

**ESTUDIO DE VARIABLES FISICOQUÍMICAS PARA LA ESTANDARIZACIÓN
DEL TIEMPO DE COSECHA DE LA LENTEJA DE AGUA EN LA LAGUNA DE
TRATAMIENTO TERCIARIO DE LA PTAR DE UNA INDUSTRIA DE LÁCTEOS.**

**CLAUDIA XIMENA LAGO LEÓN
DIEGO ALEJANDRO GONZÁLEZ BARRETO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2008**

**ESTUDIO DE VARIABLES FISICOQUÍMICAS PARA LA ESTANDARIZACIÓN
DEL TIEMPO DE COSECHA DE LA LENTEJA DE AGUA EN LA LAGUNA DE
TRATAMIENTO TERCIARIO DE LA PTAR DE UNA INDUSTRIA DE LÁCTEOS.**

**CLAUDIA XIMENA LAGO LEÓN
DIEGO ALEJANDRO GONZÁLEZ BARRETO**

**Monografía para optar al título de
Especialista en Ingeniería Ambiental**

**Director:
Ing. MSc. Mario Muñoz Bernal**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2008**

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCION	13
1.1. CONTEXTO	13
1.2. ANTECEDENTES	14
1.3. ALCANCE	16
1.4. OBJETIVOS	17
1.4.2. Objetivos Específicos	17
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	18
2.1. Lenteja de agua	18
2.2. Remociones de carga contaminante por medio de la lenteja de agua	22
2.3. EUTROFICACIÓN	22
2.3.1. Variables abióticas	23
2.3.2. Variables bióticas	27
3. METODOLOGÍA	29
3.1. Descripción de variables medidas	29
3.1.1. Variable biótica	29
3.1.2. Variables abióticas	29
3.1.3. Carga externa de nutrientes	29
3.1.4. Tiempo de Residencia	30
3.1.5. Morfología de la laguna	30

3.2. Métodos de medición	31
3.3. Muestreo	31
4. RESULTADOS	34
4.1. Cuantificación de la cantidad de lenteja de agua por unidad de área	34
4.2. Remoción de nitrógeno y fósforo vs cantidad de lenteja	34
4.3. Remoción nitrógeno y fósforo vs remoción DBO5 (estimación mensual)	35
4.4. Determinación de la concentración de saturación de OD en la laguna	36
4.5. Estimación del tiempo de residencia en la laguna	36
4.6. Determinación de humedad y contenido de nitrógeno de la lenteja.	36
4.7. Tendencia OD y pH vs cantidad de lenteja en el espejo de agua	37
4.8. Comparación comportamiento OD en tiempo de ensayo vs laguna eutroficada.	37
4.9. Comparación comportamiento pH tiempo de ensayo vs laguna eutroficada	40
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
6. CONCLUSIONES	45
7. RECOMENDACIONES	46
8. BIBLIOGRAFÍA	49
9. ANEXOS	51

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Taxonomía familia <i>Lemnaceae</i> .	18
Tabla 2. Cantidad de lenteja en la laguna (en área) durante muestreo.	32
Tabla 3. Remoción de nitrógeno y fósforo en función de la cantidad de lenteja sobre el espejo de agua.	34
Tabla 4. Resultados determinación humedad y % nitrógeno lenteja.	36
Tabla 5. Resultados determinación de N removido / mes.	37
Tabla 6. Resultados ensayo. Medición de OD, pH y T.	54
Tabla 7. Datos tomados con laguna eutroficada (2002).	54
Tabla 8. Resultados ensayos de nitrógeno y fósforo.	54
Tabla 9. Datos OD ensayo	55
Tabla 10. Datos OD laguna condición eutroficada.	55
Tabla 11. Datos pH ensayo.	56
Tabla 12. Datos pH laguna condición eutroficada.	56

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Variación de pH en vertimiento y promedio laguna. 2002.	15
Figura 2. Variación de OD en vertimiento y promedio laguna. 2002	15
Figura 3: Imagen: <i>Lemna minuta</i> .	19
Figura 4. Descripción de los factores que inciden en el proceso de eutroficación.	28
Figura 5. Laguna de pulimento.	30
Figura 6. Perfil longitudinal de la laguna de pulimento. Estudio batimetría	31
Figura 7. Cantidad lenteja semana 1	32
Figura 8. Cantidad lenteja semana 2	32
Figura 9. Cantidad lenteja semana 3	33
Figura 10. Cantidad lenteja semana 4	33
Figura 11: Cantidad lenteja semana 5	33
Figura 12. Remoción de nitrógeno y fósforo vs cantidad de lenteja en la laguna.	35
Figura 13. Remoción nitrógeno y fósforo vs remoción DBO5.	35
Figura 14. OD y pH vs cantidad de lenteja en el espejo de agua.	38
Figura 15. Variación OD durante 4 semanas de ensayo.	38
Figura 16. Variación OD durante 5 días con laguna eutrofizada. 2002.	39
Figura 17. Variación OD tomando 5 días de ensayo.	39
Figura 18. Variación pH durante 4 semanas de ensayo.	40
Figura 19. Variación OD durante 5 días con laguna eutrofizada. 2002.	41

