

Relación entre la intensidad de luz y la desaparición de coliformes fecales

Nibis Bracho, Ana Karina Did Bali, Daniela Torres y Daniel Santiago*

*Centro de Investigación del Agua, Facultad de Ingeniería,
Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.*

Recibido: 18-10-12 Aceptado: 09-05-13

Resumen

Esta investigación tiene como objetivo determinar la relación de la desaparición de los coliformes fecales (Kb) a diferentes intensidades de luz fluorescente (40, 80, 120 y 160 W) y tiempos de exposición a la luz (TEL), 0h, 12h y 17h. El experimento se desarrolló en seis reactores por carga, alimentados con agua proveniente de las lagunas de maduración de la Planta Sur-Maracaibo. Se analizaron los coliformes totales (CT) y fecales (CF), pH, OD, DQO, temperatura (t), nutrientes, clorofila *a*, sólidos y turbidez. Aplicando el modelo en función de la temperatura (27°C), se obtuvo un único valor de $K_b = 8,79 \text{ d}^{-1}$, cuando en la realidad resultaron nueve Kb, uno en ausencia de luz y dos Kb por cada intensidad. Estadísticamente se evidencia que Kb calculada por el modelo en función de la temperatura es significativamente diferente a las obtenidas experimentalmente ($F_{\text{cal}} = 168,33 > F_{\text{crítico}} = 4,26$), en contraposición a los resultados estimados con el modelo en función del pH, TEL y OD, que predice los nueve Kb, con una desviación del 20%. En presencia de luz ocurre la máxima remoción de 4,5 logaritmos de CF para una intensidad de 160W y TEL = 17h y la mínima en condiciones de oscuridad (2,3 logaritmos).

Palabras clave: constante de desaparición de coliformes fecales (Kb), intensidad luz, lagunas de maduración, luz fluorescente.

Relationship between light intensity and disappearance of fecal coliforms

Abstract

This research aims to determine the relationship between the disappearance of fecal coliforms (Kb) at different intensities of fluorescent light (40, 80, 120 and 160 W) and exposure times to light (TEL), 0h, 12h and 17h. The experiment was developed in six load reactors, fed with water from the lagoons of maturation of the South Plant-Maracaibo. The parameters analyzed were: total coliform (TC) and fecal (FC), pH, DO, COD, temperature (t), nutrients, chlorophyll *a*, solids, turbidity. Applying the model in function of temperature (27°C) obtained a single value of $K_b = 8.79 \text{ d}^{-1}$, when in reality were nine Kb, one in the dark condition and two Kb for each intensity. Statistically evidence Kb calculated by the model in function of temperature is significantly different from those obtained experimentally ($F_{\text{CAL}} = 168.33 > F_{\text{critico}} = 4.26$), as opposed to the estimated results with the model function of pH, TEL and OD, which predicts the nine Kb, with

Autor para la correspondencia: nibisbracho@hotmail.com

a deviation of 20%. In the presence of light occurs the maximum removal of 4.5 logs of CF to an intensity of 160W and TEL = 17h and the lowest in dark conditions (2.3 logs).

Keywords: constant bacterial decay (Kb), light intensity, maturation ponds, fluorescent light.

Introducción

En las últimas décadas se han realizado muchas investigaciones dirigidas a analizar la discrepancia entre las estimaciones teóricas plasmadas en los diseños de lagunas de estabilización y los resultados experimentales. Ejemplo Yáñez (1), reportó que el tiempo de retención teórico (t_r) es 2 veces el tiempo de residencia hidráulica (t_h) y otros investigadores han realizado estudios a escala piloto demostrando que $t_h < t_r$ (1-6). Esto significa que existen factores como, geometría de la laguna, número de dispersión o patrón de flujo que no han sido considerados dentro de los modelos para el diseño.

En lagunas de maduración las variables importantes para el diseño son el tiempo de retención y la constante de desaparición de las bacterias Kb, tal como se ilustra en la siguiente ecuación:

$$Ne = \frac{Ni}{1 + Kb} \quad [1]$$

donde

Ne: Concentración de bacterias en el efluente (CF/100mL).

Ni : Concentración de bacterias en el afluente (CF/100mL).

Kb: constante de desaparición de las bacterias (d^{-1}).

T : tiempo de retención (d).

Ambos parámetros son importantes en el modelo, porque a partir de ellos se estima la concentración en el efluente. La vulnerabilidad en cualquiera de las variables, conducirá a una estimación teórica que puede diferir marcadamente de los resultados reales. Este trabajo se enfocará en Kb, debido a lo complicado de evaluar ambas variables simultáneas.

