

Estudio hidrodinámico de lagunas de estabilización implementadas en el medio rural de la zona panamericana del Estado Mérida, Venezuela.

Hydrodynamic study of stabilization ponds implemented in the rural environment of the panamerican zone of Mérida State, Venezuela

Ramírez Rodríguez, Stefanny^{1*}; Espinosa Jiménez, Carlos²; Jégat, Hervé¹; Barreto Cordero, Wilmer³

¹Departamento de Hidráulica y Sanitaria, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes.

²Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, Universidad de los Andes.

³ Universidad Católica de Temuco, Chile.

*Stefa19r@gmail.com

Resumen

El Estado Venezolano, a través de entes gubernamentales nacionales y estatales, ha construido una serie de obras de saneamiento a fin de crear las condiciones sanitarias requeridas para impulsar el desarrollo endógeno rural. En el caso específico de la Zona Panamericana del Estado Mérida, se cuenta con unos diez sistemas lagunares en operación, los cuales se estudian en el presente trabajo para observar y analizar su desempeño hidrodinámico. Mediante un Modelo basado en Dinámica Computacional de Fluidos (MIKE 21), se simulan las condiciones del flujo, respetando las configuraciones de entrada y salida, en los sistemas lagunares representativos de Caño Seco y Caño Amarillo. En función de los resultados obtenidos, se deja en evidencia en ambas lagunas que las condiciones de entrada son las mismas y, por tanto, la hidrodinámica es muy similar. Las condiciones de la salida son diferentes y se evidencia que la condición de salida de Caño Amarillo genera patrones hidrodinámicos más apropiados, en cuanto a dirección del flujo y velocidades. El patrón de dirección de la corriente para la configuración de la Laguna de Caño Seco, se corresponde con una dinámica de flujo que facilita la mezcla, observándose zonas de recirculación y de flujos convergentes. El patrón observado para Caño Amarillo presenta menor presencia de zonas de flujos encontrados y de recirculación; por tanto, el patrón de dirección de flujo, en este caso, se asemeja menos a una dinámica de mezcla. Se recomienda realizar un Estudio Hidrodinámico orientado a formular modificaciones en las condiciones de entrada y salida de los prototipos estudiados, para mejorar su hidrodinámica.

Palabras claves: Estudio Hidrodinámico, Sistemas Lagunares, Modelo MIKE21, Zona Panamericana de Mérida, Saneamiento en el Medio Rural, Dinámica Computacional de Fluidos, Mérida-Venezuela.

Abstract

The Venezuelan State, through national and state government entities, has built a series of sanitation works to create the sanitary conditions required to boost rural endogenous development. In the specific case of the Pan American Zone of the State of Merida, there are about ten pond systems in operation, which are studied in this work to observe and analyze its hydrodynamic performance. Using a Model based on Computational Fluid Dynamics (MIKE 21), flow conditions are simulated, respecting input and output configurations, in the representative pond systems of Caño Seco and Caño Amarillo. Depending on the results obtained, it is evident in both ponds that the entry conditions are the same and, therefore, the hydrodynamics is very similar. The output conditions are different and it is clear that the output condition of Caño Amarillo generates more appropriate hydrodynamic patterns, in terms of flow direction and speeds. The current direction pattern, for the configuration of the Caño Seco ponds, corresponds to a flow dynamic that facilitates mixing, observing recirculation zones and convergent flows. The observed pattern for Caño Amarillo has less presence of areas of convergent flows and recirculation; therefore, the flow direction pattern, in this case, is less like a mixing dynamic. It is recommended to carry out a Hydrodynamic Study aimed at making modifications in the input and output conditions of the prototypes studied, to improve their hydrodynamics.

Keywords: Hydrodynamic Study, Ponds Systems, Model MIKE21, Pan American Zone of Merida, Sanitation in the Rural Environment, Computational Fluid Dynamics, Mérida - Venezuela.

1 Introducción

Las Lagunas de Estabilización son los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas con más potencialidad de implementación en el medio rural en países tropicales. Básicamente son estanques poco profundos -entre 1,00m y 2,50m-, preferiblemente con fondos impermeables ó poco permeables, formas variables predominantemente rectangulares y tiempos de retención entre 4 y 8 días. En estos sistemas se establece una simbiosis entre algas y bacterias que conjuntamente con la sedimentación de la materia orgánica particulada, son responsables de la biodegradación y la depuración de las aguas residuales. La calidad del agua es un término que implica un juicio de valor sobre este recurso en función de su uso, ya que hace referencia al conjunto de características físicas, químicas, biológicas y estéticas que le confieren la idoneidad al recurso para un determinado uso.

En Venezuela desde 1955 se han utilizado Lagunas de Estabilización como sistemas de tratamiento de efluentes crudos de origen doméstico y municipal. A partir de 1963, el Ministerio de Sanidad y Asistencia Social (MSAS) y el Instituto Nacional de Obras Sanitarias (INOS) incluyeron las Lagunas de Estabilización complementadas con sistemas cloacales en sus actividades de estudios y proyectos para el saneamiento. El MSAS lo hizo con mayor intensidad y desempeño que el INOS, ya que atendía el saneamiento de poblaciones menores en el medio rural no disperso y periurbano. Es así como a partir de 1963 el MSAS incluyó como complemento a sus actividades de cloacas rurales el diseño, construcción y operación de Plantas de Tratamiento basadas en Lagunas de Estabilización, a través de su Dirección de Malariología y Saneamiento Ambiental (Rengel, (1977) citado por Espinosa, (2020)).

La Conferencia General de las Naciones Unidas, reunida el 25-11-2015 en la ciudad de Nueva York, EUA, aprobó en su Tercera Comisión, adoptar un nuevo texto basado en la Resolución 68/157 de 2013, en el cual se reconocen el Derecho Humano al Agua Potable y el Derecho Humano al Saneamiento, como dos Derechos Humanos Fundamentales por separado.

La Zona Panamericana del Estado Mérida, está definida por una franja territorial que se extiende a lo largo de la carretera Panamericana en el costado noroeste del Estado. Comprende los municipios Alberto Adriani, Obispo Ramos de Lora, Andrés Bello, Caracciolo Parra y Olmedo, Julio César Salas, Tulio Febres Cordero y Justo Briceño. El Gobierno Nacional, en el año 2000, declaró en esta zona una de las “Áreas Estratégicas de Desarrollo Agrícola Sustentable” del país. El Estado Venezolano a través de entes gubernamentales nacionales y estatales, ha construido una serie de Obras de Saneamiento en la Zona Panamericana del Estado Mérida, a fin de crear las condiciones sanitarias requeridas para impulsar el

desarrollo rural en la zona. Entre estas Obras Sanitarias destacan los Sistemas Lagunares para el tratamiento de las aguas residuales de los centros poblados y los asentamientos campesinos. La Figura 1 ilustra la ubicación geográfica de estos Sistemas Lagunares en el Estado Mérida. Los prototipos implementados en el medio rural de la Zona Panamericana del Estado Mérida son Lagunas Facultativas en sistemas de una (1) o dos (2) lagunas en serie. La secuencia de operaciones y procesos más frecuente es (Espinosa 2020):

1. Cribado. Se realiza en la misma tanquilla de entrada.
2. Laguna Facultativa Primaria de 20m X 30m.
3. Laguna Facultativa Secundaria de 20m X 30m.
4. Desinfección. Para este proceso se instala una caseta de cloración.

