

Research

Efecto de la potencia y número de aspas de un aireador rotativo sobre la transferencia de oxígeno disuelto en agua***Effect of the Power and Number of Paddles of a Rotatory Aerator on Dissolved Oxygen Transfer in Water***

Cesar René Blanco-Zuñiga^{1*}, Dalia Soraya Useche-de-Vega¹, Nicolás Rojas-Arias^{1, 2**}

¹ Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.

² Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, São Carlos, Brasil.

Correspondencia: cesar.blanco@uptc.edu.co*, nicolas.rojas@estudante.ufscar.br**

Received: 20/01/2021 - Modified: 30/09/2021 - Accepted: 05/10/2021

Resumen

Contexto: La transferencia del oxígeno disuelto (OD) es un tema de importancia para la calidad del agua. Diversos dispositivos se han diseñado para suministrar el OD requerido en algunos cuerpos de agua durante su tratamiento y restauración; sin embargo, estos conllevan un alto consumo de energía, requiriendo optimizar los parámetros de uso.

Método: Este trabajo estudió el efecto de la potencia y número de aspas utilizadas en un aireador de eje horizontal. Las mediciones se realizaron en muestras de agua anóxica, utilizando tres dispositivos aireadores conformados por 6, 12 y 24 aspas, variando la velocidad de rotación a partir del voltaje suministrado.

Resultados: Los mayores valores obtenidos del coeficiente de transferencia K_{La} se presentan en dispositivos con mayor cantidad de aspas. Sin embargo, la eficiencia estándar de aireación (SAE) y la eficiencia de transferencia de oxígeno estándar (SOTR) revelaron que el dispositivo con 6 aspas presenta una mayor eficiencia energética.

Conclusiones: Se demostró que la transferencia de OD no depende únicamente de los impactos asociados al número de aspas, y que la máxima eficiencia en la transferencia se obtiene con un menor número de aspas. Estos resultados pueden contribuir en mejorar el entendimiento del funcionamiento de estos sistemas mecánicos en términos de transferencia de OD.

Palabras clave: aireador mecánico, oxígeno disuelto (OD), número de aspas, coeficiente de transferencia de oxígeno, eficiencia de aireación estándar

Abstract

Context: Dissolved oxygen (DO) transfer is an important matter for water quality. Several devices have been designed to supply the required DO in some bodies of water during their treatment and restoration. However, these entail a high energy consumption, thus requiring the optimization of use parameters.

Method: This work studies the effect of the power and number of paddles used in a horizontal axis aerator. Measurements were made on anoxic water samples using three mechanical aerating devices made up of 6, 12, and 24 paddles while varying the rotation speed from the supplied voltage.

Results: The highest values obtained for the transfer coefficient K_{La} are reported by devices with a greater number of blades. Nevertheless, the Standard Aeration Efficiency (SAE) and the Standard Oxygen Transfer Rate (SOTR) efficiency reveal that the 6-paddle wheels are more energy-efficient.

Conclusions: It is shown that DO transfer does not depend solely on the impacts associated with the number of paddles, and that the maximum transfer efficiency is obtained with a lower number of paddles. These results contribute to improving the understanding of the operation of these mechanical systems in terms of DO transfer.

Keywords: mechanical aerator, dissolved oxygen (DO), paddle wheel number, Standard Aeration Efficiency (SAE), Standard Oxygen Transfer (SOTR)

Language: Spanish

Open Access



© The authors; licensee: Revista INGENIERÍA. ISSN 0121-750X, E-ISSN 2344-8393

Cite this paper as: C. Blanco-Zúñiga, D. Useche de Vega, N. Rojas-Arias "Efecto de la potencia y número de aspas de un aireador rotativo sobre la transferencia de oxígeno disuelto en agua". *Ingeniería*, Vol. 27, Num. 1, 2021. pp:pp. doi: 10.14483/23448393.17467

T1 Introducción

El oxígeno disuelto (OD) es el parámetro fisicoquímico más importante referente a la calidad del agua debido a que este gas es fundamental para la supervivencia y desarrollo de los organismos acuáticos aerobios. La ausencia de este en el agua se puede presentar por diferentes circunstancias entre las cuales se tiene: aumento de la temperatura, exceso de materia orgánica, exceso de plantas acuáticas, o descomposición descontrolada de organismos acuáticos bajo escenarios de alta toxicidad, entre otros [1]. En el tratamiento de aguas residuales, el OD influye considerablemente en los procesos biológicos aeróbicos ya que este gas es utilizado por los microorganismos como aceptor de electrones durante la reducción de la materia orgánica y para la posterior generación de nuevos microorganismos, manteniendo el tratamiento funcional a lo largo del tiempo [2]. Existen diferentes mecanismos y procedimientos que permiten transferir OD al agua, como son los aireadores de superficie, los aireadores de cepillos o aspas de rotación horizontal y la inyección directa de burbujas [3]. Todos estos sistemas presentan diferentes tasas de transferencia y consumos energéticos en función de su operación y geometría [2]; sin embargo, no existen estudios recientes que propongan nuevas alternativas frente a la transferencia de OD de manera más eficiente desde un punto de vista energético. Este vacío de nuevo conocimiento científico en el área del tratamiento del agua, sumado a la problemática mundial de la desoxigenación de cuerpos de agua por efecto del cambio climático [4-6], hacen que este tema tome nuevamente importancia, por los graves efectos

observados sobre diferentes ecosistemas acuáticos [7]. Por otra parte, el crecimiento poblacional también va a ejercer una mayor presión sobre los actuales sistemas de tratamiento de aguas residuales, los cuales dependen de la transferencia de OD como alternativa de restauración parcial de efluentes contaminados con aguas residuales.

La pérdida de OD bajo diferentes escenarios en sistemas acuáticos se ha convertido en un tema de importancia durante el tratamiento y la restauración de cuerpos de agua; específicamente en lo referente a los sistemas, procesos y mecanismos utilizados para la transferencia del oxígeno disuelto (OD), donde se carece de este.

