

ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA EN SUPERFICIE PARA LA SIMULACIÓN HIDRODINAMICA DE LAGUNAS FACULTATIVAS SECUNDARIAS

Aponte R., A.*, Toro V., A.F.*, Dueñas G., L.E.***, Laín B., S.** y Peña V., M.R.*

* Grupo de Investigación en Saneamiento Ambiental, Instituto Cinara, Universidad del Valle

** Grupo de Mecánica de Fluidos, Universidad Autónoma de Occidente

Abstract. Se simularon dos lagunas facultativas, LF, convencionales con dos tipos de entrada. Para la superficie de LF a escala piloto se analizaron condiciones de frontera empleando el software FLUENT 6.3.26. El análisis indica que es necesario integrar elementos como las magnitudes de la velocidad, comportamiento de las líneas de corriente, estabilidad de cálculo en puntos críticos dentro de la laguna y tipo de malla de cálculo, para de esta forma conocer el tipo de frontera más adecuado en la simulación hidrodinámica de una LF. El comportamiento del fluido bajo los tres tipos de frontera fue distinto, pero además las condiciones de frontera *free slip* y *velocity inlet* se adecuaron mejor a los fenómenos reportados en una LF pues mostraron resultados más cercanos a su realidad física en cuanto a campos de velocidad en superficie y en profundidad. La selección y caracterización de una condición de frontera adecuada en función del espacio de solución de las ecuaciones del modelo matemático, la realidad física a simular y el método numérico de solución del modelo, son condiciones sin las cuales no se puede lograr una adecuada convergencia de cálculo y por ende una simulación plausible de la complejidad hidrodinámica de una LF.

Palabras clave: análisis dimensional, CFD, condiciones de frontera, lagunas facultativas secundarias.

Introducción

Las lagunas de estabilización, LE, son sistemas utilizados para transformar compuestos orgánicos presentes en aguas residuales municipales o industriales a través del control de un flujo de entrada y ciertas variables de diseño físico; así se facilita que ciertos grupos de microorganismos puedan desarrollarse bajo diversas condiciones ambientales afectando sustancias de interés sanitario (Mara, 2003). Las LE pueden ser proyectadas para la transformación de materia orgánica, reducción de riesgo sanitario y retiro de nutrientes (Mara, et al, 1992; Rose, et al, 2002). También se documentan experiencias en las que se emplean como sumideros de CO₂ (Stadmark, et al, 2005). Los principios de funcionamiento de una laguna facultativa, LF, incluyen aspectos como el uso de energía solar, la existencia de fuentes de carbono y nutrientes, la interacción de organismos, la cantidad de movimiento del fluido y el grado de contacto entre biomasa y sustrato, principalmente (Gloyne, 1971; Mara, et al, 1992; Mendoza, 2001; Banda, 2003). El comportamiento del fluido dentro de las LF es uno de los campos en los que se realiza investigación con el objetivo de mejorar su funcionamiento. La Mecánica Computacional de Fluidos, CFD, por sus siglas en inglés, aporta elementos para la comprensión del funcionamiento hidrodinámico de estos sistemas. La aplicación de CFD en el campo del tratamiento de aguas residuales por LE incluye software comerciales y desarrollo de códigos específicos (Shilton & Harrison, 2003; Beran & Kargi, 2005; Sweeney, et al, 2005; Abbas, et al, 2006) que posibilitan optimizar el estudio de estos sistemas complejos profundizando en el conocimiento de sus patrones de flujo. El desarrollo de las herramientas informáticas, tanto en hardware como en software permite simular flujos en 3 dimensiones, 3D, lo que explica mejor los fenómenos que suceden en el interior de una laguna (Shilton, 2000; Salter, et al, 2000). De otro lado, los estudios de LF empleando CFD y trazadores, indican que algunas condiciones de diseño físico como relaciones largo: ancho, formas de entrada y salida, dirección