Figura 20. Variación pH tomando 5 días de ensayo.	41
Figura 21. Índice de estado trófico de Carlson	46
Figura 22. <i>Arabaena spiroides</i> , indicador de eutroficación.	47
Figura 22. Curva de remoción de DBO5 y DQO estimada para el tiempo de ensayo (5 semanas).	52
Figura 23. Curva de remoción de DBO5 y DQO estimada para 2006.	52
Figura 24. Curva de remoción de DBO5 y DQO estimada para 2007.	53
Figura 25. Curva de remoción de DBO5 y DQO estimada para 2008 (a junio).	53

TÍTULO: ESTUDIO DE VARIABLES FISICOQUÍMICAS PARA LA ESTANDARIZACIÓN DEL TIEMPO DE COSECHA DE LA LENTEJA DE AGUA EN LA LAGUNA DE TRATAMIENTO TERCIARIO DE LA PTAR DE UNA INDUSTRIA DE LÁCTEOS¹.

Autores: LAGO L, Claudia²;
GONZÁLEZ B, Diego ²

Palabras clave: Lenteja de agua, eutroficación.

En la Planta de Derivados Lácteos se diseñó un tratamiento terciario de aguas residuales que consiste en una laguna de pulimento cuyo objetivo es remover parte del nitrógeno y el fósforo que puedan pasar del efluente del zanjón de oxidación.

La remoción de estos macronutrientes se hace esencialmente por medio de la lenteja de agua que crece en la superficie de la laguna. Como cualquier sistema biológico de tratamiento, la laguna requiere ser operada de tal forma que las condiciones aseguren la calidad del efluente.

La cosecha de la lenteja es una actividad clave para garantizar la adecuada operación de la laguna; se tiene estandarizada una operación retiro de lenteja que deje libre 1/3 de espejo de agua a mas tardar cada 3 meses; sin embargo este procedimiento no está basado en un análisis juicioso de datos de remoción si no en la experiencia de los Ingenieros que la diseñaron.

El presente trabajo pretende validar este procedimiento y busca definir el tiempo óptimo de retiro de lenteja asociada a su capacidad de remoción y que prevenga la presencia de la eutroficación.

La metodología involucró el análisis de las variables fisicoquímicas que estuvieron asociadas a la medición del proceso de eutroficación y compararlas con la situación actual para definir el estado trófico de la laguna.

Por otro lado, se propuso hacer una evaluación del las variables fisicoquímicas de monitoreo con el objeto de validar cual es la condición optima del sistema relacionado con la cantidad de lenteja.

¹ Trabajo de grado

² Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental. Director MSc. Mario Muñoz.

TITLE: STUDY OF PHYSICOCHEMICAL VARIABLES FOR THE STANDARDIZATION OF HARVEST TIME OF DUCKWEED IN THE WWTP TERTIARY TREATMENT LAGOON OF A DAIRY PLANT¹.

Authors: LAGO L, Claudia²;
GONZALEZ B, Diego²

Keywords: Duckweed, eutrophication.

At the Dairy Plant an advance wastewater treatment was designed composed of a polishing pond whose objective is removing part of nitrogen and phosphorus that get into the system coming from the oxidation area, activated by specific type of sludge.

Nitrogen and phosphorus removal is done mainly by duckweed that grows on the surface of the lagoon. Like other biological systems for water treatment, the lagoon needs to be maintained so that there will be suitable conditions of operation guarantying high quality water.

The removal of duckweed is the main activity in the system in order to ensure well operating conditions leading us to standardizing the activity that makes the system 1/3 free of duckweed on the surface of the lagoon. However, this procedure is not based on data analysis; it is designed by engineers' experience instead.

Our work wants to validate that procedure defining optimal conditions associated with duckweed's removal ability and find a condition to prevent eutrophication.

This work directly analyzed physical and chemical features associated with eutrophication measurements which set signals to correct and compare them with the current situation in order to measure the lagoon status.

