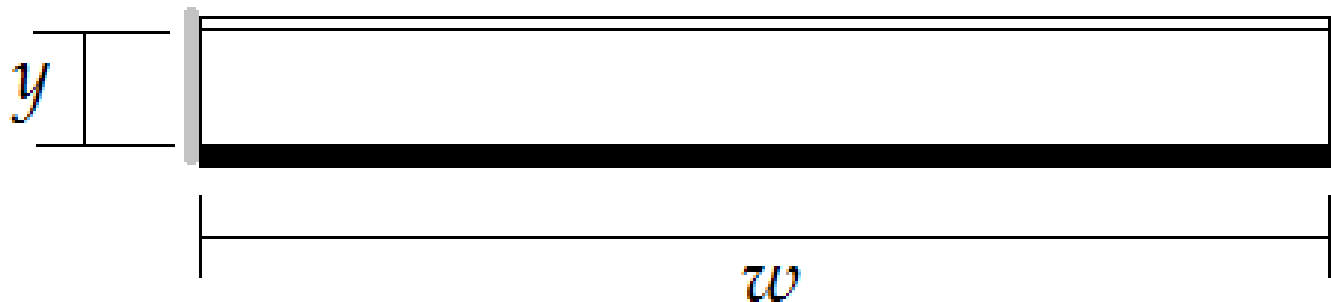
- Vista lateral:



# Geometría

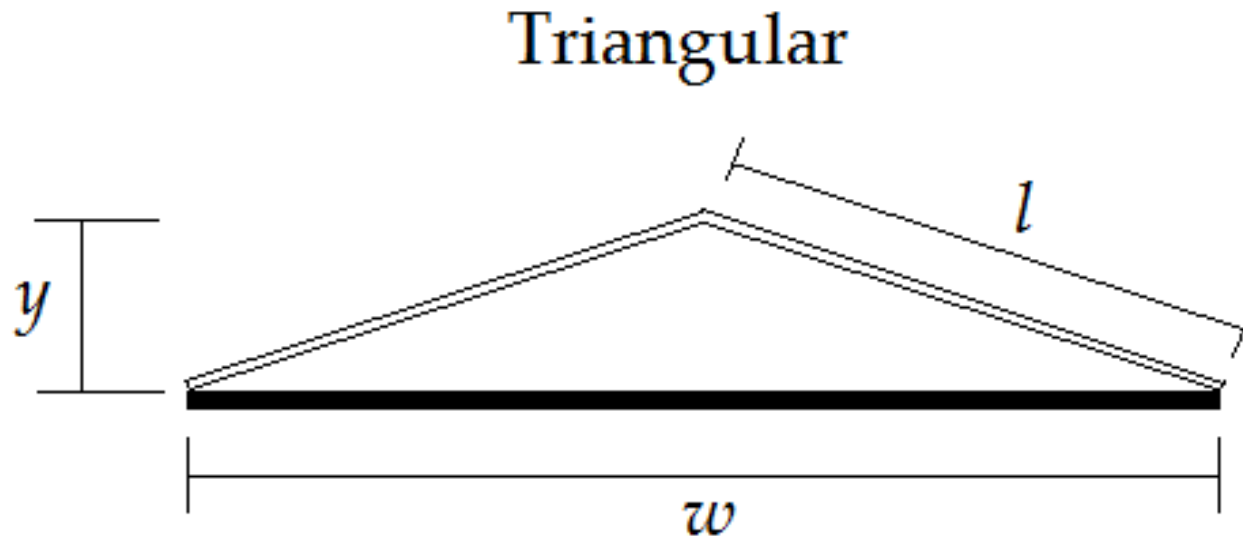
- Sección transversal:

Rectangular



# Geometría

- Sección transversal:



# Modelo matemático

- Balance de calor sobre placa colectora:

$$(\tau\alpha)I + h_c(T_{fm} - T_p) + h_{rpc}(T_c - T_p) + h_{rps}(T_s - T_p) = 0$$

- Balance de calor cubierta:

$$h_c(T_{fm} - T_c) + h_{rcp}(T_p - T_c) + h_{rcs}(T_s - T_c) + h_w(T_a - T_c) = 0$$



# Modelo matemático

- Sección rectangular:

$$\frac{dT_f}{dx} = \frac{h_c}{\rho_f u y c_p} [-2T_f + (T_p + T_c)]$$

$$T_{fo} = \frac{T_p + T_c}{2} + \left( T_a - \frac{T_p + T_c}{2} \right) \exp \left[ -\frac{2h_c L_c}{\rho_f u y c_p} \right]$$