predominante del viento o instalación de baffles o pantallas al interior de las unidades afectan los patrones de flujo y pueden favorecer o desfavorecer el funcionamiento del sistema (Shilton, 2000; Shilton & Harrison, 2003; Lloyd, *et al*, 2003). El desarrollo de software que explica la dinámica de los fluidos, ha sido utilizado para modelar las características hidrodinámicas e incluir módulos de reacciones biológicas que suceden en las LE (Wood, *et al*, 1995; Beran & Kargi, 2005; Banda, 2007). La CFD utiliza algoritmos numéricos para predecir fenómenos como el comportamiento de un fluido, la transferencia de calor, la transferencia de masa, cambios de fase, reacciones químicas, entre otros, resolviendo las ecuaciones matemáticas que gobiernan estos procesos (Fluent Inc., 2006), y asumiendo que un sistema determinado se rige por las leyes de conservación de estas características (Patankar, 1980; Bird, *et al*, 2006; Banda, 2007). En CFD las fronteras son los límites de los modelos físicos y a estas se les asignan valores iniciales para resolver las ecuaciones diferenciales que los determinan. La definición de las fronteras y las condiciones que las determinan es crucial y crítico pues se asume que lo que sucede al interior del modelo estudiado depende de ellas (Jakeman, *et al*, 2006). En este mismo orden de ideas, la geometría (modelo topológico), la malla y la definición del problema a analizar son fundamentales en el pre-proceso de CFD (Wood, *et al*, 1995). Para la definición del método de solución numérica los elementos que se tienen en cuenta en la CFD son: el modelo matemático, el método de discretización (método de diferencias finitas, método de volúmenes finitos y método de elementos finitos), el sistema de coordenadas y vectores, la malla (que define el dominio, 2D o 3D), las aproximaciones finitas, el método de solución y los criterios de convergencia (Ferziger & Peric, 2002). Para las fronteras se definen las condiciones asociadas a masa, momentum y energía de las ecuaciones diferenciales correspondientes. Cada software aborda las fronteras en forma particular, de allí que su selección deba ser acertada para obtener los resultados más próximos a la solución del problema a analizar. Fluent plantea alternativas para definir las fronteras en el modelo físico que se quiera analizar. En la modelación se hizo análisis de una de las fronteras que se considera crítica: la frontera de superficie.

Materiales y métodos

En la formulación de los modelos físicos se consideraron lagunas a escala piloto, que respondieran a flujos de carácter turbulento en la tubería de entrada, con número de Reynolds superior a 4000. En el caso del diseño de proceso se atendieron propuestas de diseño basadas en análisis de incertidumbre (Von Sperling, 1996; Banda, 2003) efectuando chequeos para condiciones de carga orgánica superficial aplicada y tiempos de retención hidráulica (Mara, 2003). Las configuraciones evaluadas se presentan en las figuras 1 y 2.

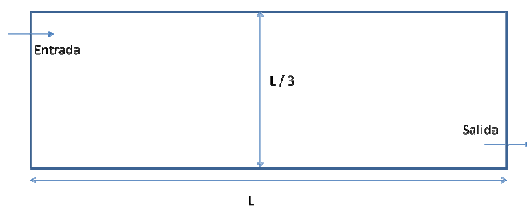


Figura 1. Laguna convencional sin baffles, entrada longitudinal

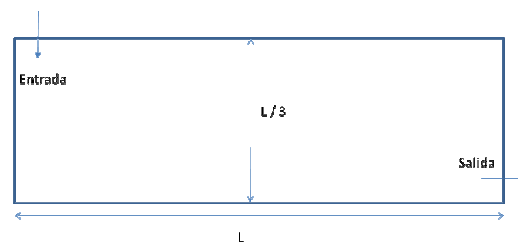


Figura 2. Laguna convencional sin baffles, entrada transversal

Se emplearon las características de diseño presentadas en la Tabla 1; el software utilizado en el estudio correspondió al FLUENT V6.3.26 de ANSYS. Las mallas fueron diseñadas utilizando el mallador Gambit 2.3.16; las principales características de las mallas diseñadas se presentan en la Tabla 2; todas fueron mallas no estructuradas, con elementos tetraédricos. El programa FLUENT fue ejecutado en un equipo Toshiba Tecra, Procesador Intel ® Core TM2 Duo CPU T8100 @ 2.10 GHz 2.09 GHz 1.99 GB de RAM.