Finally, it was proposed to have an evaluation of physical and chemical water features associating duckweed quantity and growth rate to set the optimal condition of the system.

¹ Grade Monograph

² Chemical Engineering School. Enviromental Engineering Specialist. Director MSc. Mario Muñoz

1. INTRODUCCION

1.1. CONTEXTO

La laguna para tratamiento terciario de las aguas residuales provenientes de los procesos productivos de una industria de derivados lácteos está diseñada para reducir la concentración de nitrógeno y fósforo proveniente del tratamiento secundario. Para este fin se está empleando tratamiento biológico con macrófitas, entre las cuales se encuentra la lenteja de agua, constituyéndose en la planta de mayor importancia para la remoción de los elementos mencionados y para la calidad del agua presente en la laguna.

El exceso de lenteja sobre la superficie de la laguna contribuye a desestabilizar la dinámica biológica y fisicoquímica del agua presentándose como mayor inconveniente el fenómeno de eutroficación debido al rápido crecimiento de la población de lenteja con la consecuente generación de condiciones anaeróbicas y agotamiento del oxígeno disuelto en detrimento de la calidad del agua.

En el año 2002 se encontró que el parámetro de pH en el tiempo comprendido entre mediodía y el comienzo de la noche no se cumplía; fue así como se encontraron variaciones muy fuertes en las variables de pH y oxígeno disuelto (OD) principalmente, dependiendo del día o la noche, con mediciones día a día, lo que hizo sospechar eutroficación. Lo anterior es una hipótesis preliminar que se planteó para asociar el fenómeno de eutroficación con la cantidad de lenteja de agua presente en la laguna. Se confirmó lo planteado, teniéndose que retirar por completo la lenteja de agua y hacer un dragado a la mayor parte de la laguna.

La cosecha de la lenteja se ha realizado bajo los parámetros dados por un instructivo que define cantidad a retirar y frecuencia máxima, el cual fue documentado basado en criterios cualitativos de tiempo de retiro. La definición del momento de retiro está ligada a la cantidad de lenteja de agua que se encuentra en la superficie de la laguna. Lo que se buscó con la presente monografía fue definir un criterio técnico basados en los parámetros fisicoquímicos del agua de la laguna para estandarizar el tiempo de cosecha de la lenteja y poder sugerir modificación de lo estipulado en el instructivo.

1.2. ANTECEDENTES

La laguna de pulimento se ha establecido como una etapa final para el tratamiento de las aguas residuales industriales de la fabricación de derivados lácteos así como de las aguas residuales domésticas generadas por las actividades antropogénicas realizadas en la planta.

La operación de tratamiento de aguas residuales consta de un tanque de igualación y homogenización (TIH) donde se lleva a cabo la homogenización de las aguas industriales y domésticas que llegan para ser tratadas y se hace el ajuste de pH. Posteriormente pasa a un sistema de tratamiento primario constituido por un clarifloculador y un DAF. El sistema de tratamiento secundario lo constituye un filtro percolador y un zanjón de oxidación de lodos activados. Se hace espesamiento de lodos para ser deshidratados y dispuestos para compostaje. El efluente pasa a un sistema terciario que es la laguna de pulimento que fue concebida como un paso para remover el fósforo y el nitrógeno sobrante de la operación del tratamiento biológico.

Esta laguna debe ser mantenida asegurando que las condiciones de pH, temperatura, oxígeno disuelto, nitrógeno, fósforo, incorporación de materia orgánica, retiro de la lenteja de agua, entre otras, aseguren que no se produzca eutroficación.