# Modelo matemático

- Sección triangular:

$$\frac{dT_f}{dx} = \frac{2h_c}{\rho_f u y c_p} \left[ - \left( 1 + \frac{2l}{w} \right) T_f + \left( T_p + \frac{2l}{w} T_c \right) \right]$$

$$T_{fo} = \frac{T_p + (2l/w)T_c}{1 + 2l/w} + \left( T_a - \frac{T_p + (2l/w)T_c}{1 + 2l/w} \right) \exp \left[ - \frac{2h_c L_c}{\rho_f u y c_p} \left( 1 + \frac{2l}{w} \right) \right]$$

# Modelo matemático

- Coeficientes:

$$h_{r,p-c} = \frac{\epsilon_p \epsilon_c \sigma (T_p^2 + T_c^2) (T_p + T_c)}{1 - r_{pl} r_{cl}}$$

$$h_{r,p-s} = \frac{\tau_{cl} \epsilon_p \sigma (T_p^2 + T_s^2) (T_p + T_s)}{1 - r_{pl} r_{cl}}$$

$$T_s = 0.0552 T_a^{1.5}$$

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau_{cs} \alpha_p}{1 - (1 - \alpha_p) r_{cs}}$$

# Modelo matemático

- Coeficientes:

$$h_w = 2.8 + 3.0V [W/m^2K]$$

$$h_{r,c-s} = \epsilon_c \sigma (T_s^2 + T_c^2) (T_s + T_c)$$

$$Ra = \frac{\beta g |\Delta T| y_{eq}^3}{\nu^2} Pr \quad Nu = 0.0158 Re^{0.8} \quad Nu = 7.6$$

$$Nu = 1 + 1.44 \left[ 1 - \frac{1708}{Ra} \right] + \left[ \left( \frac{Ra}{5803} \right)^{1/3} - 1 \right]$$

# Modelo matemático

- Flujo interno por convección natural:

$$\frac{1}{2}\rho_o u^2 = (\rho_a - \rho_o)gH - \frac{1}{2}\rho_o u^2 K - \frac{1}{2}\rho_o u^2 f \frac{L_T}{D_h}$$

$$u = \sqrt{\frac{2gH(\rho_a/\rho_o - 1)}{1 + K + fL_T/D_h}}$$

# Modelo matemático

- Psicrometría:

$$P_{sat}(T) = \frac{\exp(77.345 + 0.0057T - 7235/T)}{T^{8.2}}$$

$$W = \frac{0.6219\phi_a P_{sat}(T_a)}{P - \phi_a P_{sat}(T_a)}$$

$$\phi = \frac{WP}{(0.6219 + W)P_{sat}(T)}$$

$$\rho = \frac{P - \phi P_{sat}(T)}{R_a T} + \frac{\phi P_{sat}(T)}{R_v T}$$

$$c_p = 1005 + 1850W \left[ \frac{J}{kgK} \right]$$

# Modelo matemático

- Eficiencia:

$$\eta = \frac{\dot{m}c_p(T_{fo} - T_a)}{IA_c}$$

# Solución numérica

- Método iterativo de punto fijo multidimensional para la solución numérica de las ecuaciones.
- Todas las ecuaciones se resuelven de forma simultánea.



# Solución numérica

CÁLCULOS COLECTOR SOLAR CON CHIMENEA CUBIERTA TRASLÚCIDA SECCIÓN RECTANGULAR											
Propiedades del aire											
Ra [J/kgK]	Rv [J/kgK]										
287	461,496										
Medidas del colector											
Lc [m]	Ls [m]	y [m]	w [m]	H [m]	K	A [m^2]	Per [m]	Dh [m]			
2,00	4,00	0,15	1,30	1,40	2,0	0,20	2,90	0,27			
Condiciones externas											
I [W/m2]	P [Pa]	Ta [°C]	HR ext	V [m/s]	Ta [K]	Psat ext [Pa]	HE	Cp [J/kgK]	ρ ext [kg/m3]	hw [W/m2K]	Ts [K]
1200	80000	35	0,8	0	308,15	5607,27	0,037	1073,34	0,885	2,80	298,05
Propiedades ópticas de la cubierta											
τsc	ρsc	τlc	ρlc	εc							
0,733	0,265	0,6	0,398	0,002							
Propiedades ópticas de la placa colectora											
α	εp	ρlp	(τα)								
0,9	0,9	0,1	0,678								
Estimaciones iniciales											
Tp [°C]	Tc [°C]	Tfm [°C]	To [°C]	u [m/s]	Tp [K]	Tc [K]	Tfm [K]	To [K]			
80	30	40	50	0,3	353,15	303,15	313,15	323,15			

