

ESCALADO DEL CULTIVO DE LA MICROALGA *CHLORELLA VULGARIS* EN CULTIVADORES DE PELÍCULA DESCENDENTE. APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE LOS MODELOS PARA EL ESCALADO

Orlando Gines Alfaro Vives, Evidio de Armas Perez Borroto, Alina Juantorena Ugás
Universidad de Oriente

*En este trabajo se aplica la teoría de los modelos para identificar los parámetros característicos en el cultivo de la microalga *Chlorella vulgaris* en cultivadores de película descendente y sus razones de escala. Se tienen en cuenta las mismas al diseñar un cultivador de 500 m², se experimenta en él y se comparan los resultados con los obtenidos en un cultivador de 2 m². La aplicación de la teoría de los modelos permitió demostrar, utilizando razones de escala que:*

- *La irrigación y la profundidad en el modelo y el prototipo deben ser los mismos para que exista semejanza dinámica siempre que las pendientes de las canales sean las mismas*
- *Si la irrigación y la pendiente son las mismas entonces el coeficiente global de evaporación de líquido y el coeficiente global de transferencia de masa son los mismos. en el modelo y el prototipo y por tanto la evaporación por unidad de área será la misma.*
- *El tiempo de residencia debe ser el mismo en el modelo y el prototipo, para que ello se cumpla la relación volumen de líquido en la superficie / flujo total debe ser la misma.*
- *Si se utilizan bombas centrífugas con eficiencias similares es posible lograr iguales concentraciones de CO₂ disuelto en el modelo y el prototipo.*

Los resultados experimentales muestran que es posible obtener similares resultados en cuanto a productividad neta total y eficiencia fotosintética aparente, si se tienen en cuenta las razones de escala al diseñar un cultivador de película descendente de mayor área.

Palabras clave: *microalga, teoría de los modelos, razón de escala.*

*In this work it is applied the models theory to identify the characteristic parameters in the cultivation of the *Chlorella vulgaris* microalgal in thin layer cultivators and its scale ratios. They are taken into account at the time of designing a cultivator of 500 m², where it is experimented and the results obtained are compared with the ones obtained in a cultivator of 2 m². The application of the models theory could demonstrate using scale ratios that:*

- *The irrigation and depth of the fluent column in the model and the prototype should be the same so that exist dynamic resemblance always be the same in the meantime the canal pendants are the same..*
- *If the irrigation and the pendent are the same, then the global coefficient of dissipation of fluent and global coefficient of mass transference are the same in the model and the prototype*
- *The time of residence should be the same in the model and the prototype. To accomplish that, the relationship between volume of fluent on the surface and total flush should be the same.*
- *If it is used centrifugal pumps with similar efficiency it is possible to get equal concentrations of dissolved CO₂ in the model and the prototype.*

The experimental results show that it is possible to get similar results with regard to total net productivity and apparent photosynthetical efficiency if it is taken into account the scale ratios at the time of designing a thin layer cultivator of bigger area.

Key words: *microalgal, models theory, seale ratios*

Introducción

Los cultivadores de película descendente fueron diseñados por investigadores del Instituto de Microbiología de la entonces Academia de Ciencia de Checoslovaquia en la década de los años 60, para ser empleados en el cultivo de microalgas (J., Zahradnik, 1968). La superficie de cultivo se fue modificando

hasta convertirse en una superficie lisa (finales de los 80), trabajos en los que participaron investigadores del Centro de Investigaciones de Energía Solar de Santiago de Cuba.

Estos equipos constan de tres instalaciones: la superficie de cultivo a cielo abierto, tanque guarda de la suspensión y el sistema de bombeo y de aireación. (O., Alfaro, 1992).

La superficie de cultivo está compuesta por canales con una pendiente longitudinal que oscila entre 1,5 - 3 %, lo más lisa posible, y con pendiente transversal nula.

El tanque guarda permite la recolección de toda la suspensión de cultivo al finalizar el día; el mismo debe permanecer comunicado con la superficie de cultivo durante la noche, y cubierto de tal forma que facilite la respiración de los microorganismos.