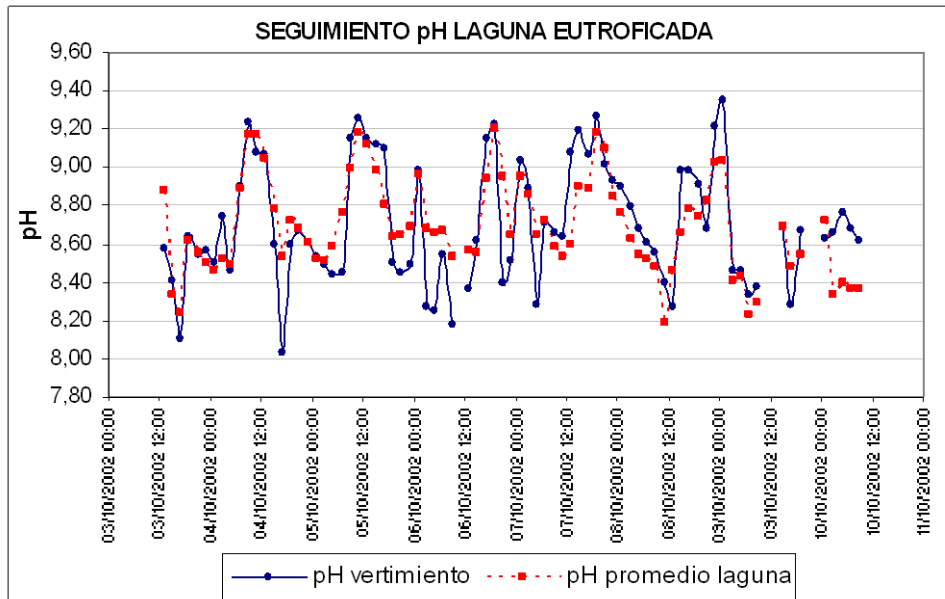
En la superficie de la laguna crece la lenteja de agua que cubre parte del espejo de agua y que tiene una interacción biológica con todo el ecosistema allí presente.

La presencia de la lenteja debe ser controlada para evitar que cubra todo el espejo de agua y se genere anaerobiosis y el fenómeno de eutroficación.

La laguna objeto de esta investigación tiene un área total de 2946 m², un perímetro calculado de 388 m, volumen de diseño 10000 m³, con una diferencia de nivel promedio entre la cota fondo y la cota nivel de agua, de 2.41 m, según el estudio de batimetría realizado en 2002 [9].

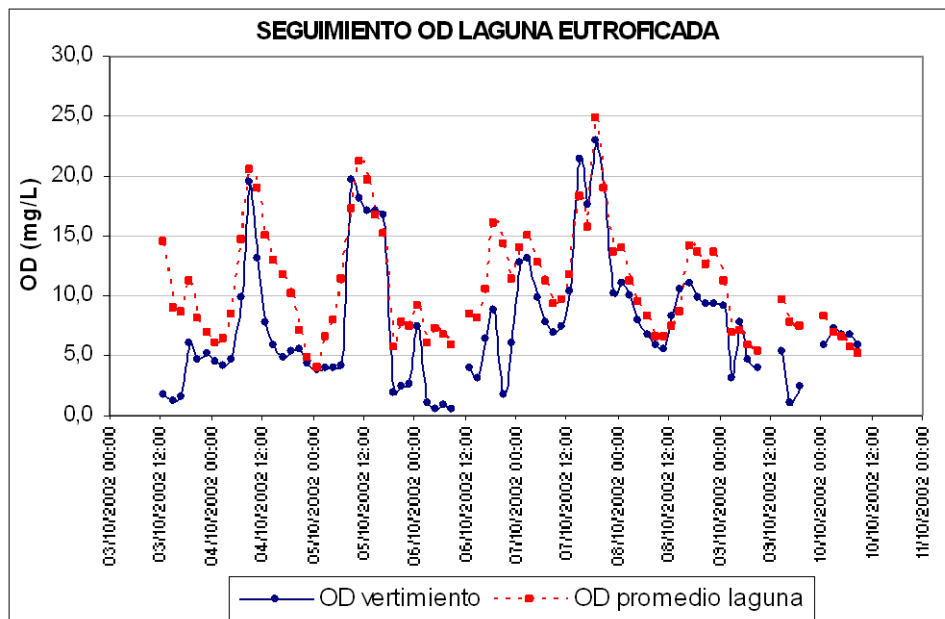
En el pasado se han presentado dos eventos de eutroficación, dependientes principalmente del exceso de lenteja presente en el espejo de agua, cuyos datos, que permitieron establecer esta condición, se presentan a continuación en las figuras 1 y 2, con el fin de dar una contextualización del estado presentado en 2002 y 2004 que conllevó a tener que dragar la laguna en el año 2004. Los datos de vertimiento corresponden a valores tomados a la salida de la laguna y los datos promedio laguna corresponden a valores medidos en varios puntos dentro de la laguna.

Figura 1. Variación de pH en vertimiento (salida laguna) y promedio laguna. Estado de eutroficación laguna. 2002.



Fuente: Estudio eutroficación .Presentación Ing. Mario Muñoz. Jefe Gestión Ambiental. Año 2002.