# Solución numérica

CÁLCULOS COLECTOR SOLAR CON CHIMENEA CUBIERTA TRASLÚCIDA SECCIÓN TRIANGULAR											
Propiedades del aire											
Ra [J/kgK]	Rv [J/kgK]										
287	461,496										
Medidas del colector											
Lc [m]	Ls [m]	y [m]	w [m]	H [m]	K	l [m]	A [m^2]	Per [m]	Dh [m]		
2,00	4,00	0,09	1,30	1,40	2,0	0,66	0,06	2,61	0,09		
Condiciones externas											
I [W/m2]	P [Pa]	Ta [°C]	HR ext	V [m/s]	Ta [K]	Psat ext [Pa]	HE	Cp [J/kgK]	ρ ext [kg/m3]	hw [W/m2K]	Ts [K]
1200	80000	35	0,8	0	308,15	5607,27	0,037	1073,34	0,885	2,80	298,05
Propiedades ópticas de la cubierta											
τsc	ρsc	τlc	ρlc	εc							
0,733	0,265	0,6	0,398	0,002							
Propiedades ópticas de la placa colectora											
α	εp	ρlp	(τα)								
0,9	0,9	0,1	0,678								
Estimaciones iniciales											
Tp [°C]	Tc [°C]	Tfm [°C]	To [°C]	u [m/s]	Tp [K]	Tc [K]	Tfm [K]	To [K]			
80	30	40	50	0,3	353,15	303,15	313,15	323,15			

# Solución numérica

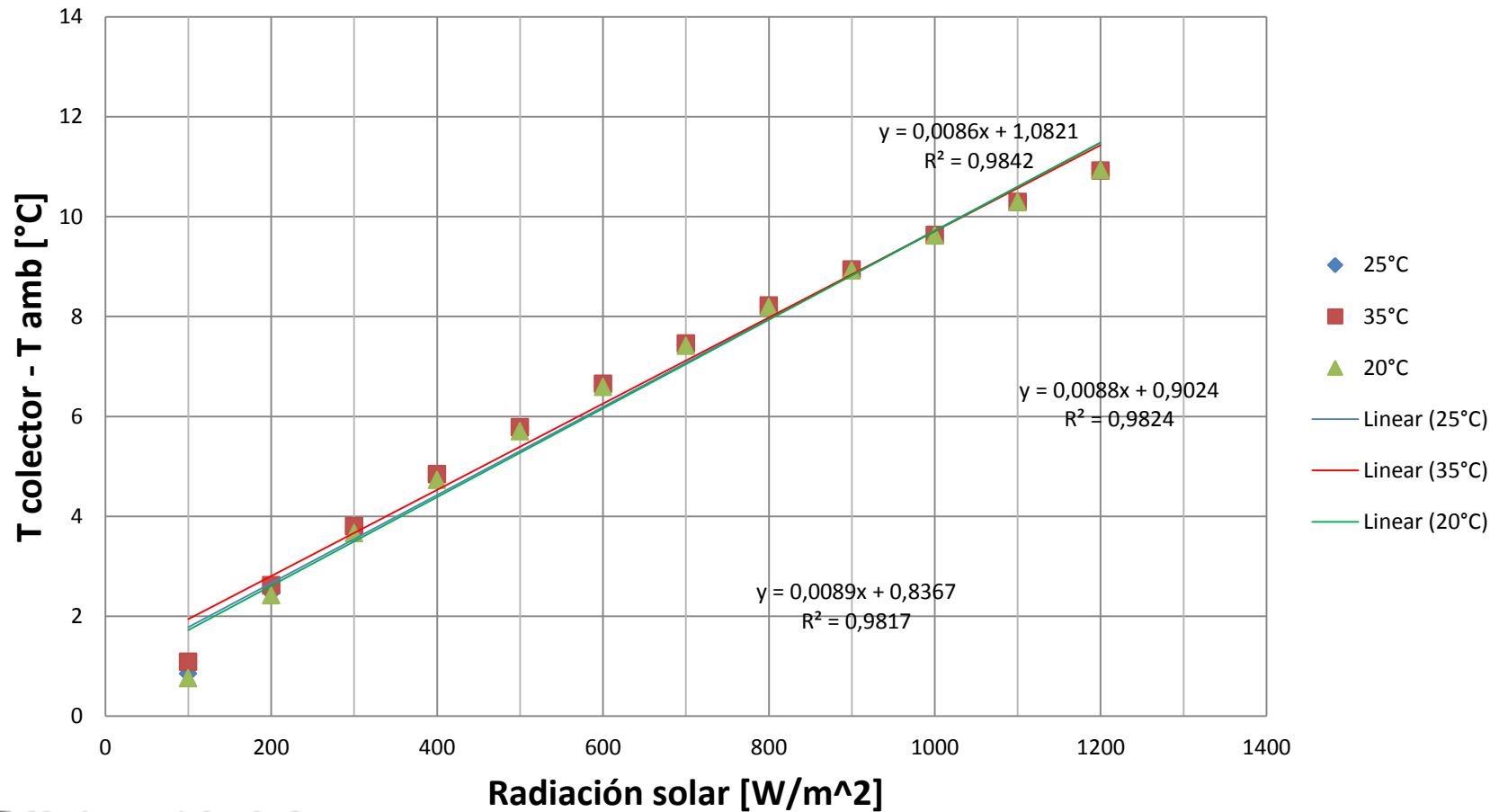
$T_o$ [°C]	HR	$u$ [m/s]	$m'$ [kg/h]
45,92	0,45	0,50	299,3