La ecuación de diseño propuesta por Marais (7) establece que Kb es una función únicamente dependiente de la temperatura. Actualmente existen varias investigaciones que reportan que Kb puede estar afectada por otros parámetros como: radiación solar, tiempo de retención, pH, concentración de oxígeno disuelto (OD), la profundidad de la laguna, turbidez y tiempo de exposición a la luz (TEL), entre otros (8-16).

Muchos de los investigadores mencionados han generados modelos que pueden predecir a Kb, considerando variables que difieren a la temperatura. Por ejemplo, Bracho y col. (16) estudiaron la influencia del TEL, sobre la desaparición de los coliformes fecales (CF), obteniendo una ecuación para el cálculo de Kb en función de TEL, pH y OD. Este trabajo es una continuación de la investigación citada, cuyo objetivo es determinar la relación de la desaparición de los coliformes fecales (Kb) a diferentes intensidades de luz fluorescente (40, 80,120 y 160 W) y TEL, 0h, 12h y 17h. En este caso de estudio, se seleccionaron tres de los TEL empleados por Bracho y col. (16), cero luz o condición de oscuridad. En este experimento, la luz no interviene, lo cual permite efectuar una justa comparación vs los experimentos en presencia de luz. Por otra parte, 12 y 17 horas de luz representan los días de máximas luz natural en verano, para algunos países de Latinoamérica y Europa respectivamente.

Materiales y métodos

Las pruebas se efectuaron en 6 reactores por carga (rectangulares) de 25cm × 50cm × 45cm, cuya capacidad fue de 35 litros. En primer lugar se colocaron dos reactores por duplicado (figura 1), en ausencia de luz (0h), seguido de los reactores con TEL de 12 h y 17 horas. Para los reactores expuestos

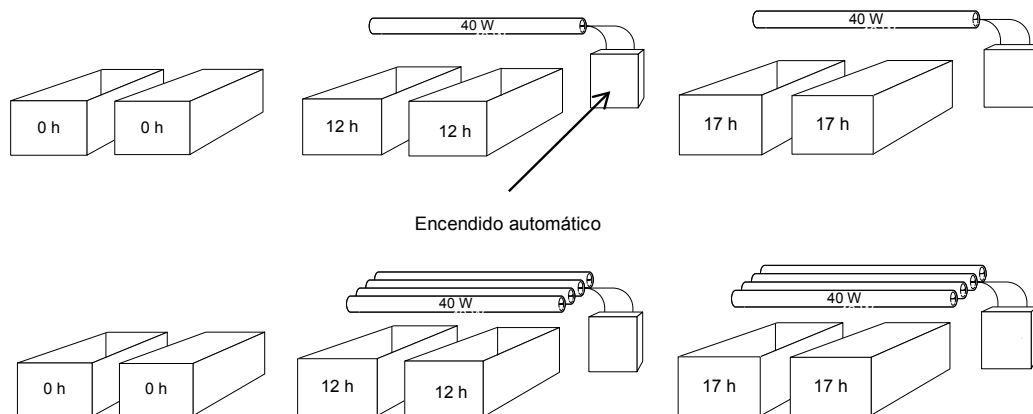


Figura 1. Reactores por carga con una intensidad entre 40 y 160 W, a diferentes TEL.

a la luz, se realizaron cuatro experimentos, donde se incrementó el número de lámparas de 1 a 4, lo que corresponde a intensidades de 40, 80, 120 y 160W, respectivamente (figura 1). Los tiempos de exposición de 12 y 17h fueron controlados con un programador de encendido automático.

En cada corrida, las muestras se captaron diariamente por 5 días. Para el análisis de los coliformes totales (CT) y fecales (CF) se tomaron en envases de vidrio estéril de 500mL y para la clorofila a, en frasco ámbar de 25 mL. El pH, la temperatura y OD fueron medidos en sitio, empleando un equipo de campo Orión Star 3. En la tabla 1 se observan el total de los parámetros analizados.

Finalmente se analizó el efecto de la luz y TEL, gráficamente y estadísticamente, empleando ANOVA como prueba de hipótesis.