Con el objetivo de solucionar esta problemática, se han venido desarrollado diferentes equipos y procedimientos en busca de transferir de forma eficiente el OD con fines de tratamiento de aguas residuales, oxigenación de cuerpos de agua naturales o artificiales, y aquellos destinados a procesos de acuicultura [8-11]. La función que cumplen los sistemas aireadores rotacionales es aumentar el área interfacial entre el agua y el aire, mejorando así la transferencia de oxígeno atmosférico y la circulación del agua previniendo la estratificación [12]. El impacto de las aspas sobre el agua rompe el equilibrio de la interfase aire-agua permitiendo el atrapamiento de aire en forma de burbujas [13], generando el transporte de las mismas dentro del cuerpo de agua, favoreciendo la difusión de oxígeno y generando turbulencia a medida que estas ascienden nuevamente a la superficie [14].

En la práctica de la acuicultura, los aireadores de rueda de aspas y los aireadores en espiral son los dispositivos más utilizados en la transferencia de OD [15]; no obstante, la etapa de aireación es el tercer costo más grande en el sistema de acuicultura intensiva después del levante de larvas y de la alimentación, representando el 15 % del costo total de producción [16]. El aireador mecánico horizontal utilizado en plantas de tratamiento de agua residual está conformado por un motor eléctrico anclado a una caja de transferencia reductora y un eje central en el cual se encuentran adheridas aspas (paletas, cerdas, ángulos o láminas), las cuales giran a una velocidad constante. La rotación y el impacto sobre la superficie del líquido generan las condiciones necesarias para transferir el oxígeno atmosférico dentro del cuerpo de agua [17]. Sin embargo, el consumo energético requerido en este proceso es elevado y representa entre 50 y 90 % de la energía total utilizada durante la restauración del cuerpo de agua [18]. Por otra parte, la transferencia de OD también puede ser afectada por factores físicos, ambientales, y microbianos, los cuales dificultan y reducen la eficiencia del proceso [19, 20].

Dentro de todos los equipos disponibles para la aireación, los aireadores mecánicos de eje horizontal han presentado una gran eficiencia durante el proceso de transferencia de OD, logrando valores entre 1,5 y 2,1 $\text{kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ en condiciones estándar y 0,5 y 1,1 $\text{kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ en condiciones de campo [3]. Algunos datos compilados por [16] presentan resultados de SOTR y SAE en el rango de 2,6 - 5,0 $\text{kgO}_2 \cdot \text{h}^{-1}$ y 3.485 - 3.351 $\text{kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ para sistemas aireadores de 1 kW y 2 kW respectivamente, utilizados en acuicultura. Otros estudios revelan que la entrada de oxígeno al agua (SOTR) a partir de la implementación de aireadores de rueda de aspas presenta valores en el rango de 1,8 - 3,1 $\text{kgO}_2 \cdot \text{h}^{-1}$ y la SAE en el rango de 0,91 - 1,41 $\text{kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ [21]. Los trabajos realizados por [22-25] mencionan que los aireadores de rueda de aspas son los sistemas más eficientes en términos de la SAE, estableciendo un rango entre 1,1 - 3,0 $\text{kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

En un aireador mecánico de eje horizontal las características físicas del sistema, así como el tipo, la forma y la geometría de las aspas utilizadas, además de los parámetros de operación, representan un factor crucial durante el proceso de transferencia de OD [20], p. ej. la aplicación de aspas de un mayor tamaño requerirá de un mayor consumo de potencia, debido a la fuerza de arrastre generada al momento de impactar y sumergirse dentro del cuerpo de agua, generando un mayor costo de operación del proceso. Otros parámetros como la velocidad de rotación y la profundidad de las aspas también afectan la transferencia de OD.

Por este motivo, el objetivo de este trabajo fue estudiar la influencia en la variación del número de aspas y la velocidad de rotación de un aireador mecánico de eje horizontal en la eficiencia energética y la transferencia de oxígeno atmosférico a un cuerpo de agua carente de oxígeno disuelto. Los ensayos fueron realizados a escala laboratorio, permitiendo controlar factores externos que pueden afectar la veracidad de los ensayos, enfocándose principalmente en el efecto de la potencia consumida, el número de aspas y la velocidad de rotación.

T1 Materiales y detalles experimentales

Mediante diseño e impresión 3D se construyeron tres discos en material PETG (tereftalato de polietileno glicol) conformados por 6, 12 y 24 aspas respectivamente. Todos los discos fueron constituidos por aspas planas de 7 cm de largo, 4 cm de ancho y 3 mm de espesor. La profundidad de inmersión del aspa fue de 7 cm y el diámetro total del disco se estableció en 20 cm. Los discos fueron acoplados a un eje de aluminio de 9,9 mm de diámetro, conectado a un motorreductor con capacidad de rotación máxima de 110 RPM. Se instalaron dos rodamientos metálicos en los extremos del eje propulsor para reducir la influencia de la fricción. El sistema mecánico fue adaptado en un recipiente con capacidad de 30 L donde se introdujo una muestra de agua anóxica de 21 L con la finalidad de evitar pérdidas por salpicaduras laterales, producto de la rotación y el impacto de las aspas sobre la superficie del agua. La Figura 1 muestra un esquema del sistema utilizado en este estudio, conformado por un disco de 24 aspas. La misma configuración se utilizó para los discos de 6 y 12 aspas.

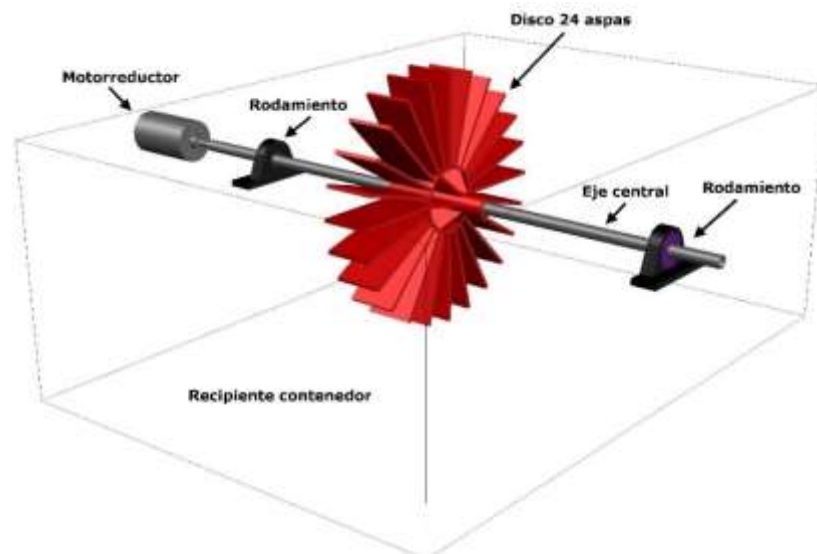
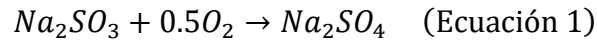