Otra secuencia de operaciones y procesos encontrada en los Sistemas Lagunares de la Zona Panamericana es:

1. Cribado. Se realiza en la misma tanquilla de entrada.
2. Laguna Facultativa única de 25 m X 50 m
3. Desinfección mediante una caseta de cloración.

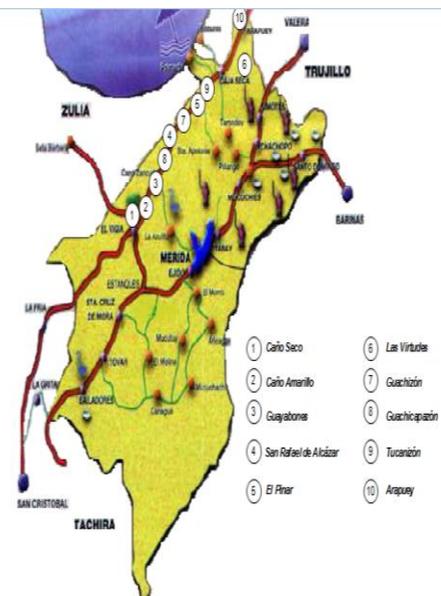


Fig. 1. Ubicación geográfica de las Lagunas de Estabilización construidas en la Zona Panamericana del Estado Mérida, Venezuela.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2 presenta la imagen de un prototipo de Laguna Facultativa implementada en la Zona Panamericana del Estado Mérida de 20 m X 30 m. La Figura 3 ilustra el prototipo de Laguna Facultativa de 25 m X 50 m implementada.



Fig. 2. Laguna Facultativa de 20m X 30 m, vista aguas arriba, implementada en Caño Seco, Municipio Alberto Adriani, Zona Panamericana del Estado Mérida.
Foto: Espinosa, Carlos



Fig. 3. Laguna Facultativa (única) de 25m X 50m, vista aguas arriba. Sistema de Laguna de Caño Amarillo, Municipio Alberto Adriani, Zona Panamericana del Estado Mérida.
Foto: Espinosa, Carlos

Desde su puesta en servicio estos sistemas no han sido estudiados para su evaluación y seguimiento. Muestran evidencias de una precaria operación y mantenimiento, razón por la cual se los considera apropiados para analizarlos a la óptica de un juicio crítico que oriente el logro de la sostenibilidad.

Gomes y col. (2016) presentan una revisión de la compilación y análisis de 28 artículos publicados basados en el uso de la Dinámica Computacional de Fluidos (DCF) en lagunas de estabilización no mecanizadas (anaerobias, facultativas, maduración y pulimento). El énfasis del análisis se hace en los principales aspectos de los modelos, los métodos utilizados, así como los principales resultados y conclusiones de los estudios. Después de una introducción de las herramientas y a los resúmenes de las publicaciones, se establece una breve descripción sobre

los puntos claves de las prácticas de modelaje adoptadas, con la intención de identificar los principales métodos usados, intervalos, tendencias y sugieren, cuando es posible, buenas prácticas para el modelado.

La Tabla 1 presenta una selección de cuatro (4) de los 28 Artículos revisados por Gomes y col. (2016), que tienen relación directa con esta investigación.

Tabla 1. Artículos revisados por Gomes y col. (2016), que tienen relación directa con la investigación

Referencia	Claves del Estudio	Tipo de Modelo	Modelo Usado	Análisis de Sensibilidad	Calibración Validación
Wood et al (1995)	Presenta y explora el potencial de la DFC como nueva herramienta para el diseño de lagunas.	2D/SS	FIDAP Fluid Dynamics Analysis Program	No	No
Persson (2000)	Evalúa parámetros hidráulicos y el efecto de 13 diferentes geometrías de deflectores, entradas y salidas sobre el desempeño hidrodinámico de hipotéticas lagunas.	2D/SS	MIKE 21 Danish Hydraulic Institute	No	No
Abbas et al (2006)	Estudia diferentes geometrías y configuraciones de deflectores en hipotéticas lagunas	2D/SS	Surface Water Modelling System (SMS)	No	No
Souza et al (2012)	Simula hipotéticas lagunas facultativas con diferentes configuraciones de deflectores	3D/SS	ANSYS CFX Compound File Explorer	No	No

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

Estudiar la hidrodinámica de las Lagunas de Estabilización implementadas en el medio rural de la Zona Panamericana del Estado Mérida.

2.2 Objetivos Específicos

- Implementar un Modelo Hidrodinámico de simulación basado en Dinámica Computacional de Fluidos.

- Estudiar, mediante simulación con el Modelo implementado, la hidrodinámica de los prototipos de Lagunas de Estabilización construidos en el medio rural de la Zona Panamericana del Estado Mérida.

3 Metodología

El esquema metodológico empleado para alcanzar los objetivos planteados, está constituido por 5 fases, las cuales se describen a continuación

3.1 Determinación de la configuración y dimensiones típicas en los prototipos de lagunas del medio rural venezolano implementados en la Zona Panamericana del Estado Mérida.

Para el estudio, se seleccionaron dos configuraciones de lagunas representativas, las cuales son las de Caño Seco, con unas dimensiones de 20 m X 30 m y 1,50 m de profundidad, dos entradas que se ubican en el primer tercio y una salida en el tercer tercio y las lagunas de Caño Amarillo de 25 m X 50 m y 1,50 m de profundidad, con dos entradas en el primer tercio y una salida centrada en el borde del extremo opuesto a la entrada. Lo anterior se ilustra en las Figuras 2 y 3.

3.2 Selección del Modelo Hidrodinámico, solicitud y activación de la licencia del Software Mike 21

Con base a la revisión bibliográfica se seleccionó el Software Mike 21 desarrollado por el Instituto Danés de Hidráulica (DHI). Se realizó una solicitud formal para el otorgamiento de una Licencia de Estudiante para Tesis de Maestría/Doctorado limitada a un (1) año (Agreement for Educational Time-limited MIKE Powered by DHI Software Licence). Posteriormente el DHI informó sobre la aprobación y activación de la Licencia por un período de un año a partir 07-08-19, prorrogada a partir del 07-08-20 por un año más.