Figura 2. Variación de OD en vertimiento (salida laguna) y promedio laguna. Estado de eutroficación laguna. 2002



Fuente: Estudio eutroficación .Presentación Ing. Mario Muñoz. Jefe Gestión Ambiental. Año 2002

Estas variaciones notables de los parámetros a lo largo del tiempo de medición hicieron confirmar el fenómeno de eutroficación y cuyo resultado fue el retiro total de la lenteja del espejo de agua y su posterior dragado. Posterior a estos dos eventos se documentó un instructivo donde se define un tiempo de retiro estimado de 3 meses, dejando 1/3 del espejo de agua cubierto por lenteja; el tiempo de cosecha fue definido bajo conceptos cualitativos y por experiencia del analista ambiental de la empresa.

En la actualidad se monitorean las variables de pH, DBO5, DQO y SST en la salida de la laguna pero no se ha profundizado en la relación de éstas con la cantidad de lenteja de agua que debe estar presente y con qué frecuencia se debe hacer la remoción para prevenir la ocurrencia de un nuevo proceso de eutroficación.

1.3. ALCANCE

El presente estudio tiene como alcance estudiar las variables fisicoquímicas más empleadas en el seguimiento y control de la calidad del agua en la laguna de compensación de la PTAR con el crecimiento de la lenteja de agua, para poder determinar el momento adecuado de retiro de la planta del espejo de agua y evitar así la posible eutroficación. Este estudio se realizó analizando los datos obtenidos por los ensayos y las caracterizaciones efectuadas tanto por los operadores de la planta como por los autores de la monografía. Es claro que los resultados son un preliminar para ahondar más en un trabajo posterior, con una investigación más profunda y con una extensión de tiempo mayor.

No se dio una afirmación veraz del parámetro fisicoquímico predominante, dadas las limitaciones del trabajo de grado; lo que se busca es dejar planteado el tema con buenas bases teóricas y un concepto técnico preliminar para una investigación robusta.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Estandarización del tiempo de retiro o cosecha de la lenteja de agua en la laguna de la PTAR.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Análisis de las variables fisicoquímicas para construir un modelo que permita estandarizar el tiempo de retiro
- Elaboración de un modelo que permita asociar el crecimiento de la lenteja con las concentraciones de nitrógeno y fósforo y su dependencia con los parámetros fisicoquímicos estudiados.
- Determinación de los parámetros fisicoquímicos que permitan predecir con certeza el inicio del fenómeno de eutroficación.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Lenteja de agua

La lenteja de agua que se utiliza en el tratamiento terciario de las aguas residuales (laguna de pulimento), de acuerdo a su taxonomía, pertenece a la Familia *Lemnaceae*, con nombre *Lemna* cf. *minuta* Kunth, según caracterización taxonómica efectuada en laboratorio del Herbario Nacional Colombiano, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá (Anexo 1). La tabla 1 presenta la clasificación taxonómica de la familia *Lemnaceae* y la figura 3 presenta una imagen de la *Lemna minuta*.

Tabla 1. Taxonomía familia *Lemnaceae*.

<i>Reino</i>	Plantae
<i>Sub-reino</i>	Tracheobionta – Plantas Vasculares
<i>Súper-división</i>	Spermatophyta – Plantas con Semillas
<i>División</i>	Magnoliophyta – De las Angiospermas, plantas con flores
<i>Clase</i>	Liliopsida – Monocotiledónea
<i>Subclase</i>	Arecidae, de Arum
<i>Orden</i>	Arales, de Arum
<i>Familia</i>	Lemnaceae – Lenteja de agua
<i>Especie</i>	<i>minuta</i> Kunth

Fuente: Sistema de Información Taxonómica Integrada (Integrated Taxonomic Information System-ITIS).

Figura 3: Imagen: *Lemna minuta*.



Fuente: www.floralimages.co.uk

La lenteja de agua se encuentra entre las plantas con flores, más pequeñas y simples, monocotiledóneas flotantes. Su tamaño varía entre 1 y 15 mm. Estas plantas crecen flotando en aguas dulces, tranquilas o de lento movimiento alrededor del mundo, excepto en las regiones más frías.

Las hojas de las lentejas de agua son comúnmente llamadas frondas. A diferencia de las hojas ordinarias de la mayoría de las plantas, cada fronda de la lenteja de agua contiene brotes a partir del cual crecen más frondas. Estos brotes están escondidos en bolsas a lo largo del eje central de las frondas más viejas. Al crecer, nuevas frondas emergen a los lados de la fronda madre. Mientras maduran, las frondas hijos se mantienen unidos a las frondas madres. Las hojas o fronda de la planta toma el oxígeno y el CO_2 de la atmósfera y efectúa la fotosíntesis mientras que a través de sus raíces sumergidas dentro del agua toman los nutrientes. Además de la función de adsorción de nutrientes, las raíces sirven para albergar bacterias aerobias, adsorción de sólidos suspendidos y filtración.