Tabla 1. Resumen diseño modelos piloto

Variables	Unidades	Modelo	Variables	Unidades	Modelo
Caudal	L/s	0,33	Relación L/B		3,00
Temperatura	° C	25	Altura	m	1,50
Viscosidad absoluta o dinámica	kg/m*s	0,000894	Talud		1:1
Densidad	kg/m ³	997,1	Ancho espejo de agua	m	6,20
Número de Reynolds entrada		18449,79	Largo espejo de agua	m	18,60
			Volumen	m ³	120,56
			TRH (nominal)	días	4,23

Tabla 2. Información básica de las mallas modeladas

Laguna Piloto simuladas	Tipo de entrada a las lagunas	Tipo de salida de las lagunas	Tamaño de los elementos m ³ .	Número de elementos
1. Entrada longitudinal	Tubería circular	Sumergida	Min: 7.10 e ⁻⁹ - Max 2.9.e ⁻³	164.500
			Min: 3.20 e ⁻⁹ – Max 4.2.e ⁻⁴	814.200
2. Entrada transversal			Min: 4.52 e ⁻⁹ – Max 3.0.e ⁻³	165.000
			Min: 5.80 e ⁻⁹ – Max 4.48e ⁻⁴	805.000

Las condiciones de frontera evaluadas en la superficie de los modelos fueron las siguientes (Fluent Inc., 2006):

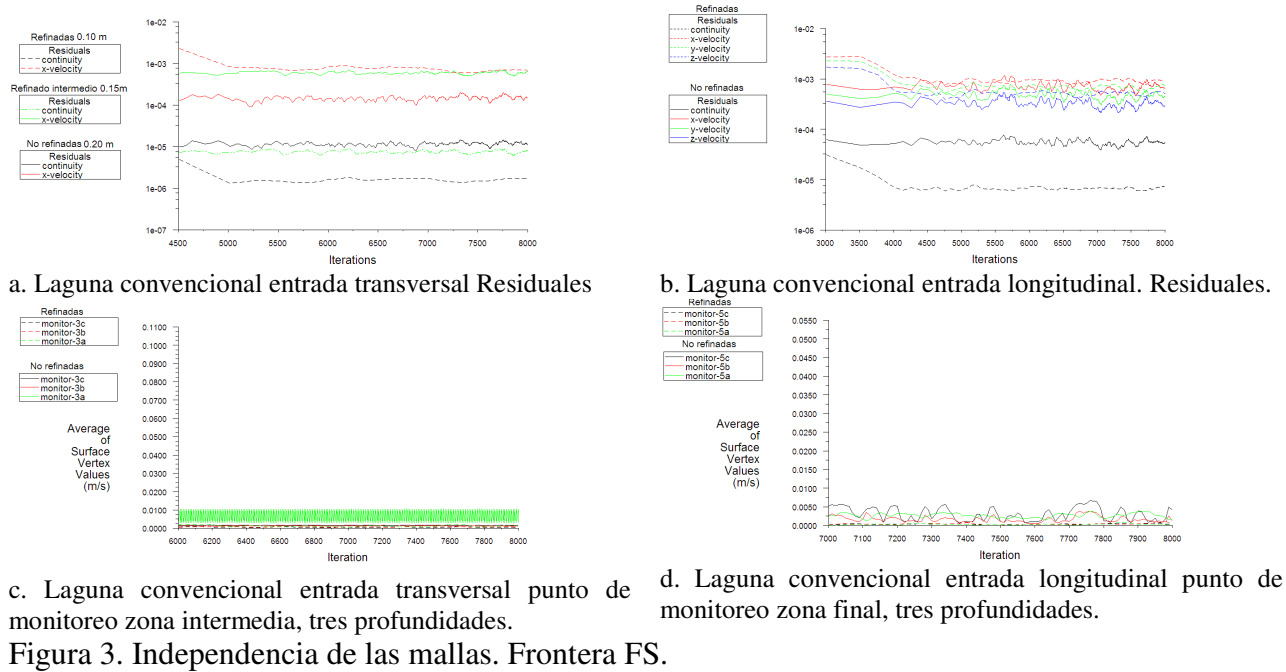
- Wall Free slip shear (FS). Considera un wall en movimiento que genera un esfuerzo cortante sobre la superficie del líquido, puede ser definida con o sin velocidad; esta velocidad puede ser traslacional o rotacional. Fluent calcula la velocidad tangencial a la frontera.
- Pressure outlet (PO). Definida como una condición de presión estática en las salidas de flujo y también otras variables escalares en caso de contraflujos. El uso de una condición de frontera de estas características en vez de una condición de salida de flujo, a menudo resulta en una mejor convergencia cuando ocurren contraflujos durante la iteración. Fluent adopta el valor de presión estática definido y extrapola las otras características a partir del interior del dominio.
- Velocity inlet (VI). Definida como las propiedades de velocidad o escalares del flujo en las fronteras de entrada. Para esta condición Fluent calcula los flujos de masa y momento a partir del componente normal de la velocidad fijada al volumen de control.