El Código de la Licencia del Mike 21 fue activado en un Computador personal TOSHIBA con procesador INTEL I5 y 8 Mb de memoria RAM, equipo en el cual se han realizado las simulaciones.

3.3 Realización de la malla que define la configuración de la laguna

Para ello se utilizó la extensión del Mike Zero llamada Mesh Generator, que como su nombre indica permite la creación de la malla de cálculo; para la utilización de este módulo, fue necesario la selección de puntos con coordenadas características que permitieron la delimitación de los bordes de tierra y la configuración del espejo de agua. Dicha información se incorporó en archivos texto colocando las coordenadas correspondientes a los bordes de tierra, y a puntos característicos de influencia del espejo del agua. Es importante resaltar que para los bordes de tierra se colocan coordenadas X, Y, 1, Z, donde el 1 indica que comienza el

reconocimiento de malla para el programa y la última data para el cierre del reconocimiento de tierra se realiza con las coordenadas X,Y,0,Z. Para las coordenadas del espejo de agua simplemente se utilizan las coordenadas X,Y,Z.

Luego se triangula dicha información y se procede a interpolar, para luego generar la malla en un archivo de batimetría con extensión. mesh, el cual es reconocido por el software Mike 21 Flow Model FM.

3.4 Utilización del Software Mike 21 Flow Model FM

Es oportuno aclarar que debido a la poca profundidad de las lagunas -en el orden de 1,50m- la simulación se hará en dos dimensiones (2D). Lo anterior implica que un plano de simulación cercano a la superficie del agua es representativo de lo que ocurre en la profundidad de las lagunas. Por esta misma razón no se tomarán en cuenta para la simulación gradientes térmicos en la profundidad del agua, se asume que no hay pérdidas o flujos por infiltración, que la precipitación se compensa con la evaporación y se desprecian los efectos del viento en la superficie del agua.

Es importante resaltar que los pasos que a continuación se describen, si hicieron para ambas configuraciones de laguna.

3.4.1 Dominio

En esta extensión del programa se agregó el archivo. mesh generado en el anterior paso.

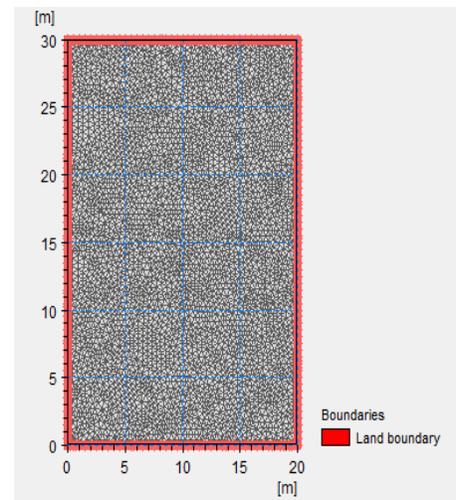


Fig. 4. Malla de simulación de la Laguna de Caño Seco.
Fuente: Mike 21

3.4.2 Tiempo

Para el caso estudio de la laguna de Caño Seco, y por limitantes de tiempo de conexión por el tipo de Licencia, se tomaron intervalos de tiempo de 30 segundos con un número 250 intervalos, por tanto, se simularon para un tiempo de 7.500 segundos, lo que equivale a 125 minutos, unas 2,08 horas. Este tiempo es suficiente y permite

observar la propagación de la onda en todo el dominio de la malla de simulación de la laguna, así como tiempos posteriores.

Por otro lado, para el caso de estudio de la laguna de Caño Amarillo, se tomaron intervalos de tiempo de 30 segundos con 500 intervalos, para un tiempo de simulación de 15.000 segundos, lo que equivale a 250 minutos, unas 4,17 horas. Tiempo suficiente que permite observar la propagación de la onda para todo el dominio de la malla de simulación, así como tiempos posteriores.

3.4.3 Modulo Hidrodinámico

3.4.3.1 Técnica de solución

Se implementó el módulo de algoritmo rápido de bajo orden.

3.4.3.2 Densidad

Se utilizó la recomendación del software Barotropic.

3.4.3.3 Resistencia

Se utilizó el Número de Manning correspondiente a concreto 0.012.

3.4.3.4 Entradas

Se asignó las coordenadas correspondientes a la posición de las entradas en estudio, así como también el caudal que ingresa por cada una de ellas.

Caño Seco, dos entradas que se ubican en las coordenadas (6.57, 10) y (13.53, 10) con un caudal de descarga en cada una de ellas de $0.006 \text{ m}^3/\text{s}$. Para el caso Caño Amarillo cuenta con dos entradas ubicadas en las coordenadas (11.57, 17) y (18.53, 17), con un caudal de descarga en cada una de ellas de $0.006 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.4.3.5 Salidas

En este caso se asumieron las salidas como alcantarillas, por ello en la sección de estructuras se seleccionaron el ítem correspondiente a las mismas donde se le asignó su ubicación y el diámetro considerado, que es de 0.30 metros.

El Sistema de Caño Seco cuenta con una salida en la coordenada (10, 26). Para el caso del Sistema Caño Amarillo, una salida centrada en el borde opuesto a la entrada, ubicada en la coordenada (12.5, 50).

3.4.3.6 Condiciones de borde

Se especifica que los bordes son construidos de concreto por tanto la velocidad del agua en los mismo, para fines prácticos, es cero.

3.4.3.7 Condiciones de Salida

Para el análisis de los resultados de las simulaciones, se seleccionaron las siguientes variables:

- Elevación de la superficie del agua.
- Dirección del flujo.
- Velocidad.

3.5 Análisis e interpretación de los resultados para formular conclusiones y recomendaciones

4 Resultados

4.1 Configuración Caño Seco

Como se ha mencionado anteriormente esta laguna tiene unas dimensiones de 20 m de ancho, 30 m de largo y 1,50 m de profundidad.

4.1.1 Elevación de la superficie del Agua

La simulación se inicia con la creación de ondas radiales alrededor de los puntos de entrada (Figura 5), hasta conformar una sola circunferencia (Figura 6), la cual va avanzando en el tiempo, toma forma de elipse y luego alcanza el borde aguas arriba de la laguna (Figura 7), logrando equilibrar linealmente la propagación de la onda hasta alcanzar el borde aguas abajo (Figura 8). En esta secuencia de Figuras (5 a 8) se puede observar el comportamiento de la onda de perturbación superficial, y la implicación de la misma en la elevación de la superficie. Este comportamiento se considera el esperado.