Figura 1. Esquema del aireador mecánico de eje horizontal utilizado en este estudio

Todos los ensayos se realizaron en condiciones controladas, utilizando muestras de agua potable de 21 L a las cuales se les generaron condiciones anóxicas agregando 1,60 g de sulfito de sodio (Na_2SO_3) y 0,005 g de cloruro de cobalto (CoCl_2) como agente catalizador [11, 26]. La reacción del sulfito de sodio con el OD del agua produce sulfato de sodio (Na_2SO_4), removiendo por completo el OD presente en el agua (Ecuación 1). El área del recipiente utilizado se estableció en $0,1924 \text{ m}^2$ y una profundidad del agua de $0,109 \text{ m}$.



Para todos los ensayos se estableció una concentración de saturación inicial de OD de $7,45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para una temperatura del agua de 15°C , siendo esta la temperatura de trabajo utilizada para todas las mediciones, y presión atmosférica de 740 hPa a una altura de 2.800 msnm . Este valor fue determinado por medio de oxímetro electrónico Hach Flexi HQ30d [27, 28]. La velocidad de rotación del motorreductor fue controlada por medio de una fuente de voltaje regulada DC, implementando valores de 3, 6, 9 y 12 voltios. La rotación y potencia consumida de todo el sistema fue medida durante el transcurso de la experimentación, verificando la potencia real consumida, mediante el uso de una fuente regulada en DC. El tamaño del recipiente, así como la geometría de los discos, generaron baja salpicadura, evitando las pérdidas del fluido por efecto de derrames, poco eficaces en los procesos de transferencia de OD [29, 30].

El proceso de transferencia de OD producto del impacto y de la rotación de las aspas sobre la superficie del agua fue monitoreado en intervalos de 3 a 5 minutos, dependiendo de la velocidad de rotación de los discos, hasta lograr un estado de saturación correspondiente al 98 % de la concentración, siendo este valor equivalente a $7,30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [26]. Las mediciones de OD fueron realizadas utilizando dos oxímetros, dispuestos a una profundidad de 5 cm e insertados en las esquinas opuestas del recipiente contenedor con la finalidad de reducir la incertidumbre durante la recolección de datos. Se establecieron cuatro réplicas, para asegurar validez y replicabilidad de la experimentación.

El método utilizado para el análisis de los datos de transferencia de OD se basó en el modelo de regresión no lineal, el cual es un método de mínimos cuadrados que reduce el error entre los datos modelados y los datos medidos [2, 26]. Este modelo hace énfasis en que solo los valores de oxígeno disuelto obtenidos durante la etapa de reoxigenación se deben utilizar para el análisis de los datos. Por otra parte, si los datos contienen muchas variaciones pueden ser descartados. Es necesario tener en cuenta que la concentración más baja de oxígeno disuelto no debería exceder nunca el 20 % de la concentración de saturación de oxígeno disuelto, y la más alta concentración no debe ser inferior al 98 % de la saturación de concentración de oxígeno disuelto [26]. La teoría básica utilizada en el estándar está referenciada como “teoría de la doble película” [31] en la que se establece que la tasa de transferencia puede expresarse en términos de un coeficiente de transferencia general y de resistencias a cada lado de la interfaz aire-agua. La transferencia se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_\infty - C) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$K_L a$ = Coeficiente de transferencia de masa volumétrico (1/t).

C_∞^* = Concentración final promedio de OD alcanzada en un tiempo infinito (mg/L).

C = Concentración promedio efectiva de OD en la fase líquida.

La forma integrada se convierte en:

$$\ln \frac{C_\infty^* - C_0}{C_\infty^* - C} = K_L a (t - t_0) \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$C = C_\infty^* - (C_\infty^* - C_0) \cdot \exp[K_L a (t - t_0)] \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

C_0 = Concentración inicial de OD, cuando $t = t_0$.

Las ecuaciones 3 y 4 se utilizan para pruebas en agua limpia en estado no estacionario, para determinar la capacidad de transferencia de diferentes equipos de aireación. Teniendo en cuenta que la temperatura del agua puede variar al momento de realizar la experimentación de transferencia de oxígeno, el coeficiente de transferencia de masa volumétrico $K_L a$ siempre debe ser convertido a temperatura estándar ($t = 20^\circ \text{C}$) por medio de la siguiente ecuación:

$$K_L a_{20} = K_L a \cdot 1,024^{(20-t)} \quad (\text{Ecuación 5})$$

La tasa de transferencia estándar de oxígeno (Standard Oxygen Transfer Rate - SOTR₂₀ $\text{kgO}_2 \cdot \text{h}^{-1}$) señala la cantidad de oxígeno transferido por hora en condiciones estándar, y se puede calcular con base en la siguiente ecuación:

$$\text{SOTR} = K_L a_{20} \cdot C_{s,20} \cdot V \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

$K_L a_{20}$ = Coeficiente de transferencia de masa volumétrico (1/t), a una temperatura de 20°C .

$C_{s,20}$ = Concentración de saturación para un estado estable a una temperatura de 20°C .

V = Volumen del líquido.

La eficiencia estándar de aireación (Standard Aeration Efficiency - SAE) es expresada como la transferencia de oxígeno por unidad de potencia ($\text{kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), tal y como se señala en la siguiente ecuación:

$$\text{SAE} = \frac{\text{SOTR}}{\text{Potencia de entrada}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

SOTR = Tasa de transferencia estándar de oxígeno ($\text{kgO}_2 \cdot \text{h}^{-1}$).