$I^*Ac$ [W]	$Q'$ [W]	$KE'$ [W]	$\eta$ [%]
3120,0	974,8	0,01033	31,2%

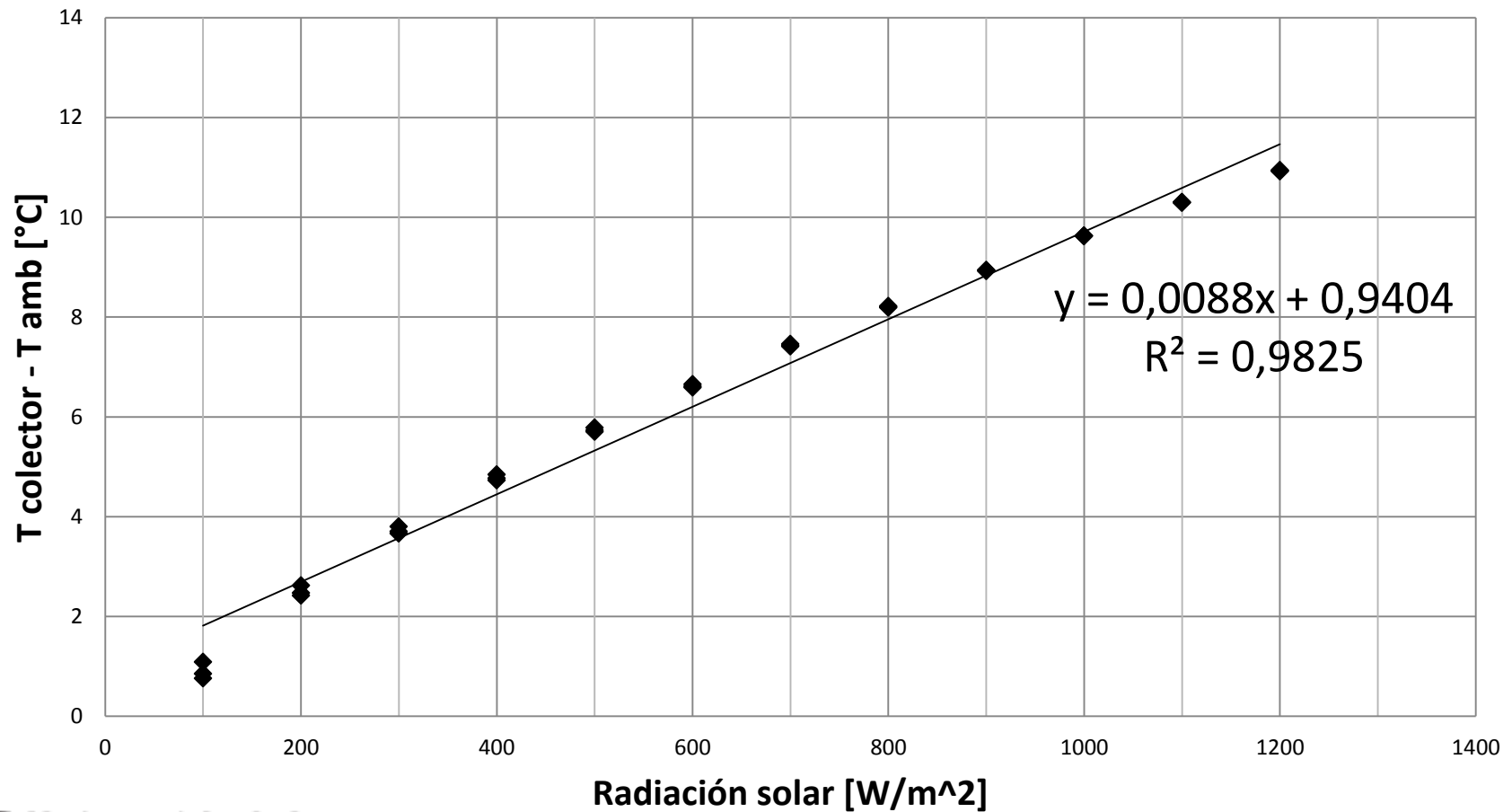
$T_p$ [°C]	$T_c$ [°C]	$T_{fm}$ [°C]	$T_m$ [°C]	$T_o/T_m$ [°C]
107,8	39,0	40,8	73,39	92,07%