El sistema de bombeo debe garantizar durante el día, la recirculación de la suspensión de cultivo sobre la superficie lisa del cultivador, y al iniciar el día, llevar la suspensión de cultivo del tanque guarda a la superficie de cultivo.

El sistema de aireación suministra al tanque guarda el oxígeno necesario para garantizar la respiración de los microorganismos durante la noche y con ello evitar pérdidas de biomasa.

El empleo de los cultivadores de película descendente permite disminuir al máximo el volumen de líquido sobre la superficie de cultivo, disminuir los tiempos de residencia hasta un día, incrementar la concentración de la suspensión de cultivo hasta valores nunca antes alcanzados en sistema alguno, lo que disminuye los costos de la separación de la biomasa. El sistema tiene en su contra los grandes volúmenes de suspensión que son necesarios recircular durante el día, para lo cual se emplean bombas que resultan altos consumidores de energía. (O., Alfaro, 1998)

El proceso de cultivo de la microalga *Chlorella vulgaris*, requiere de movimiento de fluidos, transferencia de calor, transferencia de masa y reacción química, por tanto, resulta indispensable conocer las razones de escala que se derivan de la semejanza dinámica, térmica y química para escalar el sistema y lograr semejantes resultados en el modelo y el prototipo.

Materiales y métodos

Si el sistema de cultivo es una canal con una inclinación θ con respecto a la horizontal, con un ancho b en (m), por el que desciende una película

de líquido newtoniano de viscosidad μ en ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) y densidad ρ en ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), el gasto volumétrico de la suspensión es Q_v en ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) y el espesor de la película es p en (m). Las dimensiones características del sistema según (R.Bird, 1964) (J. Rosabal, 1988) son p y Γ .

$$\Gamma = v \cdot \rho \quad (1)$$

donde Γ es la densidad de irrigación ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$).

Semejanza dinámica en el cultivador de película descendente para el cultivo de la microalga *Chlorella vulgaris*

Las fuerzas que mayor influencia ejercen sobre el sistema descrito son:

Fuerza inercia

$$F_i = \rho \cdot v^2 \cdot p^2 = \rho \cdot \Gamma^2$$

Dimensionalmente

$$[F_i] = [\rho \cdot \Gamma^2] \quad (2)$$

Fuerza gravitacional

$$F_g = \rho \cdot v \cdot g_\theta \quad (3)$$

$$g_\theta = g \cdot \text{sen } \theta$$

Dimensionalmente

$$[F_g] = [\rho \cdot p^3 \cdot g_\theta] \quad (4)$$

$g \Rightarrow$ Aceleración de la gravedad en $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Fuerza viscosa

$$F_\mu = \mu \cdot v \cdot p$$

Dimensionalmente

$$[F_\mu] = [\mu \cdot \Gamma] \quad (5)$$

Fuerza de fricción en los límites sólidos

$$F_f = \tau_p \cdot A$$

Dimensionalmente

$$[Ff] = [\tau_p \cdot p^2] \quad (6)$$

t_p Esfuerzo cortante

$$\left[\frac{F_i}{F\mu} \right] = \left[\frac{F_i'}{F\mu'} \right] = \left[\frac{\rho \cdot \Gamma}{\mu} \right] = \left[\frac{\rho' \cdot \Gamma'}{\mu'} \right] = \left[\frac{\Gamma}{\gamma} \right] = [Re] \text{ Número de Reynolds} \quad (7)$$

$\gamma = \frac{\rho}{\mu}$ Viscosidad cinemática

$$\left[\frac{F_i}{Fg} \right] = \left[\frac{F_i'}{Fg'} \right] = \left[\frac{\Gamma^2}{p^3 \cdot g_\theta} \right] = [Fr] \text{ Número} \quad (8)$$

de Froude

$$\left[\frac{Ff}{F_i} \right] = \left[\frac{Ff'}{F_i'} \right] = \left[\frac{\tau_p \cdot p^2}{\rho \cdot \Gamma^2} \right] = [f] \text{ Coeficiente} \quad (9)$$

de fricción

Por tanto, y teniendo en cuenta que la suma de todas las fuerzas que actúan sobre el sistema es igual a 0, es decir $\Sigma F_i = 0$, se cumple que:

$$f(Re, Fr, f_f) = 0 \quad (10)$$

Aplicando un balance de energía mecánica sobre la película descendente en régimen estacionario

$$g_\theta \cdot p - 2 \cdot f_f \cdot v^2 = 0 \quad f_f = f\left(\frac{1}{2 \cdot Fr}\right) \quad (11)$$