Determinación de la constante de decaimiento bacteriano (Kb)

Se determinó la constante de decaimiento bacteriano (Kb) para cada reactor en cada corrida, a través de las siguientes ecuaciones:

Constante de decaimiento bacteriano real (Kb real). Los valores experimentales de la constante de decaimiento bacteriano se obtuvieron aplicando la ley de Chick (1910), tomado de Bracho (17)

Tabla 1

Parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos

| Parámetro | Método |
|--|--------------------------|
| Demanda Química de Oxígeno (DQO) | 5220-C |
| Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) | 4500-N _{org} -B |
| Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃) | 4500-NH ₃ -B |
| Fósforo Total (PT) | 4500-P |
| Sólidos Suspendidos Totales (SST) | 2540-D (105°C) |
| Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) | 2540-E (550°C) |
| Nitratos (N-NO ₃) | 4500-NO ₃ -E |
| Nitritos (N-NO ₂) | 4500-NO ₂ -B |
| pH | 4500-H+ |
| Turbidez | 2130-B |
| Oxígeno Disuelto | 4500-O-C |
| Temperatura | 2250 |
| Coliformes totales y fecales | Ayres y Mara |

Fuente: Standard Methods (1999) y Ayres y Mara (1996).

$$K_b = \frac{\log N_t - \log N_i}{0,434(t_f - t_i)} \quad [2]$$

donde:

Ni: Concentración inicial de coliformes

Nt: Concentración de microorganismos supervivientes al cabo del tiempo t.

ti : Tiempo inicial (horas)

tf : Tiempo de supervivencia (horas).

La gráfica experimental para cada TEL e intensidad de luz, fueron ploteadas a través del programa Microsoft Excel. Se realizó una regresión lineal en cada caso, para luego tomar dos puntos sobre la recta e introducirlos en la ecuación 1, con lo cual se obtuvo Kb.

Constante de decaimiento bacteriano (Kb teórico) de acuerdo a la ecuación de Marais (1974). La ecuación de Marais se ha utilizado para la estimación del cálculo de Kb teórico en las lagunas de maduración, siendo linealmente dependiente de la temperatura. Permitiendo realizar una comparación con respecto al cálculo real. La ecuación que predice Kb es la siguiente:

$$K_b = 2,6(1,19)^{T-20} \quad [3]$$

donde:

Kb: Constante de decaimiento bacteriano (d^{-1}).

T : Temperatura del agua en la laguna ($^{\circ}C$).

Constante de decaimiento bacteriano predicha (Kb teórica), de acuerdo a Bracho y col. (2009). Bracho y col. (16), demostraron que Kb es linealmente dependiente de otros parámetros, como el TEL, pH, y OD.

$$K_b = 0,16568(TEL) + 0,29851(pH) - 0,11888(OD)$$

donde:

Kb : Constante de decaimiento bacteriano (d^{-1}).

TEL: Tiempo de exposición a la Luz (horas).

OD : Oxígeno disuelto (mg/L).

Análisis estadístico

Se aplicó la prueba de hipótesis con respecto a la varianza, con la finalidad de demostrar la diferencia significativa para las siguientes corridas:

- Para un mismo TEL a diferentes intensidades.
- Para una misma intensidad y diferentes TEL.

Resultados y discusión

Los seis reactores fueron ensayados en las mismas condiciones de temperatura ($27^{\circ}C$) con la finalidad de truncar esta variable. En las figuras 2 y 3 se demuestra que al aumentar la intensidad de luz se genera un mayor decaimiento, ocurriendo máxima muerte bacteriana para el mayor TEL (17 h) e intensidad de luz (160W), alcanzando un reducción de 4,5 logaritmo, en comparación al experimento de 40W que solo disminuyó 3 logaritmo en la misma condición en estudios.

Los mecanismos que actúan en este proceso son la foto-oxidación (9, 14, 17-19). Es importante mencionar que durante la oscuridad existe la muerte bacteriana, tal como ocurre en el experimento de cero horas de luz cuya reducción fue la mínima de $2,3 < 4,5$ logaritmos a 160W. Esto significa que los logaritmos reducidos por encima de 2,3 se encuentran vinculados a la intensidad y TEL, puesto que la temperatura fue constante.

La concentración de clorofila *a* fue directamente proporcional a la intensidad de luz (figura 4), generándose las condiciones antes mencionadas, e inversamente proporcional a la oscuridad. En ausencia de luz, la concentración de clorofila *a* desciende rápidamente durante los 5 días de monitoreo, lo cual resulta en una reducción de bacterias menor que en presencia de luz, como consecuencia de la inactividad fotosintética, que influye en el pH y OD.