Potencia de entrada = Potencia consumida en kilovatios (kW).

La potencia en vatios (w) del motorreductor fue calculada como el producto de la tensión eléctrica (voltaje) multiplicada por la intensidad de la corriente eléctrica (amperaje); con base en la siguiente ecuación:

$$P = V \cdot A \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

P = Potencia expresada en vatios (w).

V = Voltaje.

A = Amperaje.

Para el desarrollo de esta investigación se realizó la correspondiente corrección por variación de la temperatura del agua.

T1 Resultados y discusión

La Figura 2 muestra la variación del porcentaje de concentración de OD transferido para cada uno de los sistemas trabajados.

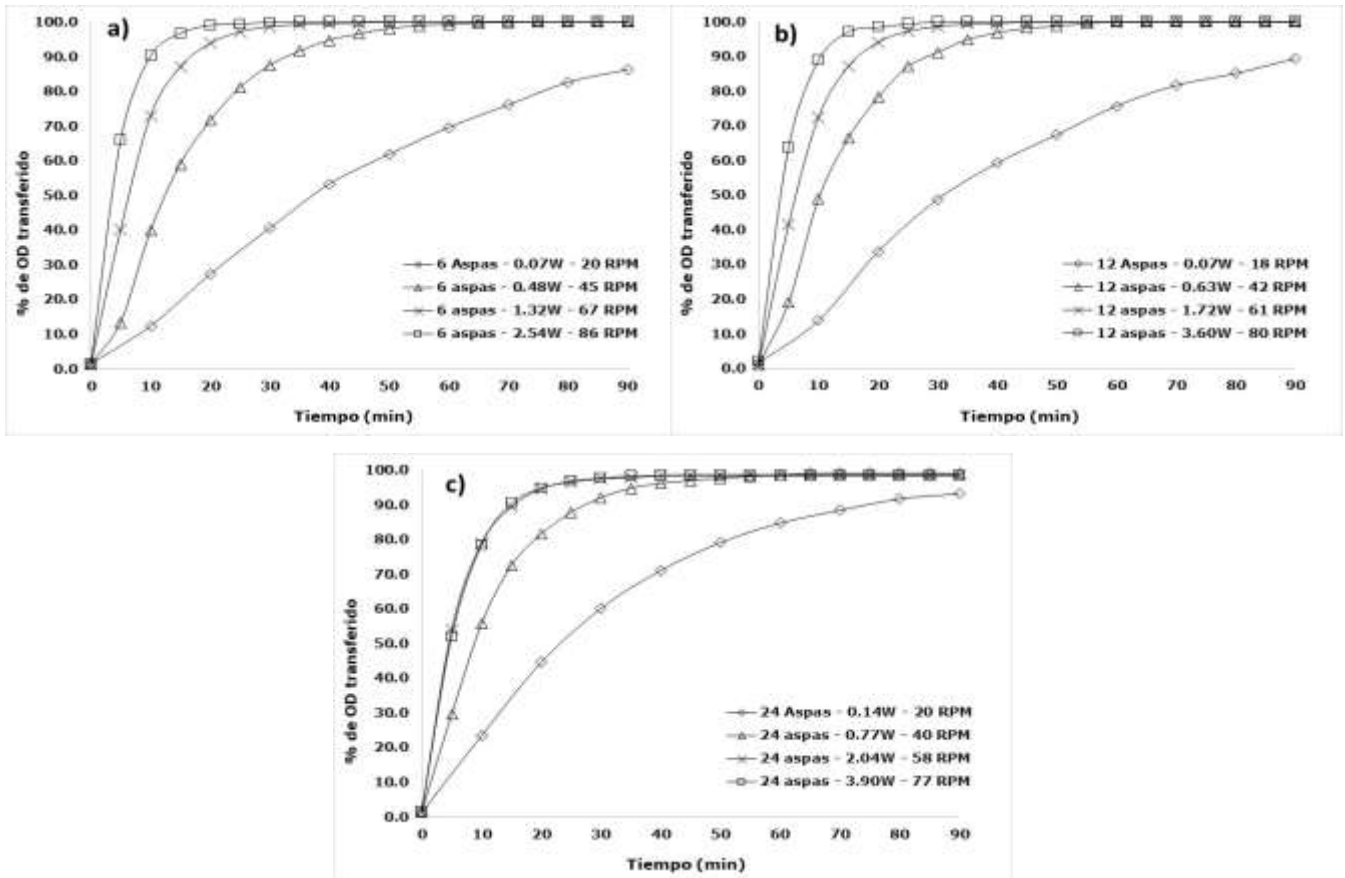


Figura 2. Comportamiento en la transferencia de OD para los discos aireadores a) 6 aspas, b) 12 aspas y c) 24 aspas

La Figura 2a muestra una reducción del tiempo requerido para llegar al punto de saturación máxima al incrementar la potencia suministrada al sistema, alcanzando este punto a los 20 minutos de iniciado el proceso de aireación. Por el contrario, el peor comportamiento fue observado al utilizar la potencia más baja, en la que fueron necesarios 240 minutos para alcanzar la saturación de la muestra (no señalados en la gráfica). De manera general, para la potencia suministrada de 0,48 W, 1,32 W y 2,54 W se observó una saturación superior al 85 % en los primeros 30 minutos de operación. Este comportamiento también pudo observarse para el sistema conformado por un disco de 12 aspas, como se presenta en la Figura 2b. Se observó un aumento en el consumo de energía por el sistema, debido al incremento del número de aspas, las cuales presentan mayor resistencia al desplazarse

dentro del agua, lo que se traduce en un incremento en la potencia [32].

La Figura 2c presenta el porcentaje de concentración de OD transferido al agua durante el proceso de agitación para el disco conformado por 24 aspás. Se observó que las potencias de 2,04 W y 3,90 W presentan un comportamiento similar, por lo que se infiere que existe una velocidad máxima de transferencia de oxígeno al agua, la cual es independiente de la velocidad de rotación de las aspás y del número de impactos sobre la superficie. Para este caso específico, se presume que las aspás consumen una mayor cantidad de energía debido a la resistencia asociada a su desplazamiento durante el momento de la inmersión. Esta energía consumida no se ve reflejada en una mayor velocidad de transferencia de OD.