Al combinar (10) y (12) se obtiene:

$$f\left(\frac{\Gamma}{\gamma}, \frac{\Gamma^2}{p^3 \cdot g_\theta}\right) = 0 \quad (12)$$

Si se busca una relación entre Γ y p , se puede eliminar Γ del segundo término de la ecuación (12), dividiendo por $(\frac{\Gamma}{\gamma})^2$, y se obtiene:

$$f\left(\frac{\Gamma}{\gamma}, \frac{\gamma^2}{p^3 \cdot g_\theta}\right) = 0 \quad (13)$$

Las condiciones para que exista semejanza dinámica son

$$\frac{C_r}{C_\gamma} = 1 \quad \frac{C\gamma^2}{Cp^3 \cdot Cg_\theta} = 1$$

Semejanza térmica en el cultivador de película descendente para el cultivo de la microalga *Chlorella vulgaris*

Al relacionar estas fuerzas, se pueden formar tres grupos adimensionales, ya que existen cuatro fuerzas actuando:

Los flujos de calor existente en el sistema son:

$H_R \Rightarrow$ Flujo de calor por radiación

$$H_R = a_s \cdot I_r \cdot A$$

Dimensionalmente es:

(14)

$$H_R = a_s \cdot I_r \cdot L^2$$

donde:

$a_s \Rightarrow$ absorbanza de la suspensión, $I_r \Rightarrow$ radiación incidente ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$), y $A \Rightarrow$ área (m^2)

Flujo de calor por convección

$$H_V = \rho \cdot Cp \cdot v \cdot A \cdot \Delta t_1$$

Dimensionalmente es:

$$[H_V] = [\rho \cdot Cp \cdot v \cdot L^2 \cdot \Delta t] \quad (15)$$

donde:

$\rho \Rightarrow$ densidad de la suspensión ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), $Cp \Rightarrow$ calor específico de la suspensión ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}$), $v \Rightarrow$ velocidad de la suspensión ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), y $\Delta t \Rightarrow$ diferencia de temperatura ($^\circ\text{C}$).

Flujo de calor en los límites del sistema

$$H_f = h \cdot A \cdot \Delta t_2$$

Dimensionalmente

$$[H_f] = [h \cdot L^2 \cdot \Delta t] \quad (16)$$

donde:

$h \Rightarrow$ coeficiente de transferencia de calor entre el fluido y el aire ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), y Δt_2 diferencia de temperatura entre la suspensión y el medio ($^\circ\text{C}$).

Se pueden formar los siguientes grupos adimensionales

$$\left[\frac{Hf}{H_R} \right] = \left[\frac{Hf'}{H'_R} \right] = \left[\frac{h \cdot \Delta t}{Ir \cdot (a_s)} \right] = [K_1] \quad (17)$$

$$\left[\frac{H_R}{H_V} \right] = \left[\frac{H'_R}{H'_V} \right] = \left[\frac{Ir \cdot (a_s)}{\rho \cdot Cp \cdot v \cdot \Delta t} \right] = [K_2] \quad (18)$$

Si se multiplica K_1 por K_2 se obtiene:

$$K_3 = \frac{h}{\rho \cdot Cp \cdot v} \quad (19)$$

Por tanto, para que exista semejanza térmica se debe cumplir que:

$$K_2 = f(K_3, Re) \quad (20)$$

Si se realiza un balance de calor en régimen estacionario:

$$a_s \cdot Ir \cdot A = \rho \cdot Cp \cdot v \cdot A \cdot \Delta t_1 + h \cdot A \cdot \Delta t_2 \quad (21)$$

Se puede demostrar que:

$$\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = f(K_3, Re) \quad (22)$$

donde:

$\Delta t_1 \Rightarrow$ diferencia de temperatura de la suspensión ($^{\circ}C$), y $\Delta t_2 \Rightarrow$ diferencia de temperatura entre la suspensión y el medio ($^{\circ}C$).