Re	Pr	$E_{flot}$ [J/m <sup>3</sup> ]	$E_{cin}$ [J/m <sup>3</sup> ]	% Pérdidas
6476	0,71	0,42	0,11	74,44%

# Simulaciones



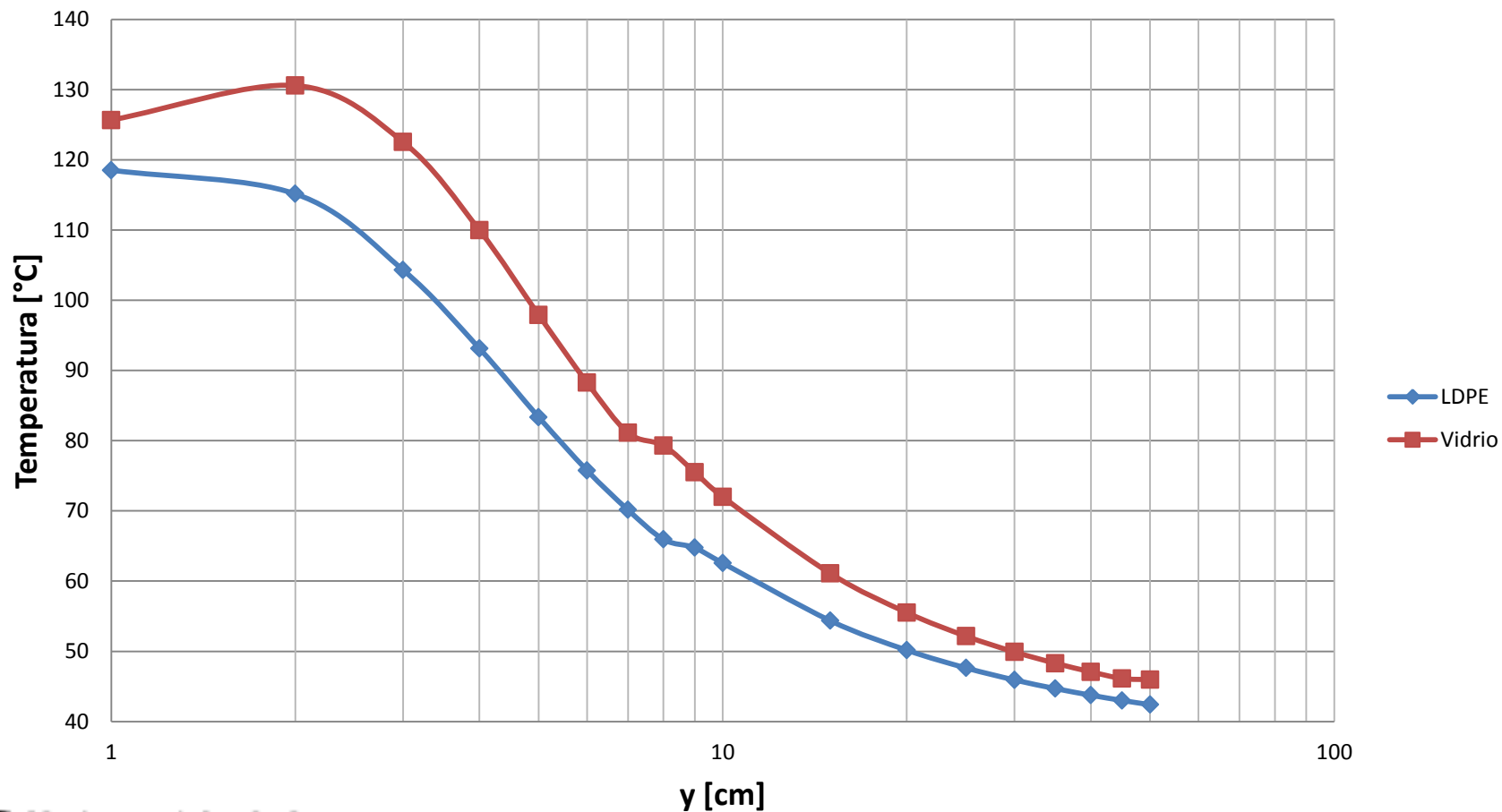
# Simulaciones



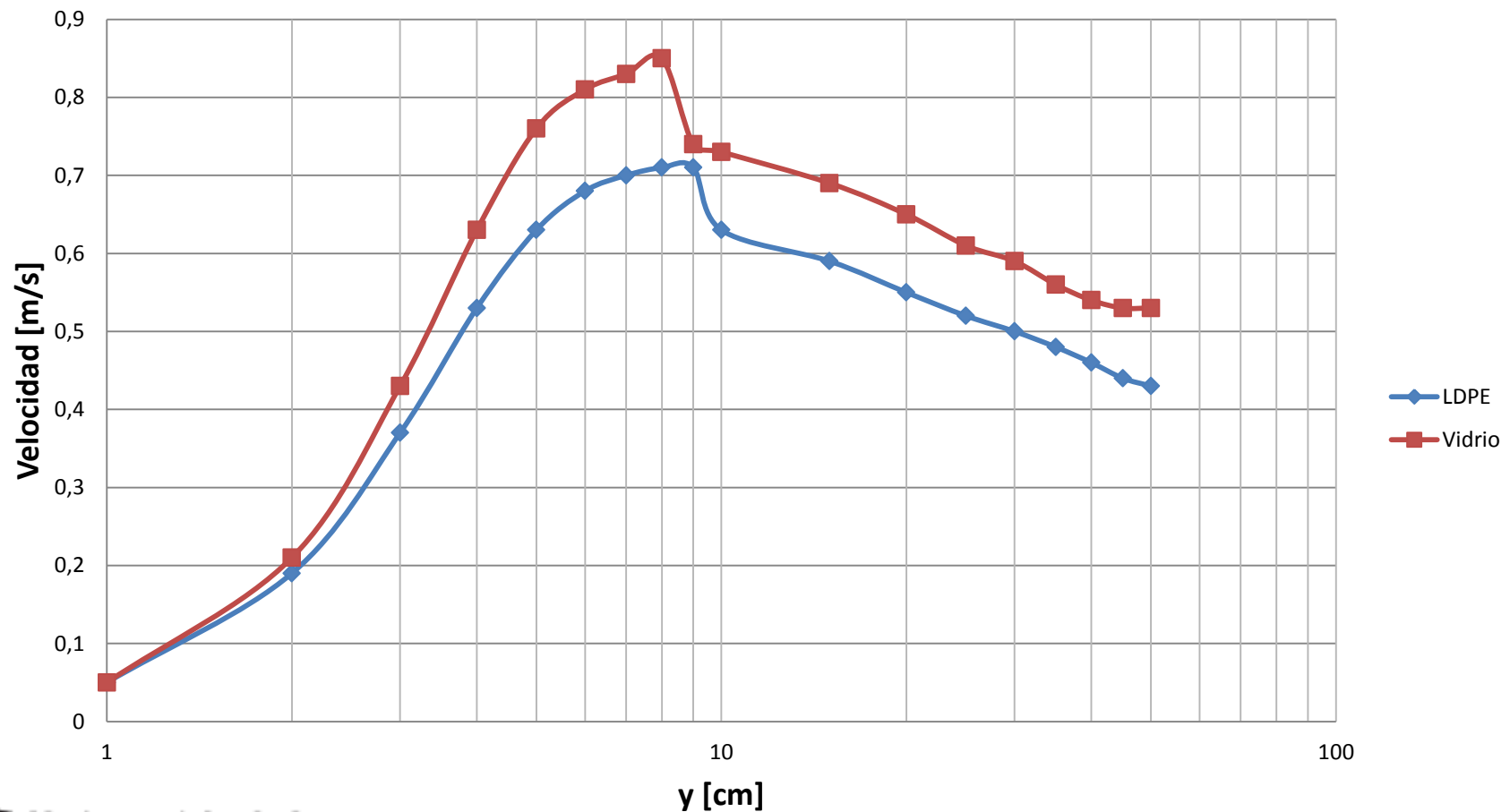