En todos los casos de estudio, los porcentajes más altos de transferencia de OD fueron generados durante las primeras etapas de aireación. Esto se debió a que existe una mayor diferencia entre la presión parcial del oxígeno atmosférico con respecto al OD presente en el agua anóxica [27, 29]. A medida que ocurre el proceso de transferencia de OD, la diferencia de presión es regulada, generando así un comportamiento tipo Arrhenius, donde la transferencia de OD se va reduciendo gradualmente hasta obtener un valor de saturación máximo, cercano al valor de concentración de OD original [28, 32].

Los valores de SOTR y SAE fueron determinados teniendo en cuenta la corrección de los valores de $K_L a$ por medio del método de regresión no lineal, permitiendo establecer la transferencia de OD en función del consumo energético [26]. La Figura 3a presenta la SOTR, expresada como la cantidad de kg de OD transferido por unidad de tiempo (h), para cada una de las condiciones analizadas.

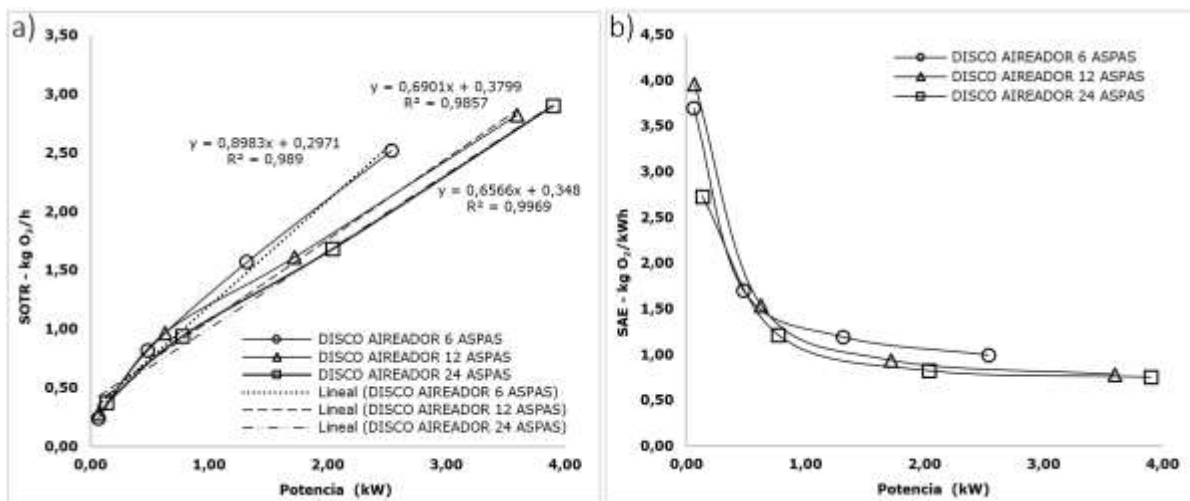


Figura 3 a) SOTR para los discos de 6, 12 y 24 aspás en función de la potencia (W), b) SAE para los discos de 6, 12 y 24 aspás en función de la potencia (W)

Se observa que el dispositivo conformado por 6 aspás presenta el mejor comportamiento SOTR frente a la transferencia de OD para cada una de las condiciones estudiadas. La aplicación de un sistema con una menor cantidad de aspás permite una reducción en la resistencia y fuerza de arrastre del asa al desplazarse dentro del agua, favoreciendo un menor consumo de energía [30, 33]. Por otra parte, a partir de los resultados obtenidos en este trabajo se infiere que el número de impactos que pueden generar las aspás sobre la superficie del agua no es una variable que se relacione directamente con una transferencia

eficiente de OD desde el punto de vista energético.

A partir de los análisis realizados puede observarse que, para un valor de potencia equivalente a 2,5 kW, la SOTR generada por el disco de 6 aspas será un 20,4 % y 27,6 % más alto que aquel generado por los discos de 12 y 24 aspas, respectivamente. Esta situación confirma que un aumento en el número de aspas es un parámetro de diseño que influye determinadamente sobre la tasa y la velocidad de transferencia de OD, penalizando el sistema por un mayor requerimiento de energía asociada a la inmersión y al desplazamiento del agua a medida que las aspas rotan.

La Figura 3b muestra los valores de SAE en función de la potencia suministrada obtenidos en este trabajo para los dispositivos de 6, 12 y 24 aspas. A medida que incrementa la potencia suministrada al sistema, los valores de SAE disminuyen, es decir, aunque un incremento en la velocidad de rotación del sistema de aireación favorece una mayor tasa de transferencia de OD en el cuerpo de agua, el consumo energético se ve altamente perjudicado. El análisis de este parámetro es muy importante, ya que define qué tan eficaz es el sistema al momento de transferir OD, así como su relación con la potencia consumida. Los valores más altos se obtuvieron para los discos de 12 aspas ($3,96 \text{ kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) y 6 aspas ($3,69 \text{ kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$). Por otra parte, el disco de 24 aspas presentó el menor valor, establecido en $2 \text{ kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. Los altos valores de SAE no necesariamente se traducen en una alta tasa de transferencia de OD; por el contrario, la velocidad con la cual el OD se transfiere se ve drásticamente reducida, requiriendo una mayor cantidad de tiempo para alcanzar el estado de saturación.

La Figura 4a muestra la relación entre los coeficientes K_{La} (h^{-1}) en función de las RPM generadas por el sistema aireador. Se puede observar que los valores más bajos de K_{La} se obtienen para el disco de 6 aspas; sin embargo, la velocidad de rotación es más alta (86 RPM) en comparación con los datos obtenidos para los discos de 12 y 24 aspas (80 y 77 RPM). Por otra parte, los valores más altos de K_{La} se obtuvieron con el disco de 24 aspas, debido a que este valor depende del número de aspas utilizadas como lo reporta [34]; no obstante, la SAE presentó valores inferiores en relación con los obtenidos para los discos de 6 y 12 aspas, demostrando que un valor alto del coeficiente K_{La} no necesariamente se verá reflejado como un valor alto de la SOTR.