Por tanto, el gradiente de temperatura es función de:

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = f\left(\frac{h \cdot p}{\rho \cdot Cp \cdot \gamma}, \frac{\Gamma}{\gamma}\right) \quad (23)$$

Se cumplen las siguientes razones de escala:

$$\frac{C_{\Gamma}}{C_{\gamma}} = 1 \quad \frac{C_h \cdot C_p}{C_{\rho} \cdot C_{Cp} \cdot C_{\gamma}} = 1 \quad \frac{C_{\Delta t}}{C_{\Delta t}} = 1$$

Semejanza química en el cultivador de película descendente para el cultivo de la microalga bajo régimen autotrófico

Análisis del flujo de dióxido de carbono en el cultivador para el caso de cultivos autotróficos:

Dióxido de carbono disuelto en el sistema

$$Nv = \Delta CO_2 \cdot v \cdot A$$

Dimensionalmente

$$[Nv] = [\Delta C \cdot \Gamma \cdot L] \quad (24)$$

donde:

$\Delta CO_2 \Rightarrow$ variación de la concentración de CO_2 en la suspensión de cultivo sobre la superficie de cultivo ($kg \cdot m^{-3}$), $v \Rightarrow$ velocidad de la suspensión sobre la superficie de cultivo ($m \cdot s^{-1}$) y $A \Rightarrow$ área de la superficie de cultivo (m^2).

Dióxido de carbono consumido por las algas

$$N_A = Yca \cdot \mu_A \cdot \Delta C_A \cdot V_{ss}$$

Dimensionalmente

$$[N_A] = [Yca \cdot \Delta C \cdot \mu_A \cdot L^3] \quad (25)$$

donde:

$Yca \Rightarrow$ dióxido de carbono consumido por cada kg de alga producido en ($kg \cdot kg^{-1}$), $\mu_A \Rightarrow$ velocidad media de crecimiento del alga (h^{-1}), $\Delta C_A \Rightarrow$ incremento de la concentración inicial de algas ($kg \cdot m^{-3}$), $V_{ss} \Rightarrow$ volumen sobre la superficie de cultivo (m^3).

Flujo de CO_2 que se escapa al medio

$$Nf = Ka \cdot S \cdot \Delta CO_2$$

Dimensionalmente

$$[Nf] = [Ka \cdot L^2 \cdot \Delta C] \quad (26)$$

donde:

$Ka \Rightarrow$ coeficiente de transferencia de masa con el medio (seg^{-1}), $\Delta CO_2 \Rightarrow$ variación de concentración del CO_2 disuelto en la fase gaseosa de la interfase líquido-gas ($kg \cdot m^{-3}$) y en el aire, y S es el área de la superficie.

Flujo de CO_2 que se difunde en el líquido

$$Nd = D \cdot S \cdot \Delta CO_2 \cdot \frac{1}{p}$$

Dimensionalmente

$$[Nf] = [D \cdot L \cdot \Delta C] \quad (27)$$

donde:

$D \Rightarrow$ difusividad ($\text{m}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$), $\Delta C_A \Rightarrow$ Variación de concentración del CO_2 disuelto en la fase líquida de la interfase líquido-gas ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) y en la suspensión de cultivo.

Se pueden formar los siguientes grupos adimensionales

$$\left[\frac{Nv}{Nf} \right] = \left[\frac{Nv'}{Nf'} \right] = \left[\frac{\Gamma}{Ka \cdot L} \right] = [P_1] = [P_1] \quad (28)$$

$$\left[\frac{Nf}{Nd} \right] = \left[\frac{Nf'}{Nd'} \right] = \left[\frac{ka \cdot L}{D} \right] = [Sh] = [Sh] \quad (29)$$

$$\left[\frac{N_A}{Nv} \right] = \left[\frac{N_A'}{Nv'} \right] = \left[\frac{Yca \cdot \mu_a \cdot L^2}{\Gamma} \right] = [P_2] = [P_2] \quad (30)$$