# Caso de optimización



# Caso de optimización

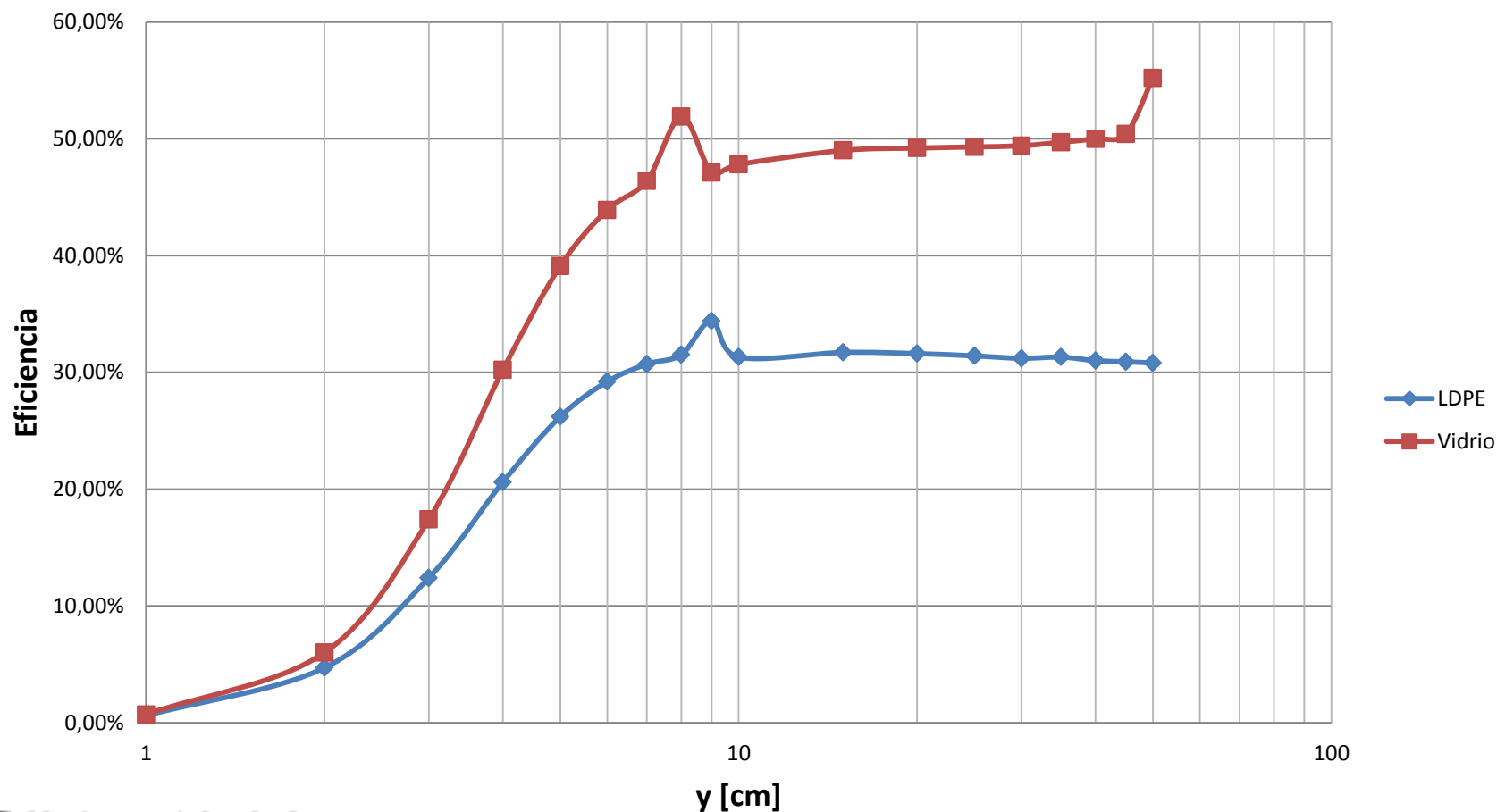


# Caso de optimización





# Caso de optimización



# Relaciones a maximizar

- Sección rectangular

$$\frac{L_c}{y}$$

- Sección triangular

$$\frac{L_c}{y} \left( 1 + \frac{2l}{w} \right)$$

# Análisis flujo inducido

- Para flujo por convección natural inducido en chimenea en sección rectangular:

$$u = \sqrt{\frac{2gH(\rho_a/\rho_o - 1)}{1 + K} + \left[ \frac{32\nu L_T}{D_h^2(1 + K)} \right]^2} - \frac{32\nu L_T}{D_h^2(1 + K)}$$