Se emplearon los módulos de cantidad de movimiento y cantidad de masa propuestos por Fluent; se empleó la versión para tres dimensiones doble precisión, 3DDP. Inicialmente se verificó la independencia de las mallas, analizando la convergencia de la modelación mediante el seguimiento de residuales, monitoreo de puntos específicos en los pilotos estudiando la variación de las velocidades y chequeando la continuidad. Con las mallas seleccionadas se analizó el comportamiento hidráulico de los pilotos simulados para cada tipo de frontera, observando la cantidad de movimiento como variable respuesta. Se adoptó como aproximación al grado de mezcla un análisis consistente en observar la magnitud de la cantidad de movimiento y la característica del flujo, líneas de corriente, y vectores. Se compararon los resultados con el comportamiento documentado para lagunas facultativas. La convergencia de los resultados para cada tipo de frontera fue analizada.

Resultados y discusión

Como se puede observar en la figura 3, las diferencias entre las mallas refinadas y las no refinadas son apreciables en sus residuales; en cuanto a los puntos de monitoreo se halló que las diferencias entre las mallas tienen una variación sensible sobre todo para el caso de la laguna convencional con

entrada transversal. La información de continuidad arrojó resultados satisfactorios en el caso de las mallas refinadas para todos los tipos de frontera. Se seleccionaron mallas refinadas para las simulaciones definitivas en el análisis de los tipos de frontera. Se graficaron mapas de contornos y velocidades en superficie, profundidad de entrada y secciones transversales con distintos rangos de velocidad para cada una de las dos configuraciones. Se analizó la convergencia de las soluciones siguiendo la metodología empleada previamente.



Laguna convencional entrada longitudinal

En el caso de las fronteras FS y VI, se observan recorridos del agua similares aunque con magnitudes bajas, como consecuencia posiblemente de las condiciones de frontera asumidas, 0 Pa para FS y 0 m/s para VI. La frontera PO, genera un efecto de flujos preferenciales con altas velocidades, explicado en parte por las bajas velocidades calculadas en la zona intermedia de toda la laguna; la forma de la laguna, talud 1:1 en estos sectores, ligada a la forma como se calculan las velocidades para esta condición de frontera, podrían ser las responsables de la distribución de velocidades en esta configuración. Ver figura 4.