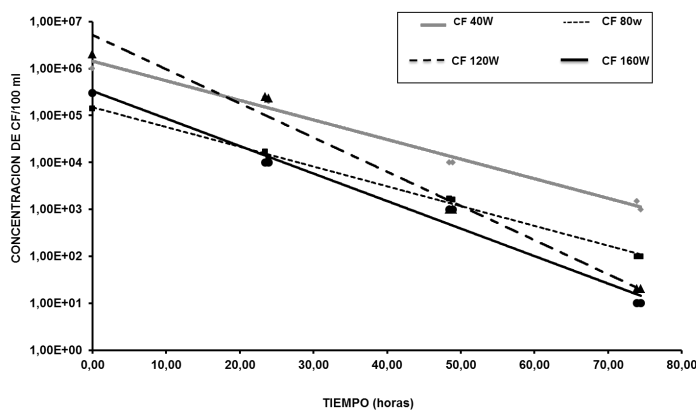


Figura 2. Kb para diferentes intensidades de luz (TEL=17h a 27°C).

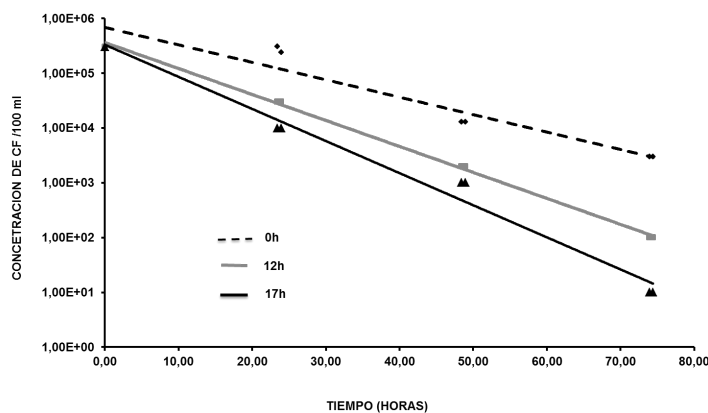


Figura 3. Kb para diferentes TEL (Intensidad= 160W a 27°C).

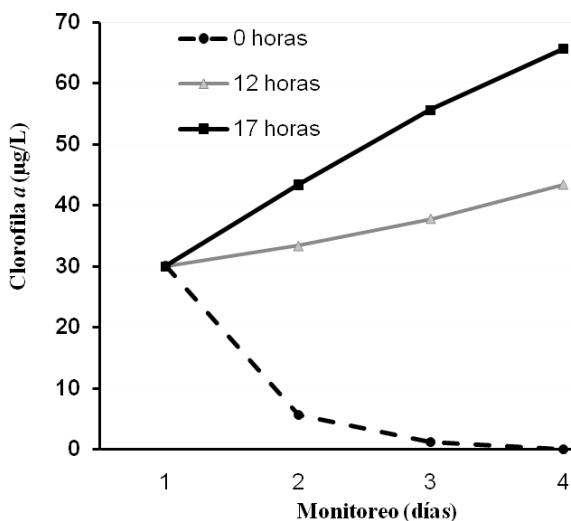


Figura 4. Concentración de Clorofila *a* (160W).

Investigaciones realizadas por Oufdou (tomado de Bitton (12)), demuestran que el valor de Kb en presencia de luz es 3 veces mayor a lo obtenido en la oscuridad. Otros autores (9, 19), reportan una remoción del 85% en ausencia de luz y 99% en presencia de luz, confirmando lo obtenido por Oufdou. Los resultados encontrados en este estudio, mínima remoción de 40% en ausencia de luz (0 h) y la máxima de 81,7% en presencia de luz (160W) son comparable por lo reportado por otros autores (9, 12, 19).

La remoción de DQO osciló entre 15 y 68%, la del NTK entre 19 y 74% y los ST se reducen entre 20 y 50% para cero y 160W (TEL= 17h), respectivamente.

Determinación de la constante de decaimiento bacteriano (Kb)

En este caso, se estimó Kb mediante el modelo de Marais (7) para 27°C vs el modelo de Bracho y col. (16). El primer modelo, arroja un valor único de $Kb_{teórico} = 8,79 \text{ d}^{-1}$, mientras que el segundo estima nueve Kb, cada uno relacionado con su tiempo de exposición y la intensidad de luz de cada reactor. Al comparar los datos experimentales vs los reales, se observa que los resultados del segundo modelo, estiman Kb, con una desviación aproximada dentro del error estándar del modelo (tabla 2). Por otra parte, se confirma lo reportado por diferentes investigadores que asocian la desaparición de las bacterias con la luz bien sea por su intensidad o TEL (9, 13, 16, 20). Existen otros factores que pueden estar vinculados, como la naturaleza del agua (21), considerando que la analizada, corresponde a origen doméstico. La luz resulta en un papel tan importante, que Fisher y col. (22) proponen nuevos materiales para absorber la luz para acelerar la

inactivación de las bacterias y virus mediante la desinfección solar.