$$Sh = f(P_1, P_2) \quad (31)$$

Si se realiza un balance de masa y se denomina ΔC_A al incremento de la concentración de algas en el medio, y ΔCO_2 a la variación de concentración ΔCO_2 disuelto en el medio y ΔCO_{2l} la variación de concentración de CO_2 entre la fase gaseosa de la interfase líquido-gas y la concentración de CO_2 en el aire, se obtiene:

$$\Delta CO_2 \cdot v \cdot A = Yca \cdot \mu_a \cdot C_A \cdot V_{ss} + Ka \cdot \Delta CO_{2l} \cdot S \quad (32)$$

$$\alpha = \frac{\Delta CO_{2l}}{\Delta CO_2} = f(P_1, P_2) \quad (33)$$

donde

α es la razón de concentraciones en la suspensión

$$\alpha = \frac{\Delta CO_{2l}}{\Delta CO_2} = \frac{\Delta C_A}{\Delta CO_2}$$

Para garantizar semejanza dinámica y térmica entonces

$$\frac{\Delta CO_{2l}}{\Delta CO_2} = f\left(Yca \cdot \mu_a \cdot Tr, \frac{\gamma}{Ka \cdot p}, \frac{\Gamma}{\gamma}, \frac{h \cdot p}{\rho \cdot Cp \cdot \gamma}\right) \quad (34)$$

Razones de escala para que exista semejanza química

$$\frac{C_\Gamma}{C_\gamma} = 1 \quad \frac{C_h \cdot C_p}{C_\rho \cdot C_{Cp} \cdot C_\gamma} = 1$$

$$\frac{C_{\Delta C_A}}{C_{\Delta CO_2}} = \frac{C_{\Delta CO_{2l}}}{C_{\Delta CO_2}} = 1 \quad \frac{C_\gamma}{C_{Ka} \cdot C_p} = 1 \quad C_{Tr} = 1$$

Para fluidos homólogos las razones de escala son:

$$C_\Gamma = 1 \quad C_h \cdot C_p = 1 \quad \frac{C_{\Delta C_A}}{C_{\Delta CO_2}} = 1$$

$$C_{ka} \cdot C_p = 1 \quad C_{Tr} = 1$$

Semejanza dinámica. Proceso de disolución del CO_2 en la suspensión de cultivo

Este proceso ocurre en la bomba que recircula la suspensión de cultivo, y las fuerzas que actúan son:

Fuerza inercia

$$Fi = \rho \cdot v^2 \cdot D_i^2$$

Dimensionalmente

$$[Fi] = [\rho \cdot v^2 \cdot L^2] \quad (35)$$

Fuerza viscosas

$$F\mu = \mu \cdot v \cdot D_i$$

Dimensionalmente

$$[F\mu] = [\mu \cdot v \cdot L] \quad (36)$$

Fuerza centrífuga

$$Fc = \rho \cdot d^4 \cdot n^2$$

Dimensionalmente

$$[Fc] = [\rho \cdot L^4 \cdot n^2] \quad (37)$$

Fuerza de presión

$$Fp = H \cdot \rho \cdot g \cdot d^2$$

Dimensionalmente

$$[Fp] = [H \cdot \rho \cdot g \cdot L^2] \quad (38)$$

Fuerza de fricción

$$Ff = \frac{J}{v}$$

Dimensionalmente

$$[Ff] = \left[\frac{J}{v} \right] \quad (39)$$

donde:

Di es el diámetro de la tubería (m), d es el diámetro del impelente de la bomba (m), n revoluciones por minuto del impelente (rpm), H carga de bombeo en (m de H₂O), y J potencia del motor (kW). Todos los demás términos son conocidos.