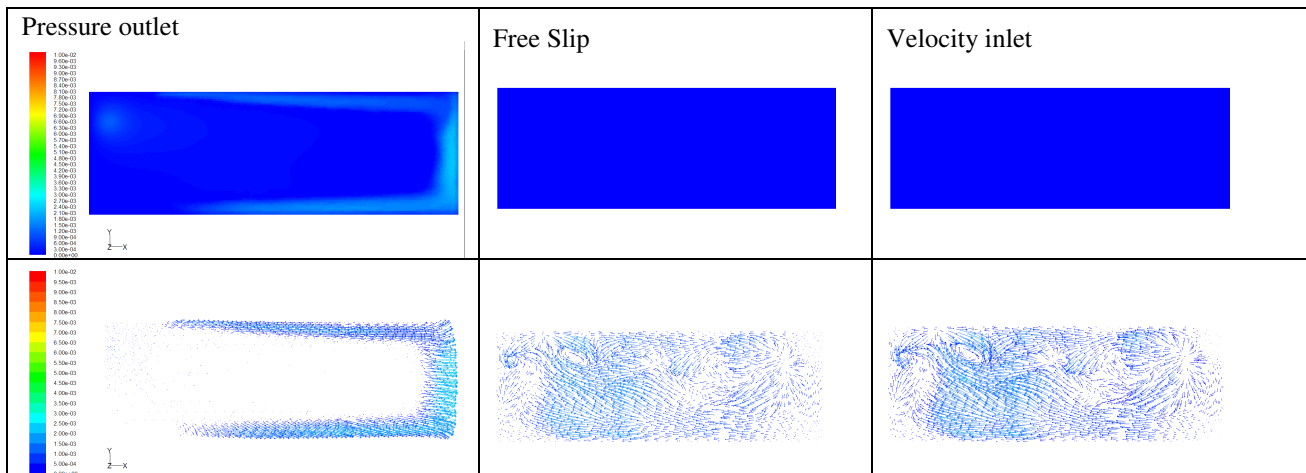


Figura 4. Laguna convencional entrada longitudinal. Contornos y vectores de velocidad en superficie, $v < 0.01\text{m/s}$

De otro lado, movimientos preferenciales del fluido en superficie tienen explicación cuando el efecto del viento es incluido en el análisis; por lo anterior, resulta poco probable un comportamiento explicado por la condición PO. En superficie se observa que las mezclas horizontales en los casos de FS y VI son superiores que en la condición de frontera PO. A la profundidad de entrada, para las fronteras FS y VI se presentan flujos rotacionales en diversas zonas de la laguna, como efecto inducido por la cantidad de movimiento a la entrada, mientras que en PO no; la salida genera un efecto de aumento de velocidades para las tres condiciones; ver Figura 5. Sin embargo, tanto en la frontera FS como en la VI las velocidades más altas se dan en la zona de entrada, generando los flujos mencionados; además se hace evidente un posible efecto de succión que se genera por la salida para estas dos fronteras; los flujos rotacionales favorecerían que el efecto de la salida sea más pronunciado que en el caso de la frontera PO, en la que las velocidades más altas se presentan en el fondo, a lo largo de la laguna. La información reportada a la profundidad de entrada del agua muestra una relativa mayor mezcla horizontal en las fronteras FS y VI respecto de la PO; se puede asumir una mayor zona muerta para la condición de frontera PO. Con base en lo anterior se presume que la mezcla horizontal es mejor en la superficie para el caso de las fronteras FS y VI que en la PO; situación que se conserva cuando se analiza la mezcla horizontal a la profundidad de entrada. De otro lado, las características de estratificación del fluido en lagunas facultativas han sido documentadas como dependientes de la temperatura (Sweeney, *et al*, 2005), sin embargo, según los resultados de la modelación para las condiciones de frontera utilizadas, este comportamiento podría también ser explicado por las condiciones de cantidad de movimiento a la entrada del agua al sistema. Analizando información de cortes transversales en longitud, se observan campos de velocidades poco homogéneos en las tres fronteras; en el caso de la frontera PO, se observa una mezcla vertical menos importante que en las otras dos fronteras. Al tener un mayor espacio para hacer disipación de la cantidad de movimiento, el fluido presenta un comportamiento donde se evidencian campos de velocidad más definidos pero que generan zonas muertas más grandes para la frontera PO.