Análisis estadístico: prueba de hipótesis (ANOVA)

Esta prueba indica, una diferencia significativa tanto para la remoción de microorganismos (CT y CF), como para la constante de desaparición de bacterias (Kb), demostró el efecto del TEL e intensidad sobre ellos (tabla 3).

El análisis de la varianza, para los parámetros fisicoquímicos presentó diferencias significativas ($F_{cal} > F_{crítico}$, con $P < 0,05$), en el caso de la intensidad de 160 W a los diferentes TEL, OD, pH, clorofila a y los sólidos.

Evaluación del efecto de la intensidad de la luz fluorescente para cada periodo de exposición

Los coliformes fecales y totales, presentan poca variación entre cada TEL (figura 5),

Tabla 2
Kb experimental Vs Kb estimada en función del pH, OD y TEL

| Intensidad de Luz (W) | Kb Real | | | *Kb = 0,16568(TEL)+ 0,29851(pH)- 0,11888(OD) | | |
|-----------------------|-------------------------------|------|------|--|------|------|
| | Tiempo de Exposición a la Luz | | | Tiempo de Exposición a la Luz | | |
| | 0 h | 12 h | 17 h | 0 h | 12 h | 17 h |
| 0 | 2,00 | - | - | 1,90 | - | - |
| 40 | | 2,40 | 2,45 | | 3,87 | 4,71 |
| 80 | | 2,17 | 4,16 | | 3,77 | 4,55 |
| 120 | | 4,27 | 4,35 | | 3,42 | 4,09 |
| 160 | | 3,0 | 3,4 | | 3,62 | 4,31 |

Fuente: *Bracho y col. (2009).

Tabla 3
Análisis estadístico para la constante de desaparición (Kb) y los coliformes para cada intensidad y tiempo de exposición de luz

| Parámetros | Fcal | P (<0,05) | Fcrítica |
|--|-----------|-----------|----------|
| Constante de Decaimiento Bacteriano (Kb) | 168,32666 | 0,0000001 | 4,25649 |
| Coliformes Fecales (CF) | 5,57754 | 0,02657 | 4,25649 |
| Coliformes Totales (CT) | 36,03247 | 0,00005 | 4,25649 |

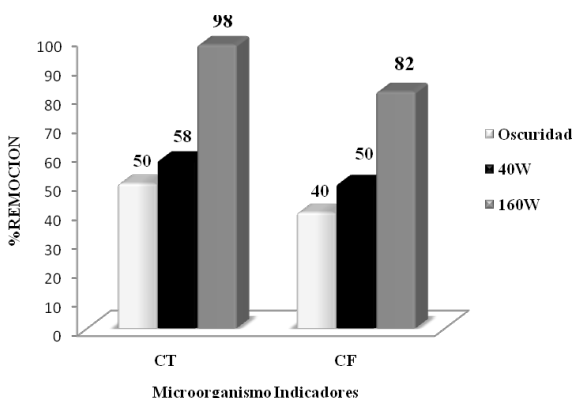


Figura 5. Porcentaje de remoción para los microorganismos indicadores de contaminación para 40 y 160W.

como consecuencia a la baja concentración de OD, dominando el mecanismo de competencia y predación de nutrientes. Esta afirmación se comprueba con la prueba de hipótesis con respecto a la varianza, la cual indica que no existe una diferencia significativa entre los diferentes TEL para esta intensidad de luz.

La prueba de hipótesis entre la desaparición de la bacterias entre los experimentos de 40 y 160 W revelan una diferencia significativa con un $F_{cal} = 5,57754 > F_{crítico} 4,25649$, donde $P = 0,02657 < 0,05$.

Conclusiones

La constante de desaparición de los coliformes fecales (Kb) varía en cada TEL e intensidad de luz, para una temperatura constante de 27°C, demostrándose que estos factores son importantes en el decaimiento bacteriano.