Al relacionar estas fuerzas se pueden formar tres grupos adimensionales:

$$\left[\frac{Fi}{F\mu} \right] = \left[\frac{Fi}{F\mu} \right] = \left[\frac{\rho \cdot v^2 \cdot L^2}{\mu \cdot v \cdot L} \right] = \left[\frac{\rho \cdot v^2 \cdot L^2}{\mu \cdot v \cdot L} \right] = \left[\frac{\rho \cdot Qv}{\mu \cdot L} \right] = [\pi 1]$$

N.de Reynolds (40)

$$\left[\frac{Fi}{Fc} \right] = \left[\frac{Fi}{Fc} \right] = \left[\frac{Qv^2}{L^6 \cdot n^2} \right] = [\pi 2] \quad (41)$$

$$\left[\frac{Fp}{Fi} \right] = \left[\frac{Fp}{Fi} \right] = \left[\frac{H \cdot g \cdot L^4}{Qv^2} \right] = [\pi 3] \quad (42)$$

$$\left[\frac{Fp}{Ff} \right] = \left[\frac{Fp}{Ff} \right] = \left[\frac{H \cdot \rho \cdot g \cdot L^3}{J} \right] = [\pi 3] \quad (43)$$

$$\pi 2 = f(\pi 1, \pi 3, \pi 4) \quad (44)$$

Para fluidos poco viscoso Si $\mu < 20$ cst entonces:

$$\pi 2 = f(\pi 3, \pi 4)$$

Las razones de escala para alcanzar semejanza dinámica son:

$$C_{Qv} = C_n \cdot C_L^3 \quad C_H = C_n^3 \cdot C_L^2$$

Semejanza química. Proceso de disolución del CO₂ en la suspensión de cultivo

Flujo de CO₂ que transfiere en los límites

$$Nf = Kb \cdot A \cdot \Delta CO_2$$

Dimensionalmente

$$(45)$$

donde:

$Kb \Rightarrow$ coeficiente de transferencia de masa con el medio (seg⁻¹), $\Delta CO_2 \Rightarrow$ variación de concentración del CO₂ disuelto en la fase gaseosa de la interfase líquido-gas y el gas (kg.m⁻³), y A área de flujo.

Flujo de CO₂ que se difunde en el líquido

$$Nd = D \cdot A \cdot \Delta CO_2 \cdot \frac{1}{L}$$

Dimensionalmente

$$[Nd] = [D \cdot L \cdot \Delta C] \quad (46)$$

donde:

$D \Rightarrow$ difusividad (m².seg⁻¹), $\Delta CO_2 \Rightarrow$ variación de concentración del CO₂ disuelto en la fase líquida de la interfase líquido-gas (kg.m⁻³) y en la suspensión de cultivo, y A área de flujo (m²).

Dióxido de carbono disuelto en el sistema

$$Nv = \Delta CO_2 \cdot v \cdot A$$

Dimensionalmente

$$[Nv] = [\Delta C \cdot n \cdot L^3] \quad (47)$$

donde:

$\Delta CO_2 \Rightarrow$ incremento de la concentración de CO₂ en la suspensión de cultivo (kg.m⁻³), $v \Rightarrow$ velocidad de recirculación de la suspensión (m.s⁻¹), y A \Rightarrow área de flujo (m²).

Se pueden formar los siguientes grupos adimensionales

$$\left[\frac{Nv}{Nd} \right] = \left[\frac{Nv}{Nd} \right] = \left[\frac{n \cdot L^2}{D} \right] = [Pe] = [Pe]$$

Peclet de masa (48)

$$\left[\frac{Nf}{Nd} \right] = \left[\frac{Nf}{Nd} \right] = \left[\frac{kb \cdot L}{D} \right] = [Sh] = [Sh]$$

No. Sherwood (49)

$$Sh = f(Pe, \pi 3, \pi 4)$$

Al aplicar un balance de masa encontraremos, que las relaciones de concentraciones también dependen de:

$$\alpha = f(Pe, \pi 3, \pi 4)$$

α es la relación de concentraciones de CO₂.

Las razones de escala para alcanzar semejanza dinámica son:

$$C_J = C_n^3 \cdot C_d^5 \cdot C_\rho$$

$$C_D = C_n \cdot C_d^2$$

$$C_{kb} = C_n \cdot C_d$$

Por tanto, existe semejanza rigurosa y se alcanzan iguales concentraciones de CO₂ en la suspensión de cultivo en el modelo y el prototipo, siempre que se empleen bombas centrífugas con igual eficiencia.