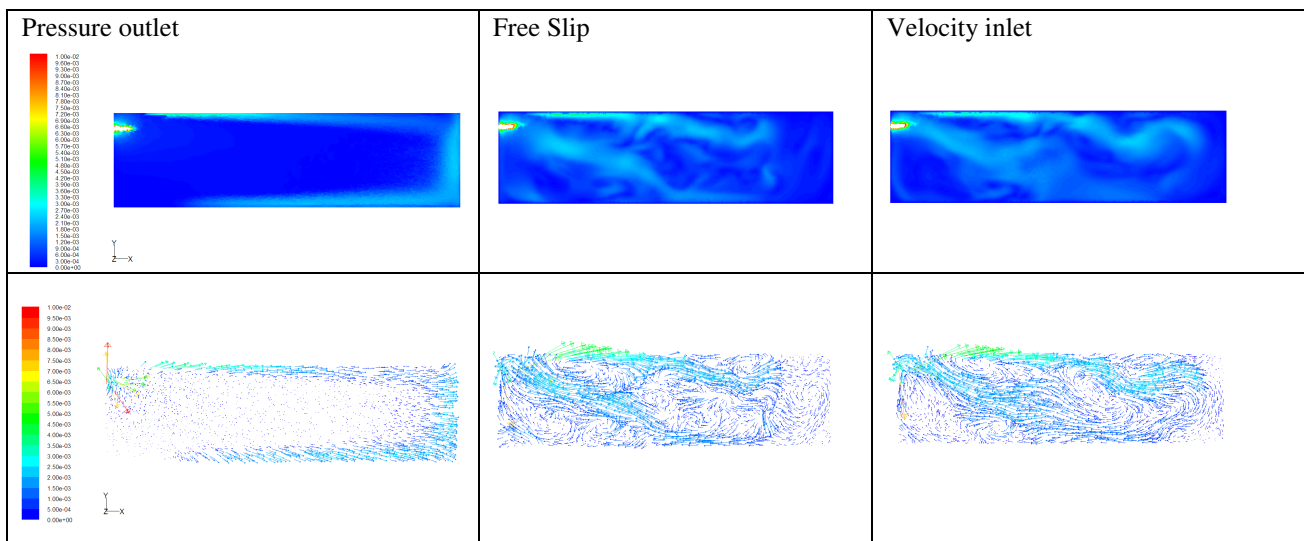


Figura 5. Laguna convencional entrada longitudinal. Contornos y vectores de velocidad a -0.75m , $v < 0.01\text{m/s}$

Laguna convencional entrada transversal

La frontera PO, genera flujo en un solo sentido, explicado en parte por las bajas velocidades calculadas en la zona intermedia de toda la laguna, con valores inferiores a 0.01 m/s sólo en el lado opuesto a la entrada del agua. En el caso de la frontera FS a la entrada se presentan zonas con velocidades altas con respecto a otras, definiendo áreas con buena mezcla horizontal. Se obtienen velocidades menores en la frontera FS que en la VI; las zonas de mezcla horizontal para la frontera

VI y para la frontera FS son similares; se aprecia que la transmisión de la cantidad de movimiento hacia la superficie para VI es superior que la transmitida para FS, pero a diferencia de la configuración anterior, los vectores de velocidad en la superficie provienen de la zona donde incide el chorro de entrada a la laguna. A pesar de que se aprecian flujos rotacionales en FS y VI, se identifican diferencias en las direcciones de flujo en algunas zonas de la laguna, siendo más notorios en la zona intermedia. A la profundidad de entrada, se observan flujos rotacionales para FS y VI, mientras que para PO no, las velocidades más altas se dan en la zona de entrada generando los flujos mencionados, pero con magnitudes superiores en el primer tercio de la laguna modelada bajo la condición VI y FS.

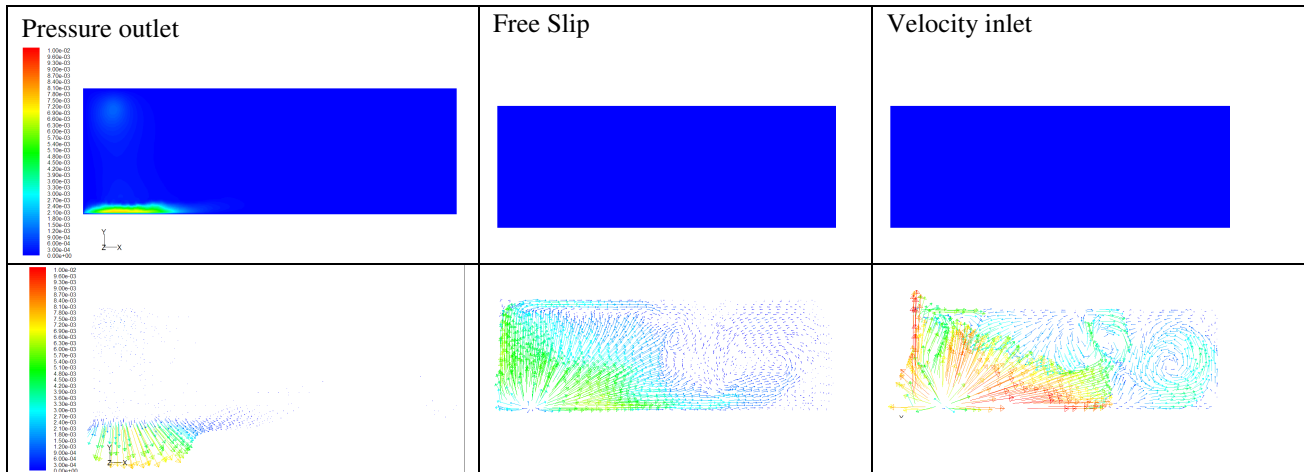


Figura 6. Laguna convencional entrada transversal. Contornos y vectores de velocidad en superficie, $v < 0.01\text{m/s}$