En la Figura 9 se aprecian zonas de menores niveles de agua, localizadas simétricamente en las esquinas aguas arriba y en la zona próxima a salida, en la última fase de la simulación.

4.1.2 Dirección de Flujo

Las observaciones de la simulación de dirección de la corriente, evidencian la formación de zonas de recirculación, y zonas de estancamiento, tal como lo muestran la secuencia de las Figuras 10 a 14. En las mismas se aprecian vectores de dirección de la corriente en el primer y cuarto cuadrantes en dirección aguas abajo (colores morado, azul, amarillo, naranja) y vectores en el segundo y tercer cuadrantes del plano cartesiano, en dirección aguas arriba (colores en escala de verdes, y azules más tenues).

Laguna Facultativa de 20 m x 30 m, implementada en Caño Seco, Municipio Alberto Adriani, Zona Panamericana del Estado Mérida.

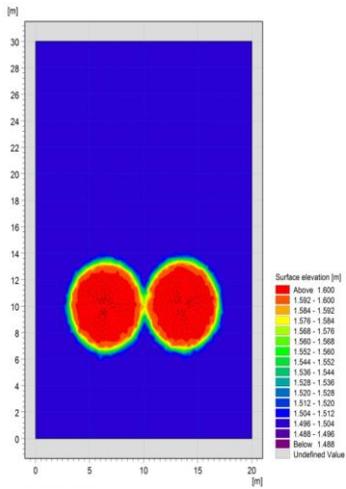


Fig. 5. Elevación de la superficie a los 10 minutos de simulación.

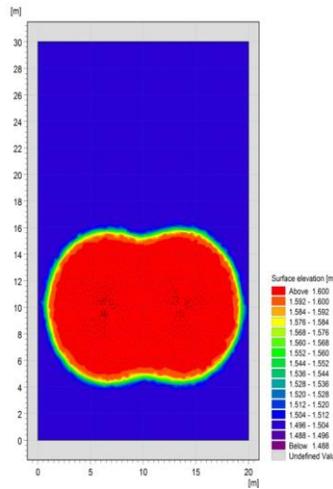


Fig. 6. Elevación de la superficie a los 25 minutos de simulación.

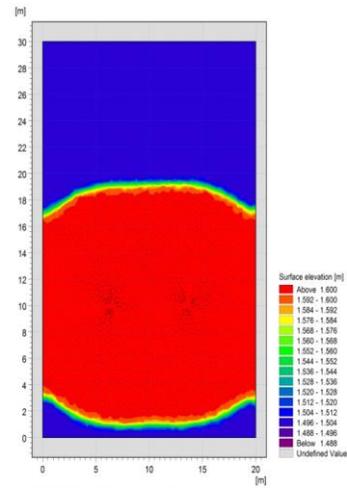


Fig. 7. Elevación de la superficie a los 48 minutos de simulación.

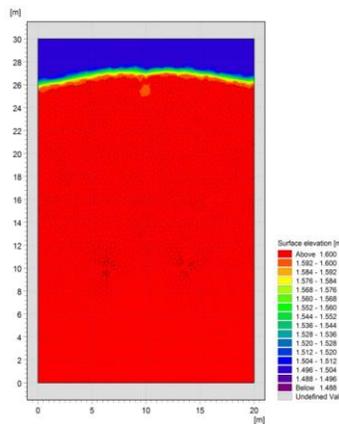


Fig. 8. Elevación de superficie a los 75 minutos de simulación

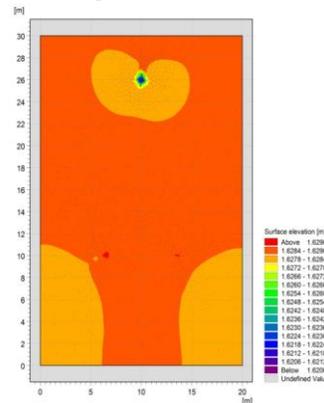


Fig. 9. Elevación de superficie a los 107 minutos de simulación.

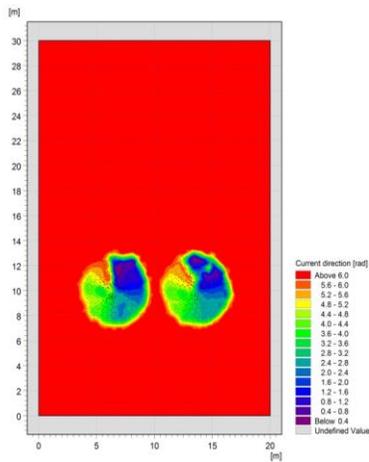


Fig. 10. Dirección de flujo a los 10 minutos de simulación.

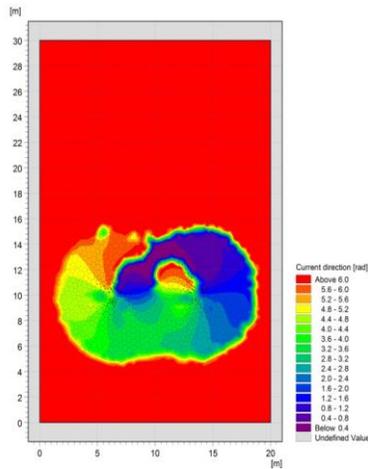


Fig. 11. Dirección de flujo a los 25 minutos de simulación.

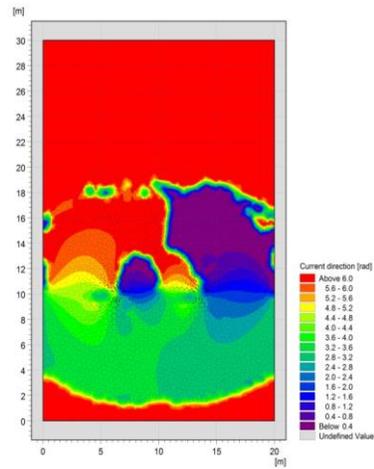


Fig.12. Dirección de flujo a los 48 minutos de simulación

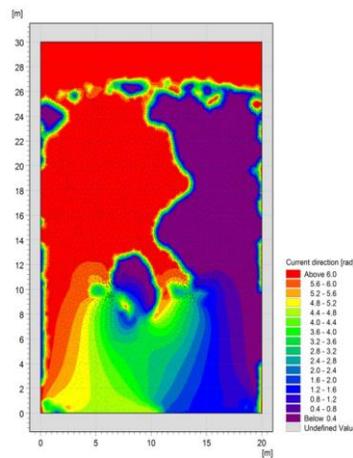


Fig. 13. Dirección de flujo a los 75 minutos de simulación.