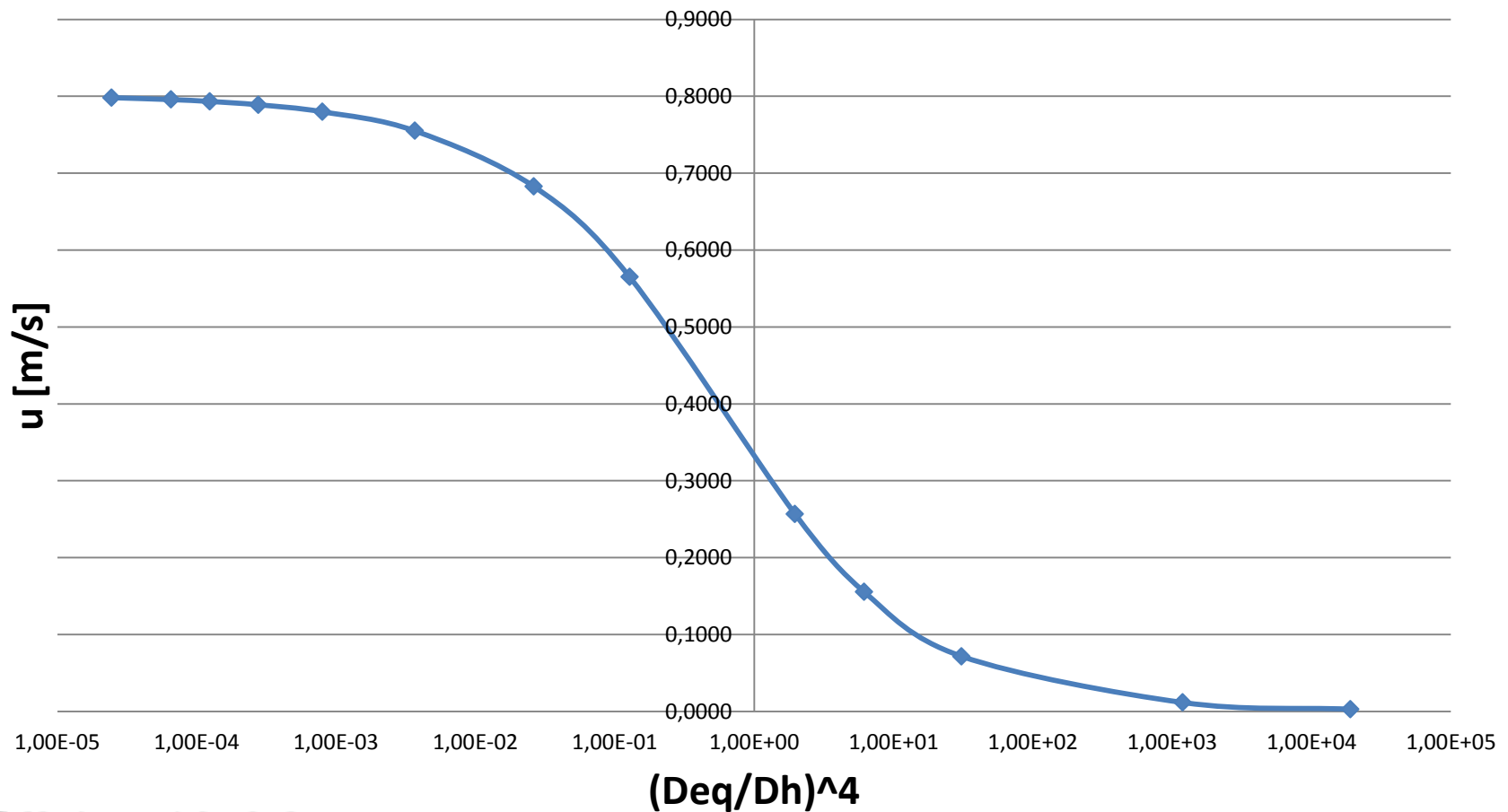
$$\frac{2gH(\rho_a/\rho_o - 1)}{1 + K} \ll \left[ \frac{32\nu L_T}{D_h^2(1 + K)} \right]^2$$

# Análisis flujo inducido

- Definiendo:

$$D_{eq}^4 = \frac{512v^2 L_T^2 T_a}{gH(T_o - T_a)(1 + K)}$$

# Análisis flujo inducido



# Análisis flujo inducido

- De las simulaciones se tiene:

$$\frac{L_T}{y} < 2.365 \left[ \frac{gHL_T^2(T_o - T_a)(1 + K)}{v^2 T_a} \right]^{0.25}$$

# Conclusiones

- Modelos matemáticos obtenidos.
- Identificación de relaciones importantes en el desempeño del colector.
- Desarrollo de método de cálculo de colectores óptimos.
- Se ha determinado restricción de una relación adimensional para permitir flujo.

# Conclusiones

- Estos análisis de colectores solares no están restringidos a secado de productos agrícolas, son útiles para precalentamiento de aire en hornos, calefacción de casas y demás utilizaciones de aire caliente.



# Trabajo futuro

- Determinar más relaciones adimensionales importantes.
- Simular 3D por volúmenes finitos en Ansys Fluent e incluir modelos de turbulencia.

# Referencias

- [1] Duffie, John and Beckman, William. Solar Engineering of Thermal Processes. 2<sup>nd</sup> edition. John Wiley & Sons. 1980.
- [2] Incropera and De Witt. Introduction to Heat Transfer. 2<sup>nd</sup> edition. John Wiley & Sons. 1990.
- [3] Swinbank, W.C. (1963). Long-wave radiation from clear skies, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, **89**: 339-348.
- [4] B. K. Bala. Solar Drying Systems. 1<sup>st</sup> edition. Agrotech Publishing Company. 1998.

# Contacto autores:

- Ing. Carlos Armando De Castro  
[cadecastro@gmail.com](mailto:cadecastro@gmail.com)

- Ing. Orlando Porras, Dr. Sc.  
[oporras@uniandes.edu.co](mailto:oporras@uniandes.edu.co)