Se evidencia un pequeño efecto de succión que se genera por la salida para las fronteras FS y VI; la mezcla horizontal a esta profundidad es distinta para estas mismas fronteras, las magnitudes causadas por la condición de frontera VI son superiores a las condiciones FS y PO. Existe una relativa mezcla horizontal más distribuida en las fronteras FS y VI respecto de la PO, pero en el caso de la VI, con mayor magnitud en el primer tercio de la laguna; esta situación se conserva cuando se analiza la mezcla horizontal a la profundidad de entrada. Se presume una mayor zona muerta para la condición de frontera PO. El área de influencia de la cantidad de movimiento aplicada a la entrada es mayor para la condición de VI que FS y PO. Existen campos de velocidades poco homogéneos para las tres fronteras; en el caso de la frontera PO, la mezcla vertical es menos importante que en las otras dos fronteras, además, longitudinalmente no se presenta un recorrido de la onda de cantidad de movimiento que vaya de la zona intermedia, o incluso inferior, hacia la parte superior, situación que sí se presenta para las condiciones FS y VI. Hacia la parte final se aprecia cómo para el caso de FS y VI, la salida induce un campo de velocidad con repercusiones en la mezcla vertical y horizontal. Adicionalmente, se observa que las bajas velocidades inducen fenómenos de difusividad mayores en la condición de PO que en las otras dos condiciones analizadas.

Conclusiones

La definición de las condiciones de frontera en la superficie de una laguna facultativa tiene dos alternativas claramente óptimas para su simulación, la FS y la VI. Para estas condiciones, los flujos rotacionales, que son predecibles en el comportamiento hidrodinámico de LF, son visualizados claramente. Adicionalmente permitirían incluir el efecto de fenómenos como corrientes de viento sobre la superficie de una LF.

El análisis de las condiciones de mezcla por efecto de la cantidad de movimiento aplicada a la entrada de una laguna facultativa para los tres tipos de frontera, indica que la estratificación en una laguna facultativa también puede ser explicada en términos de variables hidrodinámicas, pues se generan campos de velocidad que toman caminos ascendentes, paralelos o descendentes en su interior. Adicionalmente, la estrategia de CFD hace posible establecer los aportes que desde la cantidad de movimiento y la energía se hace a la estratificación del fluido en una laguna facultativa.

De acuerdo con lo observado en las simulaciones, el efecto combinado de viscosidad y gravedad en una laguna facultativa produce zonas con regímenes de flujo laminar – subcrítico y turbulento – subcrítico, los cuales relacionan zonas transicionales y zonas con variaciones de velocidad y dirección del flujo que podrían ser interpretadas como las generadoras de la mezcla.

Es necesario analizar la confiabilidad de una solución numérica en CFD para lagunas facultativas, atendiendo criterios adicionales al de los residuales; el monitoreo de puntos estratégicos, la independencia de la solución numérica frente al diseño de las mallas y la arquitectura de las mallas son algunos de ellos.

La forma de entrada del agua en la laguna convencional, señala que el efecto sobre el comportamiento del fluido es relevante para las condiciones de frontera FS y VI, generando campos de velocidad sensiblemente diferentes, sobre todo en la vertical.

Hacia el futuro, para un análisis profundo del comportamiento de la laguna facultativa, precisar o hacer una buena selección de las condiciones de superficie es crucial, pues a través de ella el sistema recibe y libera energía, intercambia sustancias que se incorporan al fluido y se ve sometido a fenómenos que imprimen cantidad de movimiento al mismo.