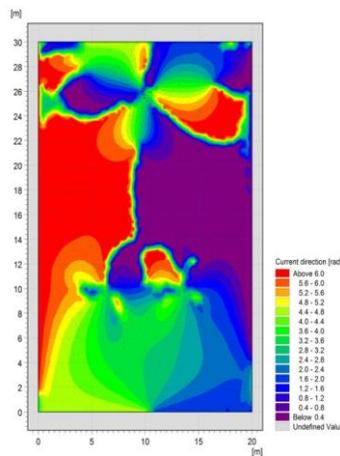


Fig. 14. Dirección de flujo a los 107 minutos de simulación.

4.1.3 Velocidad

En la Figura 15 se puede observar el inicio de la onda de propagación y la ubicación de los primeros vectores de velocidad, dichos vectores tienen una magnitud de 0.008 hasta 0.020 m/s. Es importante señalar que en la misma se observa la existencia de vectores en ambas direcciones con las mismas magnitudes, unos que buscan llenar el frente de la laguna aguas abajo y otros que buscan el extremo aguas arriba.

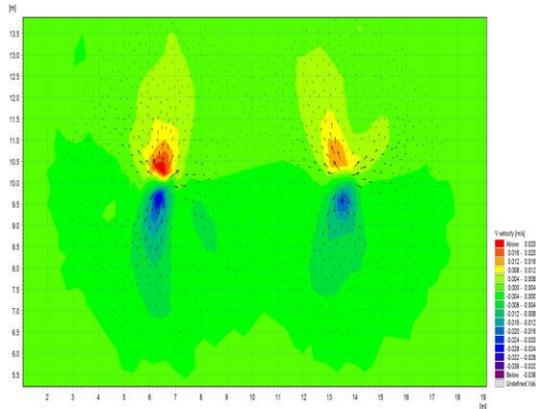


Fig. 15. Laguna Facultativa de 20 m x 30 m , implementada en Caño Seco, Municipio Alberto Adriani, Zona Panamericana del Estado Mérida. Vectores de velocidad en la zona de entrada al inicio de la simulación a los 16 minutos.

En la Figura 16, se puede observar la salida de laguna en el punto (10,26), creando zonas locales de recirculación, y por tanto perturbando el campo de dirección.

Esta recirculación de flujo facilita la formación de puntos de estancamiento, los cuales se observan en la Figura 17 con una velocidad alrededor de 0.0002 m/s, considerándose prácticamente nulo su movimiento.

Es importante resaltar que las zonas de estancamiento, se observan con mayor frecuencia en las esquinas de la laguna y se ha podido constatar en campo que en dichas zonas ocurre este fenómeno que genera crecimiento de maleza, lo cual afecta el funcionamiento de la Laguna de Estabilización. Lo anterior se puede observar en la Figura 18.

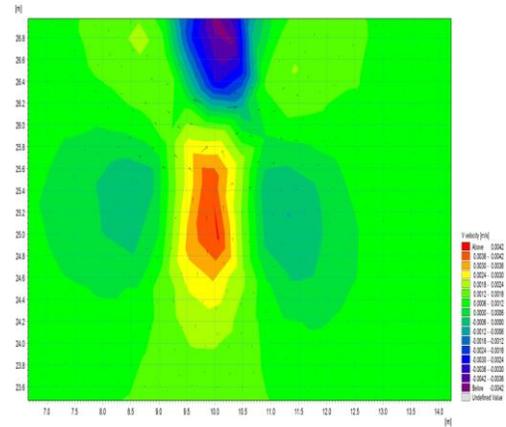


Fig. 16. Laguna Facultativa de 20 m x 30 m , implementada en Caño Seco, Municipio Alberto Adriani, Zona Panamericana del Estado Mérida. Vectores de velocidad en la zona de entrada al inicio de la simulación a los 96 minutos.

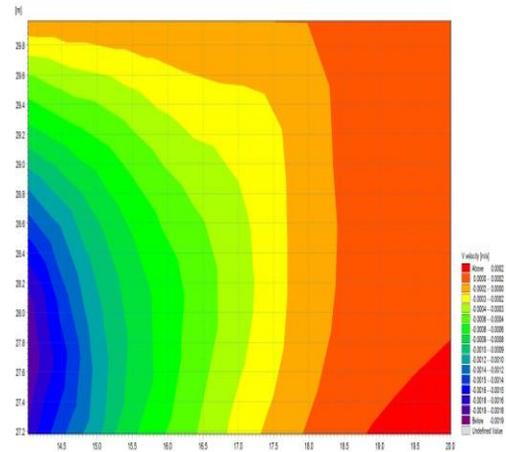


Fig. 17. Laguna Facultativa de 20 m x 30 m, implementada en Caño Seco, Municipio Alberto Adriani, Zona Panamericana del Estado Mérida. Zona de estancamiento en el extremo superior derecho aguas abajo de la laguna a los 125 minutos de la simulación.



Fig. 18. Laguna Facultativa de 20 m x 30 m, implementada en Caño Seco, Municipio Alberto Adriani, Zona Panamericana del Estado Mérida. Observación en campo de la zona de estancamiento localizada en el extremo derecho aguas abajo.

4.2 Configuración Caño Amarillo

Laguna de dimensión 25 m de ancho, 50 m de largo y profundidad de 1,50 m, con doble entrada.

4.2.1 Elevación de la superficie de Agua

Como en el caso, en la secuencia de Figuras 19 a 24, se observa la creación de ondas de perturbación radiales alrededor de los puntos de entrada, hasta formar una sola circunferencia; la misma crece y avanza en el tiempo y toma forma de elipse. Luego alcanza las esquinas inferiores aguas arriba de la laguna, aumentando su velocidad para equilibrar linealmente la propagación de la onda en dirección aguas abajo.

En resumen, en la secuencia de imágenes se aprecia la formación y propagación de la onda de perturbación superficial, y a la consecuencia de la misma en la elevación de la superficie del agua durante la simulación realizada.

En la Figura 25 se observan los niveles de agua mayores en la primera mitad de la laguna que en la mitad aguas abajo.

4.2.2 Dirección de Flujo

Al observar las imágenes de las simulaciones de Dirección de Flujo se evidencian zonas de estancamiento y zonas de recirculación. Se aprecian los vectores de primer y cuarto cuadrante en dirección aguas abajo (colores morado, azul, amarillo, naranja) y vectores en el segundo y tercer cuadrante del plano cartesiano en dirección aguas arriba (colores en escala de verde, y azules tenues), identificándose en las esquinas de la laguna zonas de estancamiento.

Las figuras 26 a 32 presentan los gráficos correspondientes a la Dirección de Flujo para diferentes tiempos de simulación.