Escalado del cultivador de película descendente para el cultivo autotrófico de la microalga *Chlorella vulgaris* de 2 a 500 m²

Para la experiencia, se emplearon dos cultivadores de película descendente, uno de 2 m², y otro de 500 m² con una inclinación ambos de 1,5 %; el espesor de la película empleada fue de 1 cm. El largo de las canales del cultivador de 500 m², fue de 30 m. La fuente de carbono utilizada fue el CO₂, y la composición del medio de cultivo se representa en la tabla 1:

Tabla 1
Medio de cultivo utilizado. (Zahradnik, J.1968)

Fertilizante	Concentración en el medio de cultivo
KH ₂ PO ₄	1,36
CO(NH ₂) ₂	1,20
MgSO ₄	2,47
EDTA	50 g.m ⁻³

La temperatura fue medida cada una hora, y osciló entre 24,5 y 37 °C en ambas instalaciones. La radiación solar se registró a través de un piranómetro, donde se obtienen los valores integrados de la radiación horaria. La concentración inicial de algas osciló entre 5 y 6 kg.m⁻³. Se garantizó igual concentración inicial de microorganismos en dichas instalaciones.

Durante la evaluación se determinó al inicio y al final de cada día la concentración de biomasa por métodos gravimétricos.

Resultados y discusión

Análisis de los resultados obtenidos al aplicar la teoría de los modelos

Las expresiones obtenidas permiten predecir el valor de p en el prototipo para una Γ dado. Para que exista semejanza dinámica entre prototipo y

modelo, se debe garantizar igual irrigación en ambos si se trata de fluidos homólogos. Si se desea disminuir la inclinación de la canal en el prototipo, es necesario incrementar p para garantizar igual Γ entre prototipo y modelo.

Si se desea escalar el cultivador de película descendente desde 2 m² a 500 m², es necesario garantizar que en el cultivador de 500 m² exista la misma irrigación Γ que en el de 2 m². Para ello, debe suministrarse el mismo flujo de líquido por cada m de ancho que tenga el cultivador, siempre que la inclinación de las canales en ambas instalaciones sea la misma. Si se desea que la inclinación en el de 500 m² sea menor, es necesario suministrar un flujo mayor por cada m de ancho de cada canal. Esto es muy útil cuando se diseñan grandes instalaciones para optimizar los costos de inversión y bombeo.

Para fluidos homólogos, en canales con iguales pendientes, y si la profundidad p permanece constante entre el modelo y el prototipo, es posible lograr igual coeficiente de transferencia de calor por evaporación, por tanto, el gradiente de temperatura entre modelo y prototipo será el mismo. Si la irrigación y la pendiente son las mismas, entonces el coeficiente global de evaporación de líquido es el mismo en el modelo y el prototipo, y por tanto, la evaporación por unidad de área será la misma en el cultivador de 500 m² y en el de 2 m².

Si la irrigación y la pendiente son las mismas, el coeficiente global de transferencia de masa es el mismo en el modelo y el prototipo y, por tanto, se libera igual cantidad de CO₂ al medio por unidad de área en el cultivador de 500 m² y en el de 2 m².

El tiempo de residencia debe ser el mismo en el modelo y el prototipo. Para que ello se cumpla, la relación volumen de líquido en la superficie-flujo total, debe ser la misma.

Si se utilizan bombas centrífugas con eficiencias similares, es posible alcanzar iguales concentraciones de CO₂ disuelto en la suspensión de cultivo en el modelo y el prototipo. El flujo de CO₂ disuelto está limitado por la constante de solubilidad del mismo. Experimentalmente se demostró, que el largo de la canal no debe exceder los 30 m. M.

Quintana, (2006), ya que la velocidad de crecimiento del alga se ve limitada por la concentración de CO₂ en la suspensión.