Referencias

1. Abbas, H., Nasr, R., & Seif, H. (2006). Study of waste stabilization pond geometry for the wastewater treatment efficiency. *Ecological Engineering* , 28 (1), 25 - 34.
2. Banda, C. (2007). *Modern Computational Fluid Dynamics Modelling Baffled Waste Stabilization Ponds*. University of Leeds, United Kingdom, Submitted in accordance with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. School of Civil Engineering.
3. Banda, C. (2003). *Modern Design of Waste Stabilization Ponds in Warm Climates: Comparison with Traditional Design Methods*. Leeds University, United Kingdom.: Dissertation submitted in accordance with the requirements for the degree of Master of Science (Engineering) in Environmental Engineering and Project Management.
4. Beran, B., & Kargi, F. (2005). A dynamic mathematical model for wastewater stabilization ponds. *Ecological Modelling* , 181 (1), 39 - 57.
5. Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2006). *Fenómenos de transporte*. México: Limusa Wiley.
6. Ferziger, J. H., & Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Germany: Springer.
7. Fluent Inc. (2006). *FLUENT 6.3 User's Guide*. Fluent Inc.
8. Gloyna, E. (1971). *Waste Stabilization Ponds*. Geneva, Italy: World Health Organization.

9. Jakeman, J. A., Letcher, R. A., & Norton, J. P. (2006). Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environmental Modelling & Software* , 21 (5), 602 - 614.
10. Lloyd, B. J., Vorkas, C. A., & Guganesharajah, R. K. (2003). Reducing hydraulic short-circuiting in maturation ponds to maximize pathogen removal using channels and wind breaks. *Water Science and Technology* , 48 (2), 153 - 162.
11. Mara, D. (2003). *Domestic wastewater treatment in developing countries*. London, U.K., U.K.: Earthscan.
12. Mara, D., Alabaster, G., Pearson, H., & Mills, S. (1992). *Waste stabilization ponds. A design manual for eastern Africa*. (ODA, Ed.) Leeds, England: Lagoon Technology International.
13. Mendoza, S. (2001). *Sistemas de lagunas de estabilización*. Colombia: McGraw-Hill.
14. Patankar, S. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*. (T. & Francis, Ed.) USA: Hemisphere Publishing Corporation.
15. Rose, P. D., Hart, O., Shipin, O., & Ellis, P. (2002). *Integrated algal ponding systems and the treatment of domestic and industrial wastewaters Part I: The AIWPS Model*. WRC. Water Research Commission Salinity and Sustainability.
16. Salter, H. E., Ta, C. T., Ouki, S. K., & Williams, S. C. (2000). Three-dimensional computational fluid dynamic modelling of a facultative lagoon. *Water Science and Technology* , 42 (10 - 11), 335-342.
17. Shilton, A., & Mara, D. D. (2004). CFD Modelling of baffles for optimizing tropical waste stabilization pond systems. *IWA. Astee Avignon 26th of September. 1st of October 2004 Conferences*.
18. Shilton, A., & Harrison, J. (2003). *Guidelines for the Hydraulic Design of Waste Stabilisation Ponds*. (M. U. Institute of Technology and Engineering, Ed.) Palmerston North, New Zealand.
19. Shilton, A. (2000). Potential application of computational fluid dynamics to pond design. *Water Science and Technology* , 42 (10 - 11), 327 - 334.
20. Stadmark, J., & Leonardson, L. (2005). Emissions of greenhouse gases from ponds constructed for nitrogen removal. *Ecological Engineering* , 25 (1), 542 – 551.
21. Sweeney, D. G., Nixon, J. B., Cromar, N. J., & Fallowfield, H. J. (2005). Profiling and modelling of thermal changes in a large waste stabilisation pond. *Water Science & Technology* , 51 (12), 163 - 172.
22. Von Sperling, M. (1996). Design of facultative ponds based on uncertainly analysis. *Water Science & Technology* , 33 (7), 41 - 47.
23. Wood, M. G., Greenfield, P. F., Howest, T., Johns, M. R., & Keller, R. (1995). Computational Fluid Dynamic modelling of waste water ponds to improve design. *Water Science Technology* , 31 (12), pp.111 – 118.
24. Wood, M. G., Howes, T., Keller, J., & Johns, M. (1998). Two dimensional computational fluid dynamic model for waste stabilisation ponds. *Water Research* , 32 (3), 958–963.