4.2.3 Velocidad

En la Figura 33 se observa el inicio de la onda de propagación y la ubicación de los vectores de velocidad, los cuales tienen una magnitud de 0.0075 hasta 0.0175 m/s. Es importante señalar que en la misma se observan vectores en opuestas direcciones con las mismas magnitudes, uno que buscan llenar el frente aguas abajo de la laguna y otros que buscan el extremo aguas arriba. Al igual que en la laguna de Caño Seco, se observan zonas de estancamiento; es importante resaltar que en este caso las zonas de recirculación son menores ya que la salida trabaja mejor al encontrarse centrada en el borde aguas abajo de la laguna, permitiendo que el

campo de vectores sea más uniformemente direccionado.

En la Figura 34, se puede observar la salida de esta laguna que se encuentra en el punto (12.5, 50), donde se aprecia un campo de velocidades en la zona de salida más adecuado y mejor direccionado.

Se encuentran zonas de estancamiento evidenciadas en la Figura 35, aunque en menor proporción en comparación con la laguna de Caño Seco. Se observan zonas de estancamiento en todas las zonas de esquina, con magnitudes entre de 0.0003 m/s y prácticamente 0 m/s. Como se observa en la Figura 36, se pudo constatar en campo, que en las esquinas de la laguna de Caño Amarillo hay crecimiento de malezas y deposición de sólidos sedimentables, lo cual evidencia la presencia de zonas de estancamiento.

Laguna Facultativa de 25 m x 50 m, implementada en Caño Amarillo, Municipio Alberto Adriani, Zona Panamericana del Estado Mérida.

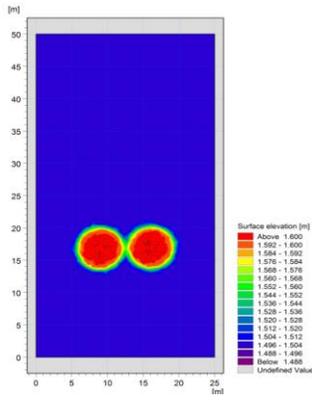


Fig. 19. Elevación de superficie a los 10 minutos de simulación.

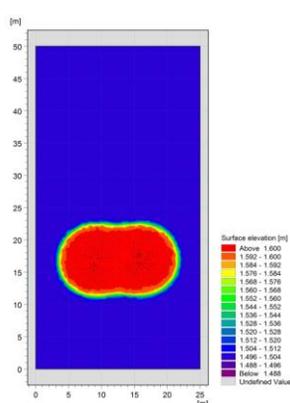


Fig. 20. Elevación de superficie a los 25 minutos de simulación.

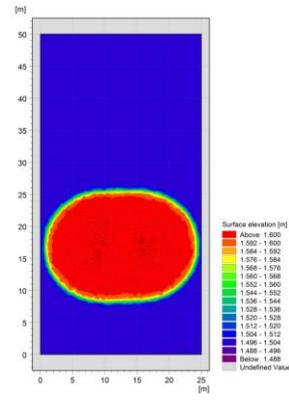


Fig. 21. Elevación de superficie a los 48 minutos de simulación.

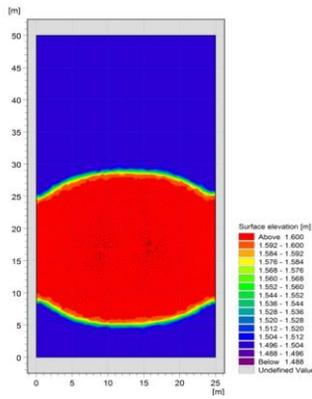


Fig. 22. Elevación de superficie a los 75 minutos de simulación.

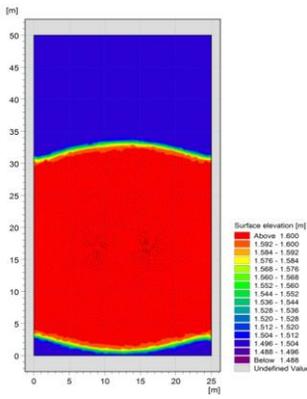


Fig. 23. Elevación de superficie a los 107 minutos de simulación.

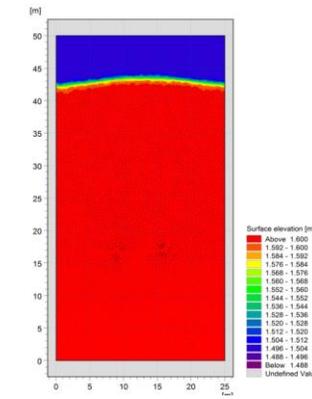


Fig. 24. Elevación de superficie a los 150 minutos de simulación.

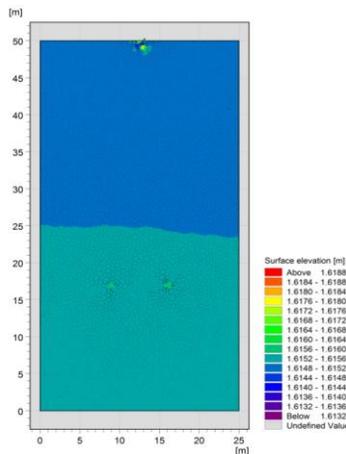


Fig. 25. Elevación de superficie a los 200 minutos de simulación.

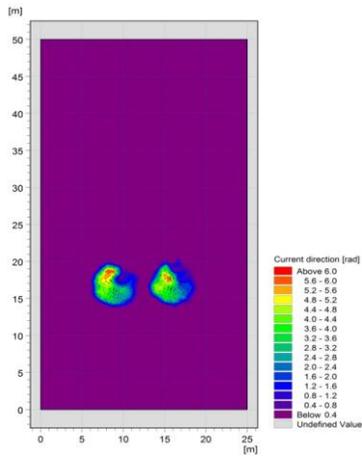


Fig. 26. Dirección de flujo a los 10 minutos de simulación.

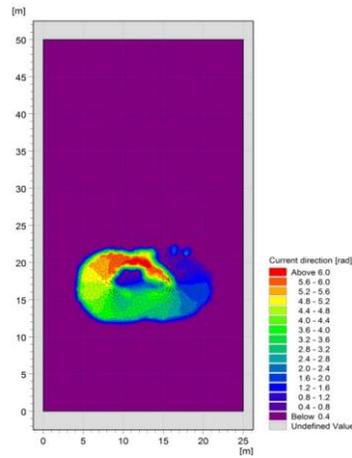


Fig. 27. Dirección de flujo a los 25 minutos de simulación.