Por otra parte, la formación de la alfombra de lenteja de agua flotando en la superficie del cuerpo de agua disminuye los niveles de luz en el fondo del cuerpo de agua alterando los ecosistemas acuáticos naturales. Cuando la lenteja de agua cubre toda la superficie de la laguna se impide la entrada de oxígeno de la atmósfera al agua por lo que las condiciones de oxígeno disuelto pueden llegar a ser muy bajas y hasta cero creando una condición de anaerobiosis; la zona de las raíces transportan el oxígeno molecular por lo que en estas se pueden fijar microorganismos aerobios así las condiciones de la laguna sean anaerobias.

Las lentejas de agua tienen excelentes propiedades, entre las que se destacan:

- Potencial como agente biológico en el tratamiento de aguas servidas y estancadas
- Por ser ricas en proteínas, su utilización como alimento de peces forrajeros, aves de corral y cerdos.

Los investigadores también están utilizando estas plantas para estudiar la toxicidad de sustancias peligrosas.

La lenteja de agua es una planta que asimila los nutrientes que se liberan en la descomposición de la materia orgánica presente en las aguas residuales de consumo humano, tiene una gran capacidad de crecimiento y un contenido de proteína vegetal mayor que el de la soya.(1)

Las plantas acuáticas, denominadas también macrófitas, desempeñan un papel importante en los ecosistemas acuáticos. Brindan directa o indirectamente alimento, protección y un gran número de hábitats para muchos organismos de estos ecosistemas. Muchas de estas plantas son útiles para el ser humano, puesto que sirven de alimento, son materia prima para la industria o se usan en procesos de biorremediación, ya que pueden absorber algunas sustancias disueltas y brindar oxígeno mediante la fotosíntesis. Sin embargo, en algunos cuerpos de agua artificiales podrían crear problemas, porque pueden interferir con el uso que le da el hombre a esa agua al obstruir su flujo o la navegación y al crear ambientes propicios para plagas, enfermedades y vectores que afectan la salud humana (Cook y Gut 1974).

La tasa de reproducción de la lenteja de agua puede estar de 0,1 a 0,5 día lo cual significa que en condiciones ideales puede doblar su biomasa en dos días.

Las Lemnaceas tienen entre el 86 y el 97% de su peso en agua.

Los principales factores que afectan el crecimiento de la lenteja de agua son:

- Temperatura: Crece a rangos muy amplios de temperatura. De 25 a 31°C es la temperatura óptima de crecimiento.
- Iluminación: La energía solar, en el rango visible, es utilizado por la lenteja a través de sus pigmentos para hacer la fotosíntesis y para regular diferentes procesos.
- Densidad y cosecha
- Composición química del agua: El crecimiento se favorece con aguas con alto contenido de nutrientes
- pH: La solubilidad de muchos macronutrientes, entre ellos el fósforo, indispensables para el metabolismo de la lenteja de agua dependen del pH; por esta razón es muy importante llevar un monitoreo de esta variable. Por

otro lado el nitrógeno amoniacal es un nutriente preferido por la lenteja de agua, sin embargo altas concentraciones en especial de NH_3 , es muy tóxico para las plantas al igual que el ácido sulfhídrico pueden llegar a inhibir el crecimiento a altas concentraciones.

- El rango de pH óptimo está entre 5 y 7 dependiendo del género de Lemnaceas con un rango de tolerancia de 3 a 10.
- Salinidad y Conductividad: Tiene un amplio rango de tolerancia a la salinidad.
- Nitrógeno: Crece en un amplio rango de concentraciones de nitrógeno. Según lo reportado en la literatura un el rango óptimo es de 0,6 a 7 mg/L con límites máximos entre 200 mg/L y 2800 mg/L. Según Caicedo (2), esta diversidad de resultados puede ser explicada por diferentes factores, como la especie de nitrógeno presente en el agua: nitrógeno amoniacal (ión amonio, amoníaco), nitrógeno orgánico, nitritos, nitratos.
- Fósforo: El fósforo es uno de los principales factores para el crecimiento de la lenteja. Éste se presenta en estado de fosfatos.
- Otros elementos importantes como Potasio, Azufre y Cloro.
- Materia Orgánica
- Sustancias gaseosas: Oxígeno, CO_2 y ácido sulfhídrico.