Los valores altos del coeficiente K_{La} obtenidos para el disco de 24 aspas pueden estar íntimamente relacionados con la intensidad y la cadencia de los impactos individuales provocados por las aspas durante el proceso de rotación [34]. La Figura 4b presenta la relación existente entre las RPM y la potencia consumida para cada uno de los sistemas estudiados. El sistema con disco de 6 aspas presenta una mayor cantidad de RPM, ya que se requiere una menor cantidad de potencia para hacer rotar el dispositivo, traducido en el consumo energético del sistema, así como una reducción en la resistencia generada por la inmersión y el arrastre generado por las aspas dentro del cuerpo de agua [30, 33]. El resumen de todos los datos del proceso de aireación obtenidos en este estudio es presentado en la Tabla I. Los datos obtenidos de potencia fueron medidos en W, pero matemáticamente son expresados en kW.

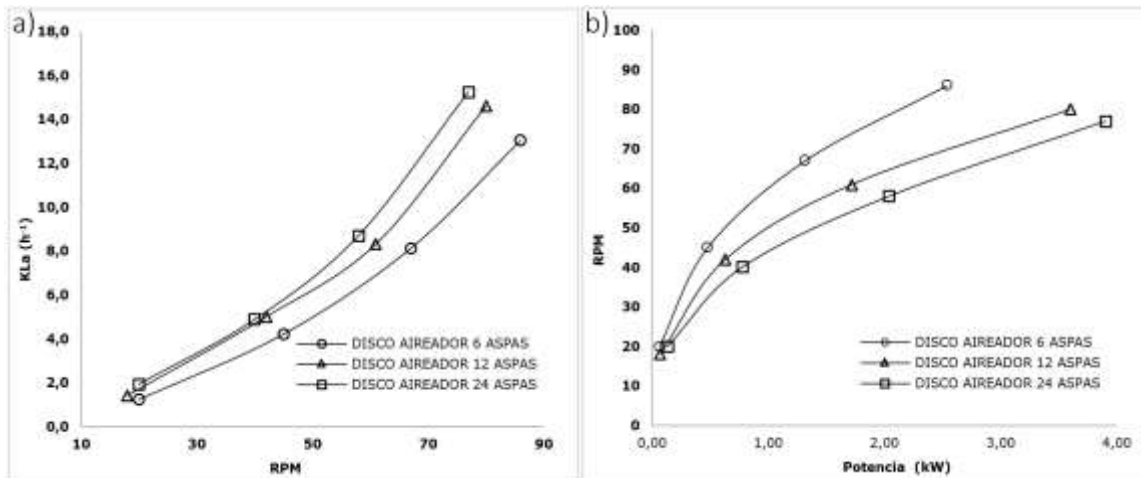


Figura 4. a) relación entre los coeficientes K_{La} (h^{-1}) y potencia (W), b) relación entre las RPM y potencia (W)

Tabla I. Valores de funcionamiento obtenidos para cada uno de los dispositivos trabajados en este estudio

Disco aireador 6 aspas				
Voltaje (V)	3	6	9	12
Amperaje (A)	0,02	0,08	0,15	0,21
Potencia (W)	0,07	0,48	1,32	2,54
RPM	20	45	67	86
K_{La} (20°C) h^{-1}	1,24	4,22	8,12	13,04
dC/dt ($g \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}$)	11,42	38,85	74,75	120,01
SOTR ($kgO_2 \cdot h^{-1}$) - 6 aspas	0,24	0,82	1,57	2,52
SAE ($kgO_2 \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$) - 6 aspas	3,69	1,7	1,19	0,99
Disco aireador 12 aspas				
Voltaje (V)	3	6	9	12
Amperaje (A)	0,02	0,11	0,19	0,3
Potencia (W)	0,07	0,63	1,72	3,6
RPM	18	42	61	80
K_{La} (20°C) h^{-1}	1,43	5,01	8,33	14,6
dC/dt ($g \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}$)	13,18	46,07	76,66	134,35
SOTR ($kgO_2 \cdot h^{-1}$) - 12 aspas	0,28	0,97	1,61	2,82
SAE ($kgO_2 \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$) - 12 aspas	3,96	1,54	0,94	0,78
Disco aireador 24 aspas				
Voltaje (V)	3	6	9	12
Amperaje (A)	0,05	0,13	0,23	0,33
Potencia (W)	0,137	0,777	2,041	3,902
RPM	20	40	58	77
K_{La} (20°C) h^{-1}	1,93	4,87	8,7	15,24
dC/dt ($g \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}$)	17,79	44,77	80,02	140,17
SOTR ($kgO_2 \cdot h^{-1}$) - 24 aspas	0,37	0,94	1,68	2,9

A partir de las observaciones hechas sobre las diferentes experimentaciones, se puede postular que la transferencia de OD mediante el uso de discos conformados por aspas se desarrolla en tres etapas, las cuales se definen como impacto, desplazamiento y salida. Al momento de impactar, el aspa rompe el equilibrio de la superficie del agua, favoreciendo el atrapamiento de aire en forma de burbujas. Esta situación puede influir de manera significativa durante el proceso de transferencia de OD, representado en los valores de los coeficientes K_{La} [13]. Durante el desplazamiento, el aspa en proceso de rotación dentro del agua genera transporte de las burbujas de aire atrapadas con anterioridad. En este momento el contacto del aire con el agua es más estrecho, favoreciendo la difusión de oxígeno dentro del cuerpo de agua. Las burbujas atrapadas también pueden generar fenómeno de turbulencia a medida que ascienden [28]. En la salida, el aspa rompe la superficie del agua de manera ascendente, generando levantamiento del agua, exponiendo parte del volumen al aire ambiente. En esta situación también puede presentarse difusión de oxígeno.

Discernir qué tanto influyen estos procesos de manera individual en la transferencia de OD puede ser muy complejo, ya que interfieren diferentes situaciones que dificultarían el correspondiente análisis. Entender cómo se lleva a cabo la transferencia de OD puede favorecer y mejorar el diseño de aireadores mecánicos haciéndolos más eficaces frente a la potencia de energía consumida [18, 35].