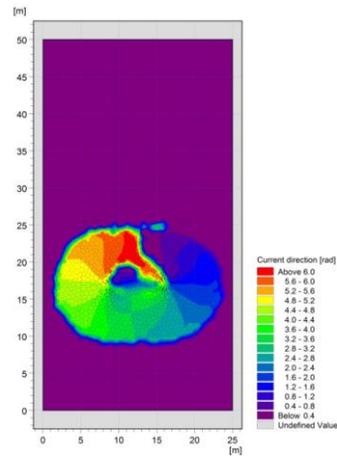


Fig. 28. Dirección de flujo a los 48 minutos de simulación.

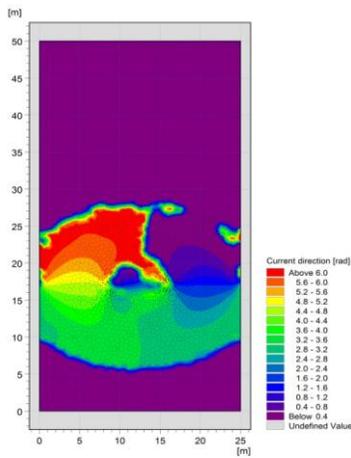


Fig. 29. Dirección de flujo a los 75 minutos de simulación.

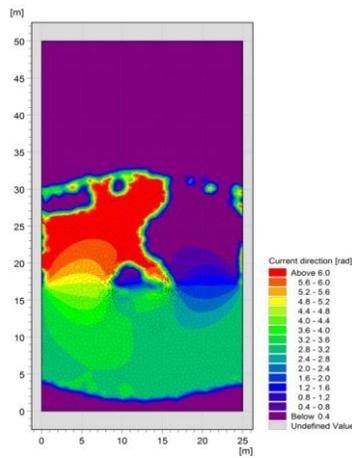


Fig. 30. Dirección de flujo a los 107 minutos de simulación.

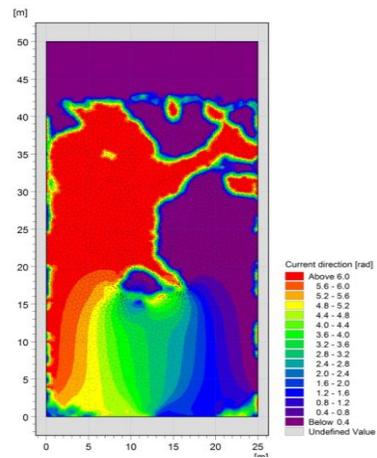


Fig. 31. Dirección de flujo a los 150 minutos de simulación.

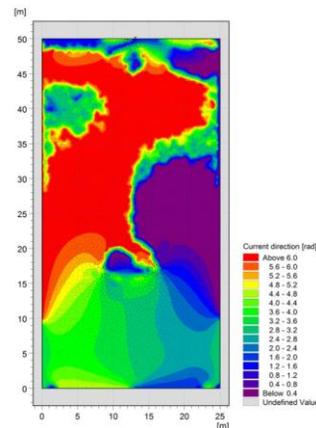


Fig. 32. Dirección de flujo a los 200 minutos de la simulación.

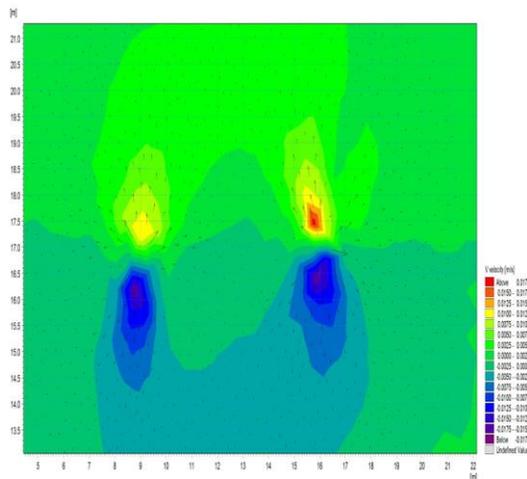


Fig. 33. Laguna Facultativa de 25 m x 50 m, implementada en Caño Amarillo, Municipio Alberto Adriani, Zona Panamericana del Estado Mérida. Vectores de velocidad en la zona de entrada para un tiempo de simulación de 30 minutos, similar al caso de Caño Seco.

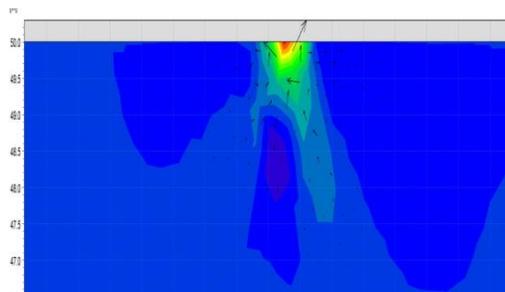


Fig. 34. Laguna Facultativa de 25 m x 50 m, implementada en Caño Amarillo, Municipio Alberto Adriani, Zona Panamericana del Estado Mérida. Vectores de velocidad cercanos a la tubería de salida para los 225 minutos de simulación.

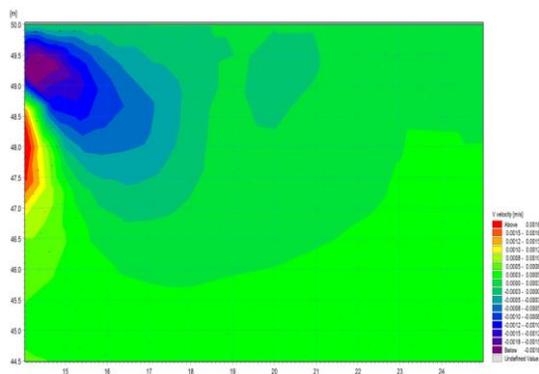


Fig. 35. Laguna Facultativa de 25 m x 50 m, implementada en Caño Amarillo, Municipio Alberto Adriani, Zona Panamericana del Estado Mérida. Puntos de estancamiento en el extremo superior derecho aguas abajo a los 200 minutos de simulación.



Fig. 36. Laguna Facultativa de 25 m x 50 m, implementada en Caño Amarillo, Municipio Alberto Adriani, Zona Panamericana del Estado Mérida. Observación en campo de la zona de estancamiento en el extremo derecho aguas abajo.
Foto: Espinosa, Carlos

5 Conclusiones

La simulación hidrodinámica en las configuraciones de las lagunas de estabilización, indicaron que para ambos casos (Laguna de Caño Seco y Laguna de Caño Amarillo) la propagación de la perturbación superficial por incremento del nivel de agua es similar, debido a la ubicación de las entradas de flujo en la laguna. Esto era de esperarse porque la configuración de la entrada y la forma de las lagunas es similar.