Las macrófitas acuáticas han sido consideradas por varios autores como una plaga debido a su rápido crecimiento, ya que en ocasiones llegan a invadir lagunas, represas, canales de riego y generan varios problemas, al interrumpir el flujo del agua, propiciar eutroficación y crear ambientes para la crianza de vectores de enfermedades (Zambrano 1974, Cook *et al.* 1974). Sin embargo, si las plantas acuáticas se manejan adecuadamente, su poder de proliferación, capacidad de absorción de nutrientes y bioacumulación de contaminantes del agua las convierten en una herramienta útil en el tratamiento de aguas residuales

Dado que algunas plantas acuáticas se pueden convertir en plagas, se han reportado diferentes medidas de control a las poblaciones de estas especies, entre las más empleadas el control mecánico y el biológico. El control mecánico consiste en la remoción y corte por medios mecánicos de colonias y grupos pequeños de plantas con utilización de rastrillos especiales y aparatos cortadores colocados en botes. A este método se le puede señalar la desventaja de que la alteración ocasionada por la remoción causa estragos en otras poblaciones de organismos, sobre todo de animales, y es posible que haya necesidad de repetir el tratamiento con mucha frecuencia, lo que hace el método poco económico. Adicionalmente, es un método que sólo puede aplicarse en áreas pequeñas o medianas (Roldán 1992). El control biológico se fundamenta en la ubicación de animales característicos de ese hábitat; entre los animales utilizados se encuentran los peces, los moluscos y los mamíferos. El valor real de este método depende de la tasa de crecimiento de las malezas y del número y tasa de crecimiento de los animales introducidos (2)

2.2. Remociones de carga contaminante por medio de la lenteja de agua

El poder de proliferación de la lenteja de agua y su capacidad de absorción de nutrientes y bioacumulación de contaminantes del agua las convierten en una herramienta útil en el tratamiento de aguas residuales. Además, con base en los estudios de remoción de compuestos tóxicos por plantas acuáticas, se pueden considerar estos sistemas de tratamiento como una alternativa ecológica y económicamente viable, tanto para el tratamiento de los efluentes municipales domésticos como industriales.

Según Olguín y Hernández (1998), las características que deben contar las plantas acuáticas usadas para el tratamiento de las aguas residuales son las siguientes: alta productividad, alta eficiencia de remoción de nutrientes y contaminantes, alta predominancia en condiciones naturales adversas y fácil cosecha. *Lemna* cumple con todas estas características y gracias a esto ha sido empleada en sistemas de descontaminación de aguas. (2)

2.3. EUTROFICACIÓN

Según la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE, 1982), define a la eutroficación como “el enriquecimiento en nutrientes de las aguas, que provoca la estimulación de una serie de cambios sintomáticos, entre los que el incremento en la producción de algas y macrófitas, el deterioro de la calidad de agua y otros cambios sintomáticos resultan indeseables e interfieren con la utilización del agua “.

Originalmente, la eutroficación se consideraba como un proceso natural, que se llevaba a cabo durante millones de años en el cual un lago o pantano recibía los aportes de su cuenca de drenaje, los mismos que consistían en nutrientes, sedimentos y otros materiales alóctonos; con el tiempo sucedía que el sistema acuoso del lago se transformaba en una ciénaga, la cual al consolidarse se convertía en un sistema terrestre. Este proceso toma lugar en cientos de miles de años y es irreversible.

Actualmente es posible hablar de una “Eutroficación Cultural”, determinada por la intervención del hombre, el cual debido a su necesidad de extensión transforma su entorno. Las descargas de aguas servidas por ejemplo, son una de las más antiguas causas de la eutroficación cultural, ya que estas son ricas en nutrientes contribuyendo al cambio trófico del cuerpo receptor; otro ejemplo son los excesos de fertilizantes, los cuales son ricos en fósforos, sean estos naturales o químicos. La deforestación también influye en la carga de nutrientes, ya que los

escurrimientos al pasar por una tierra que no tiene protección, “lavan” la capa fértil y se llevan consigo los nutrientes de la misma.(3)

Se ha desarrollado el concepto estado trófico para referirse a la tasa de materia orgánica que es proporcionada por o para el lago, (Carlson, 1984), y evalúa el grado de eutroficación del mismo.

El proceso de eutroficación es el siguiente:

1. Se produce un crecimiento excesivo de las poblaciones de algas y plantas acuáticas.
2. Las aguas adquieren una coloración verdosa y pierden su transparencia.
3. La descomposición de la biomasa vegetal disminuye las cantidades de oxígeno disuelto (en ocasiones se llega a una ausencia total de oxígeno).
4. Esta descomposición de la materia orgánica en condiciones anaerobias origina productos tóxicos que dan mal olor y sabor al agua.
5. La composición de las poblaciones piscícolas se modifica.