T1 Conclusiones

En este estudio se evaluó la influencia de la potencia requerida y el número de aspas utilizando un sistema de aireación mecánico de eje horizontal. Los análisis se realizaron a partir de muestras de agua potable anóxicas, las cuales fueron sometidas en agitación por medio del sistema aireador rotacional de eje horizontal. Los resultados obtenidos muestran que el número de aspas tiene una influencia directa en la transferencia de OD. La aplicación de altas velocidades de rotación favorece una mayor tasa de transferencia del OD en el cuerpo de agua, lo cual se ve reflejado en los valores del coeficiente K_{La} (h^{-1}). Sin embargo, el aumento en la velocidad de rotación del dispositivo requirió de un mayor consumo de energía, afectando la SOTR. El aumento de la potencia consumida por el sistema, requerida para mantener una rotación constante, generó una disminución en estos valores, penalizando el sistema aireador.

Los valores más altos del coeficiente K_{La} fueron de 15,24, 14,60 y 13,04, obtenidos para los discos de 24, 12 y 6 aspas, respectivamente. Por otra parte, los valores más altos de la SOTR fueron 2,90, 2,82 y 2,52 $\text{kgO}_2 \cdot \text{h}^{-1}$ para los discos de 24, 12 y 6 aspas. Por último, los valores más altos de SAE fueron de 0,99, 0,78 y 0,75 $\text{kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ para los discos de 6, 12 y 24 aspas. Esto último demuestra que el proceso más eficiente fue alcanzado por el dispositivo de 6 aspas obteniendo los mejores valores en cuanto a SOTR y SAE se refiere. A partir de las proyecciones lineales de la SOTR, se pudo establecer que, para una potencia de 2,5 kW, el disco de 6 aspas es 20,4 y 27,6% más efectivo comparado con los discos de 12 y 24 aspas, respectivamente. Esta investigación puede mejorar el entendimiento del funcionamiento de estos sistemas de aireación, favoreciendo el desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a tratamientos del agua que requieren procesos de reoxigenación.

T1References

- [1] X. Yang, X. Wu, H. Hao, and Z. He, "Mechanisms and assessment of water eutrophication", *J. Zhejiang Univ. Sci. B*, vol. 9, no. 3, pp. 197-209, 2008. <http://doi.org/10.1631/jzus.B0710626>
- [2] J. A. Rojas Romero, *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*, 3^a. ed., Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010.
- [3] G. Tchobanoglous, F. L. Burton, and H. D. Stensel, *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, 4th Ed., Columbus, OH, USA: McGraw Hill, 2003.
- [4] K. H. Nicholls, "Effects of temperature and other factors on summer phosphorus in the Inner Bay of Quinte, Lake Ontario: Implications for Climate Warming", *J. Great Lakes Res.*, vol. 25, no. 2, pp. 250-262, 1999. [http://doi.org/10.1016/S0380-1330\(99\)70734-3](http://doi.org/10.1016/S0380-1330(99)70734-3)
- [5] N. Ozaki, T. Fukushima, H. Harasawa, T. Kojiri, K. Kawashima, and M. Ono, "Statistical analyses on the effects of air temperature fluctuations on river water qualities", *Hydrol. Process.*, vol. 17, no. 14, pp. 2837-2853, 2003. <http://doi.org/10.1002/hyp.1437>
- [6] B. M. McGill, Y. Altchenko, S. K. Hamilton, P. K. Kenabatho, S. R. Sylvester, and K. G. Villholth, "Complex interactions between climate change, sanitation, and groundwater quality: A case study from Ramotswa, Botswana", *Hydrogeol. J.*, vol. 27, no. 3, pp. 997-1015, 2019. <http://doi.org/10.1007/s10040-018-1901-4>
- [7] Australian Academy of Science, *Investigation of the Causes of Mass Fish Kills in the Menindee Region NSW over the summer of 2018-2019*, 2019.
- [8] L. D. Dien, L. H. Hiep, S. J. Faggotter, C. Chen, J. Sammut, and M. A. Burford, "Factors driving low oxygen conditions in integrated rice-shrimp ponds", *Aquaculture*, vol. 512, 2019. <http://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734315>
- [9] G. Kumar *et al.*, "Economics of alternative catfish production technologies", *J. World Aquac. Soc.*, vol. 49, no. 6, pp. 1039-1057, 2018. <http://doi.org/10.1111/jwas.12555>
- [10] Y. Du, F. Chen, L. Zhou, T. Qiu, and J. Sun, "Effects of different layouts of fine-pore aeration tubes on sewage collection and aeration in rectangular water tanks", *Aquac. Eng.*, vol. 89, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102060>
- [11] L. Uby, "Next steps in clean water oxygen transfer testing - A critical review of current standards", *Water Res.*, pp. 415-434, 2019. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.063>
- [12] C. E. Boyd and D. J. Martinson, "Evaluation of propeller-aspirator-pump aerators", *Aquaculture*, vol. 36, no. 3, pp. 283-292, 1984. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(84\)90243-6](https://doi.org/10.1016/0044-8486(84)90243-6)
- [13] L. Tian, Z. Xu, L. Chen, Y. Liu, and T. Zhang, "Study on oxygen gas holdup and kinetics using various types of paddles during marmatite leaching process", *Hydrometallurgy*, vol. 180, pp. 158-171, 2018. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.06.011>
- [14] C. D. DeMoyer, E. L. Schierholz, J. S. Gulliver, and S. C. Wilhelms, "Impact of bubble and free surface oxygen transfer on diffused aeration systems", *Water Res.*, vol. 37,