El cálculo de Kb por la ecuación de Marais es un 157% mayor a los datos experimentales obtenidos en esta investigación, por lo que se debe considerar esta discrepancia en el diseño de lagunas de maduración.

Se confirma que para cada TEL e intensidad de luz, existe un Kb. Por esta razón, el modelo en función de la temperatura (27°C)

se debate, ya que el mismo resulta en un solo $K_b = 8,79 d^{-1}$, en contraposición al modelo en función del pH, TEL y OD, que estima tantos Kb, como los obtenidos experimentalmente.

El cálculo de $K_b_{teórico}$, mediante la ecuación de Bracho y col. (16), predice dentro del error estándar del modelo en presencia de luz, mientras que en ausencia de luz es similar puesto que esta condición es la misma en todos los experimentos.

En la oscuridad predominan los mecanismos de predación y competencia de nutrientes, mientras que en presencia de luz, se tiene este mecanismo y se incorpora el mecanismo de foto-oxidación, el cual es directamente proporcional a la intensidad de luz y el TEL.

Agradecimientos

Esta investigación fue lograda gracias al financiamiento del CONDES, al apoyo del Centro de Investigación del Agua y al HIDROIAGO.

Referencias bibliográficas

1. Yanez F. **Seminario Regional de investigación sobre lagunas de estabilización/CEPIS**. Lima (Perú). 1986.
2. ILANIS J.S, OGUNROMBI J.A. **Wat Res** 18(8): 941-944. 1984.
3. MORENO, M.D. **Wat Res** 24(8). 1025-1030. 1990.
4. YÁNEZ, F. **Lagunas de estabilización Teoría, diseño, evaluación y mantenimiento**. Imprenta Monsalve. Cuenca-Ecuador. 1993.
5. VORKAS C., LLOYD B. **4th LAWQ Int. Conf. On waste stabilization ponds: Technology and the environment, Marrakech**. 1999.
6. Smith E., Hegazy S. El-Aassar N. **5th International IWA specialist conference on waste stabilization ponds**. 121-128. New Zealand. 2002.

7. Marais G.V.R. **J Environ Eng Div ASCE** 119-139. 1974.
8. SARIKAYA H., SAATCI M. **SCE** 113(2): 366-382. 1987.
9. CURTIS T.P., MARA D.D., SILVA S.A. **Water Sci Techno** 26: 1729-1738. 1992.
10. MAYO A. **J Environ Div** 121(2):140-152. 1995.
11. VON Sperling M. **Wat Res** 33(6): 1435-1448. 1999.
12. BITTON, G. **Wastewater Microbiology**. Editorial Wiley-Less. Gainesville. 2nd edition. 252-255. 1999.
13. XU P., BRISSAUD F., FAZIO A. **Wat Res** 36(12). 3074-3082. 2002.
14. CRAGGS RJ., ZWART A., NAGELS J.W., DAVIES-COLLEY RJ. **Ecol En** 22(2): 113-122. 2004.
15. BRACHO N.R., LLOYD B., ALDANA G. **Wat Res** 40(8): 1677-1685. 2006.
16. BRACHO N., FERNÁNDEZ P., ZAMBRANO C., PIRE M., SAULES L. **Bol Centro Invest Biol** 43(3):367-376. 2009.
17. BRACHO, N. Optimization of fecal coliform removal performance in three tertiary maturation ponds (Para obtener el título de PhD en Ingeniería Ambiental). Facultad de Ingeniería, CEHE, University of Surrey. Inglaterra (UK). 400 pp. 2003.
18. MARA D.D., PEARSON H.W. Design manual for waste stabilization ponds in Mediterranean countries. European Investment Bank. Lagoon Technology International. Leeds, United Kingdom. 50. 1998.
19. BRACHO N.R., CASLER C.L. Improving fecal coliform removal in maturation ponds. Nova Science Publisher, Inc., New York (USA). Chapter 7. 203-221. King, M.B. (ed.), **Progress in environmental microbiology**. 2008.
20. DAVIES-COLLEY R.J., HICKEY C.W., QUINN J.M. **New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research** 29(2): 235-250. 1995.
21. SJOLANDER I. Modeling the decay of *E. coli* and *Ascaris suum* in wastewater irrigated vegetables: implications for microbial health risk reduction (Master Thesis). Department of Mathematical Sciences Technology. Norwegian University of life. Noruega. 74 pp. 2012.
22. FISHER M., IRIARTE M., NELSON K. **Wat Res** 46(6): 1745-1754. 2012.