Tabla 2

Resultados experimentales cultivo autotrófico en un cultivador de 500 m² y uno de 2 m², donde se han tenido en cuenta las razones de escala en el diseño de cultivador de 500 m²

No. Exp.	Área m ²	Pnt g.m ⁻² .d	Epa %	Io MJ.m ⁻²
1	2	20	2,77	16,6
	500	19,8	2,74	
2	2	24	2,78	19,8
	500	23	2,67	
3	2	24,3	2,83	19,7
	500	24	2,80	
4	2	25	2,73	21
	500	25,3	2,77	
5	2	22,3	2,38	21,5
	50	23	2,46	
6	2	23,4	2,80	19,2
	500	23,2	2,78	
Promedio	2	23,16	2,71	19,63
	500	23,05	2,70	

Pnt ⇒ productividad neta total en (g.m⁻².d⁻¹)

Epa ⇒ eficiencia fotosintética aparente en por ciento

Io ⇒ radiación solar incidente en (MJ.m⁻²)

Conclusiones

2. Si se desea escalar un cultivador de película descendente utilizado en el cultivo autotrófico de la microalga *Chlorella vulgaris* desde 2 m² hasta 500 m² o más, es necesario tener en cuenta que:

- Para fluidos homólogos las razones de escala son:

$$C_{\Gamma} = 1 \quad C_h \cdot C_p = 1 \quad \frac{C_{\Delta CA}}{C_{\Delta CO_2}} = 1$$

$$C_{ka} \cdot C_p = 1 \quad C_{Tr} = 1$$

3. Se demostró utilizando las razones de escala que:

- La irrigación en el modelo y el prototipo debe ser la misma para que existe semejanza dinámica.

- La profundidad de la columna de líquido en el modelo y el prototipo será la misma siempre que las pendientes de las canales sean las mismas.

- Si la irrigación y la pendiente son las mismas, entonces el coeficiente global de evaporación

de líquido es el mismo en el modelo y el prototipo, y por tanto, la evaporación por unidad de área será la misma.

- Si la irrigación y la pendiente son las mismas, el coeficiente global de transferencia de masa es el mismo en el modelo y el prototipo, y por tanto, se libera igual cantidad de CO₂ al medio por unidad de área.

- El tiempo de residencia debe ser el mismo en el modelo y el prototipo; para que ello se cumpla, la relación volumen de líquido en la superficie/flujo total debe ser la misma.

4. Si se desea escalar un cultivador de película descendente utilizado en el cultivo autotrófico de la microalga *Chlorella vulgaris* desde 2m² hasta 500 m² o más, es necesario tener en cuenta que, las razones de escala para alcanzar iguales concentraciones de CO₂ en el modelo y el prototipo son:

$$C_H = C_n^3 \cdot C_d^2 \quad C_J = C_n^3 \cdot C_d^5 \cdot C_{\rho}$$

$$C_D = C_n \cdot C_d^2 \quad C_{kb} = C_n \cdot C_d$$

Si se utilizan bombas centrífugas con eficiencias similares, es posible lograr iguales concentraciones de CO₂ disuelto en el modelo y el prototipo. La concentración de CO₂ disuelto está limitada por la solubilidad del CO₂ en la suspensión de cultivo, y esto, a su vez, limita el largo de las canales de cultivo.

5. Los resultados experimentales muestran que es posible obtener resultados similares en cuanto a productividad neta total y eficiencia fotosintética aparente, si se tienen en cuenta las razones de escala al diseñar un cultivador de película descendente de mayor área.

Bibliografía

1. Alfaro, O., *Metodología para el cálculo de cultivadores, de microalgas del tipo película des-*

cedente, Revista Tecnología Química, vol. XIII, No. 3, 1992.

2. _____, "Procesos tecnológicos para el aprovechamiento de la biomasa de la microalga *Chlorella vulgaris*", Tesis en opción al título de master en Ingeniería de Procesos, Universidad de Oriente, 1998.
3. Bird, R. B., Stewart, W. y Lightfoot, E., *Fenómenos de transporte*, Editorial Reverté, Barcelona, 1964.
4. Quintana, M., *Experiencia del cultivo de la microalga Chlorella vulgaris en el Centro de Investigaciones de Energía Solar en Santiago de Cuba*, Resultado Científico y libro en proceso de edición, 2006.
5. Rosabal, J., *Teoría de los modelos en Ingeniería Química*, Editorial Oriente, Santiago de Cuba, 1988.
6. Zahradnik, J., Outdoor Cultivation. Annual Report of the Laboratory of Experimental Algology and Department of Applied Agology for the Year 1967.