El patrón de dirección de la corriente para la configuración de la Laguna de Caño Seco, se corresponde con una dinámica de flujo que facilita la mezcla, observándose zonas de recirculación y de flujos encontrados. El patrón observado para Caño Amarillo presenta menor presencia de zonas de flujos encontrados y de recirculación por tanto el patrón de dirección de flujo en este caso se asemeja menos a una dinámica de mezcla.

Al observar la simulación de los campos de velocidades, su dirección y magnitud, se concluye que en las esquinas de ambos tipos de laguna se generan velocidades muy próximas a cero, lo cual genera zonas de estancamiento que son para fines prácticos zonas muertas. Es sabido que en la medida que se generan zonas muertas, se disminuye el volumen útil de la laguna. Lo anterior se corroboró con observaciones de campo.

En general en ambos casos las simulaciones de velocidades (magnitud y dirección del campo de vectores), guardan mucha relación con los patrones de dirección de la corriente ya descritos.

En ambas lagunas las condiciones de entrada son las mismas, y por tanto la hidrodinámica en la zona de entrada son muy similares. Las condiciones de la salida son diferentes y se observa que la condición de salida de Caño

Amarillo genera patrones hidrodinámicos más apropiados, en cuanto a dirección del flujo y velocidades.

La simulación de la hidrodinámica de Lagunas de Estabilización, con base en Dinámica Computacional de Fluidos, representa una poderosa herramienta que puede ser utilizada para el diseño de Lagunas de Estabilización.

Esta herramienta permite predecir el comportamiento hidráulico de los prototipos, para corroborar o corregir, antes de su implementación en campo. Es además útil, como en este caso, para estudiar Lagunas ya construidas y en operación, con miras a mejorar su hidrodinámica.

Se recomienda realizar un Estudio Hidrodinámico orientado a formular modificaciones en las condiciones de entrada y salida de los prototipos estudiados, para mejorar su hidrodinámica

Agradecimientos

Los Autores expresan su agradecimiento y reconocimiento al Instituto Danés de Hidráulica (DHI) de Dinamarca, por el otorgamiento de la Licencia de Estudiante para Tesis de Maestría/Doctorado (Agreement for Educational Time-limited MIKE Powered by DHI Software Licence), lo cual permitió realizar esta investigación.

Referencias

- Abbas H, Nasr R, Seif H, 2006, Study of waste stabilization pond geometry for the wastewater treatment efficiency". *Ecol Eng.* ;28(1):25–34.
- Corporación Andina de Fomento, 2004, "Venezuela, Análisis del Sector Agua Potable y Saneamiento". Informes Sectoriales de Infraestructura. Caracas, Venezuela.
- DHI 2017, "MIKE ZERO: Creating 2D Bathymetries. Bathymetry Editor & Mesh Generator and Scientific Documentation". User Guide. Danish Hydraulics Institute. Denmark.
- DHI 2017, "MIKE21 Flow Model. Hydrodynamic Module". User Guide. Danish Hydraulics Institute. Denmark.
- DHI 2017, "MIKE21 Flow Model & MIKE21 Flood Screening Tool. Hydrodynamic Module and Scientific Documentation". User Guide. Danish Hydraulics Institute. Denmark.
- Espinosa, C, 2020, "Lagunas de Estabilización en el medio rural venezolano. Caso: Zona Panamericana de los Estados Mérida y Trujillo, Venezuela". Trabajo presentado ante la Ilustre Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat de Venezuela, como requisito parcial para optar a su incorporación como Miembro Correspondiente por el Estado Trujillo. Palacio de las Academias, Caracas, Venezuela.
- Gomes R, Dias D, von Sperling M, 2016, Review of practical aspects for modelling of stabilization ponds using Computational Fluid Dynamics, *Environmental Technology Reviews*, Vol. 5, No. 1, pp. 78–102. UK.
- Persson J, 2000, The hydraulic performance of ponds of various layouts, *Urban Water.* ;2(3):243–250.
- Rengel M, 1977, Lagunas de Estabilización para el Tratamiento de Aguas Residuales de Origen Doméstico. Experiencia Venezolana, Serie Ambiente y Recursos Naturales N°AR-5. Casa Editora CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Souza VAS, Helbel AF, Janzen JG, 2012, Simulação computacional do comportamento hidrodinâmico em lagoas facultativas com chicanas, *Ciência & Engenharia*;21(1):15–21.
- Wood MG, Greenfield PF, Howes T, 1995, Computational fluid dynamic modeling of waste-water ponds to improve design, *Water Science and Technology.* 1995;31(12):111–118.

Recibido: 07 de junio de 2020

Aceptado: 10 de noviembre de 2020

Ramírez-Rodríguez, Stefanny Andreina: Ingeniero Civil *Cum Laude* (Universidad de Los Andes, 2018). Participante de la Especialización en Sistemas de Gestión de Abastecimiento, Recolección y Tratamientos de Aguas en el Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial de la Universidad de los Andes (CIDIAT-ULA). Profesora de la Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Sanitaria de la Universidad de los Andes. Representante de la Escuela de Ingeniería Civil ante la Unidad de Información Institucional (UDI-OFAE) de la Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.

Espinosa-Jiménez, Carlos: Ingeniero Civil (Intec, República Dominicana, 1981). Magister Scientiae en Obras Hidráulicas (Universidad de los Andes, Venezuela, 1985). Master of Engineering en Ingeniería Sanitaria (IHE-Delft, Holanda, 1997). Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental (UNIVALLE, Colombia, 1999). Especialista en Abastecimiento de Agua Potable y Saneamiento Ambiental. Profesor Titular y Coordinador de Asistencia Técnica del Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial de la Universidad de los Andes (CIDIAT-ULA). Mérida, Venezuela. Correo electrónico: caesji1958@gmail.com

Jégat-Nicolo, Hervé: Ingeniero Hidráulico (Grenoble, Francia, 1972). DEA en Mecánica de Fluidos (Grenoble, Francia, 1973). Doctor (Grenoble, Francia, 1975). Especialista en Hidráulica aplicada a agua superficial y subterránea. Profesor Titular y Coordinador de Enseñanza del Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial de la Universidad de

los Andes (CIDIAT-ULA). Mérida, Venezuela. Correo electrónico: hjeat@gmail.com

Barreto-Cordero, Wilmer José: *Ingeniero Civil UCLA (1992), Barquisimeto, Venezuela. Master of Science in Hydroinformatics (2001), IHE-Delft, The Netherlands. Doctor (2012), Delft University of Technology, The Netherlands. Profesor del Departamento de Geología y Obras Civiles de la Universidad Católica de Temuco, Chile. Correo electrónico: wbarreto@uct.cl*