- no. 8, pp. 1890-1904, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00566-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00566-3)
- [15] M. Tanveer, S. M. Roy, M. Vikneswaran, P. Renganathan, and S. Balasubramanian, "Surface aeration systems for application in aquaculture: A review", *Int. J. Fish. Aquat. Stud.*, vol. 6, no. 5, pp. 342-347, 2018, [Online]. <http://www.fisheriesjournal.com/archives/2018/vol6issue5/PartE/6-5-23-591.pdf>
- [16] A. Kumar, S. Moulick, and B. C. Mal, "Selection of aerators for intensive aquacultural pond", *Aquac. Eng.*, vol. 56, pp. 71-78, 2013. <http://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.05.003>
- [17] C. M. Barreto *et al.*, "Sidestream superoxygenation for wastewater treatment: Oxygen transfer in clean water and mixed liquor", *J. Environ. Manage.*, vol. 219, pp. 125-137, 2018. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.035>
- [18] J. Daw, K. Hallett, J. DeWolfe, and I. Venner, "Energy Efficiency Strategies for Municipal Wastewater Treatment Facilities", Technical Report NREL/TP-7A30-53341 January 2012. Golden, Colorado, USA, 2012.
- [19] Y. Qiu *et al.*, "Optimal surface aeration control in full-scale oxidation ditches through energy consumption analysis", *Water*, vol. 10, no. 7, 2018. <http://doi.org/10.3390/w10070945>
- [20] S. Bahri, R. P. A. Setiawan, W. Hermawan, M. Zairin Junior, "Design and simulation of paddle wheel aerator with movable blades", *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 994-999, 2015. [Online]. <https://www.ijert.org/design-and-simulation-of-paddle-wheel-aerator-with-movable-blades>
- [21] F. Rajts, and C. C. Shelley, "Guidelines for managing aeration and water quality in fishponds in Bangladesh", *WorldFish*, 2020.
- [22] R. Alonso-Rodríguez, and F. Páez-Osuna, "Nutrients, phytoplankton and harmful algal blooms in shrimp ponds: A review with special reference to the situation in the Gulf of California", *Aquaculture*, vol. 219, no. 1-4, pp. 317-336, 2003. [http://doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00509-4](http://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00509-4)
- [23] A. Rappaport, S. Sarig, and M. Mareck, "Results of Test of Various Aeration Systems on the Oxygen Regime in Genosar Experimental Ponds and Growth of Fish Therein", *Bamidgeh*, vol. 28, no. 3, pp. 35-49, 1976.
- [24] T. B. Lawson, *Fundamentals of Aquacultural Engineering*, New York, NY, USA: Chapman & Hall, 1995.
- [25] J. Colt, and C. Orwicz, "Aeration in intensive culture", In: D. E. Brune, and J. R. Tomasso (Eds.), *Aquaculture and Water Quality, Advances in World Aquaculture*, vol. 3. pp. 198-271, Baton Rouge, LO, USA: World Aquaculture Society, 1991.
- [26] American Society of Civil Engineers, *Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water (Asce/Ewri Standard 2-06)*, New York, NY, USA: ASCE, 2007.
- [27] R. Sander, "Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent", *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 15, pp. 4399-4981, 2015.
- [28] C. R. Blanco-Zuñiga, N. Rojas-Arias, L. Y. Peña-Pardo, M. E. Mendoza Oliveros y S. A. Martinez Ovalle, "Estudio de la influencia de arcillas en la transferencia de oxígeno

disuelto en agua”, Ingeniería, vol. 26, no. 1, pp. 5-14, 2021. <https://doi.org/10.14483/23448393.15846>

- [29] H. A. Abdelrahman, and C. E. Boyd, “Effects of mechanical aeration on evaporation rate and water temperature in aquaculture ponds”, *Aquac. Res.*, vol. 49, no. 6, pp. 2184-2192, 2018. <https://doi.org/10.1111/are.13674>
- [30] S. Bahri, Jufriadi, and H. Anwar, “The Ineffectiveness of Water Splash on Paddlewheel Aerator”, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 268, 2019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/268/1/012162>
- [31] W. Lewis, and W. G. Whitman, “Principles of gas absorption”, *Ind. Eng. Chem.*, vol. 16, no. 12, pp. 1215-1220, 1924. <https://doi.org/10.1021/ie50180a002>
- [32] A. Bahadori, and H. B. Vuthaluru, “Simple Arrhenius-type function accurately predicts dissolved oxygen saturation concentrations in aquatic systems”, *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 88, no. 5, pp. 335-340, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2010.05.002>
- [33] S. Bahri, R. P. A. Setiawan, W. Hermawan, and M. Zairin Junior, “Simulation on blade geometry and operational condition toward torque requirement and drag force in paddle wheel aerator”, *IJSER*, vol. 6, no. 2, pp. 812-816, 2015.
- [34] S. M. Roy, S. Moulick, and B. C. Mal, “Design characteristics of spiral aerator”, *J. World Aquac. Soc.*, vol. 48, no. 6, pp. 898-908, 2017. <https://doi.org/10.1111/jwas.12410>
- [35] T. Itano *et al.*, “Water circulation induced by mechanical aerators in a rectangular vessel for shrimp aquaculture”, *Aquac. Eng.*, vol. 85, pp. 106-113, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2019.03.006>

Cesar René Blanco Zúñiga

Ingeniero Civil de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Magíster en Ingeniería con énfasis en Medio Ambiente (École de Technologie Supérieure, Montreal, Canadá), Profesor asistente, Escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Correo electrónico: cesar.blanco@uptc.edu.co - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9181-4944>

Dalia Soraya Useche de Vega

Ingeniera Agrónoma, Especialista en Ingeniería Ambiental, Especialista en Seguridad y Salud en el Trabajo, Magíster en Ingeniería Ambiental de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Ph.D. en Agroecología de la Universidad de Antioquia. Coordinadora del Grupo de Investigación en Sostenibilidad Ambiental, Biodiversidad y Agroecología GISABA. Investigadora junior. Profesora investigadora del Departamento de Ingeniería Ambiental de la UPTC. Directora de la Escuela de Ingeniería Ambiental de la UPTC. Coordinadora de Postgrado del Área Ambiental de la Facultad de Ingeniería. Correo electrónico: dalia.useche@uptc.edu.co - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0594-023X>

Nicolás Rojas-Arias

Ingeniero Metalúrgico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Investigador con énfasis en las áreas de procesamiento de minerales en metalurgia extractiva y procesos de manufactura en el área de metalurgia física, manejo de materiales y residuos radiactivos, y diseño de materiales para la ingeniería. Estudiante de Doctorado en Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Brasil. Correo electrónico: nicolas.rojas@estudante.ufscar.br - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-2484>