La eutroficación de las aguas, en resumen, conduce a una degradación del medio y disminuye significativamente la calidad del agua. (5)

De acuerdo con numerosos autores, entre los que se encuentran Welch, 1952; Sawyer, 1966; Fruhet *al.*, 1966; Golterman, 1973 y Margalef, 1983, existe un grupo de características morfométricas (profundidad, margen de la cuenca, etc.), químicas (oxígeno hipolimnético y nutrientes) y biológicas (productividad de la biomasa, especies indicadoras, etc.) que definen los principales estados tróficos.

A pesar de la existencia de un gran número de indicadores, dicha caracterización es subjetiva, debido a la falta de escalas o límites que permitan de manera precisa atribuir una condición trófica a un embalse o una laguna.

En la actualidad existen modelos para evaluación de estado trófico, que incluyen los modelos de cuencas de captación, que proveen información de las cargas de nutrientes de toda la cuenca y que llegan al embalse, y los modelos de cuerpos de agua, que evalúan el estado trófico a partir de los nutrientes que se encuentran dentro del embalse; en estos últimos se encuentra el modelo de balance de masas para fósforo. (4)

Para conocer el estado de eutroficación de un cuerpo de agua sería necesario establecer una red de vigilancia que debería realizar las siguientes observaciones con el fin de diagnosticar dicho estado.

2.3.1. Variables abióticas

- Temperatura
- Oxígeno disuelto
- Fósforo total
- Nitrógeno total
- Turbiedad
- Color de agua
- Transparencia
- Sólidos disueltos
- Alcalinidad
- Conductividad
- pH
- Dióxido de carbono

Temperatura La luz solar desempeña un papel importante en la temperatura de los cuerpos de agua. Otros mecanismos también pueden afectar la temperatura de la laguna. Por ejemplo, agua de lagunas con muchos sólidos suspendidos pueden absorber la luz solar e incrementar la temperatura. La variabilidad en la temperatura de la laguna viene del clima, la elevación, la extensión de la vegetación a lo largo de la laguna y la importancia relativa de la entrada del agua subterránea. En algunos sistemas, las temperaturas tibias pueden incrementar la vulnerabilidad de peces e insectos a enfermedades y toxinas. Un aspecto importante de la temperatura es su influencia en los niveles de saturación del oxígeno disuelto, las temperaturas altas pueden reducir la cantidad de oxígeno disponible.

Oxígeno disuelto El aire de la atmósfera tiene un 21% de oxígeno, o solo 200,000 partes por millón (ppm). Las quebradas y los lagos tienen mucho menos oxígeno disuelto. De hecho, hay solo 12-15 ppm en agua fría saturada (Merritt y Cummins 1996). El oxígeno entra al agua de la atmósfera (turbulencia en la quebrada), o como un producto de la fotosíntesis de las plantas, tales como algas o fitoplancton. El oxígeno usado por los organismos es gaseoso, y no el oxígeno que forma la molécula de H₂O.

En las regiones cálidas en cierto ámbito de temperaturas, los organismos tienden a incrementar su actividad metabólica en agua cálida, requiriendo más oxígeno para mantener su metabolismo. Por lo tanto, los organismos acuáticos son más propensos a experimentar una gran tensión respiratoria en aguas cálidas. Midiendo el oxígeno disuelto (OD) en el agua es una forma de medir el potencial para la vida en la laguna. Menos de 5mg/L (5 ppm) no puede sostener una variedad de organismos acuáticos. Los contaminantes incluyendo aguas negras, también la materia orgánica en proceso de descomposición, la que consume oxígeno mientras están siendo degradadas por bacterias y otros microorganismos, disminuyen el nivel de OD. La entrada de plantas, animales y otros desechos orgánicos pueden ser una de las razones. La concentración de OD en un cuerpo de agua es controlada por varios factores, incluyendo: temperatura del agua, temperatura y presión del aire, características hidráulicas, fotosíntesis o actividad respiratoria, o la cantidad de materia orgánica (MO) presente. La dirección de la concentración de OD es comúnmente directa o indirectamente el resultado de la

actividad humana. Generalmente un incremento en la dirección de la concentración de OD, indica un mejoramiento en las condiciones de la calidad del agua; una disminución en la dirección indica un deterioro de las condiciones.

Niveles significativos de OD según Lamotte:

La cantidad de oxígeno que es requerido por los animales para sobrevivir y crecer varía dependiendo de las especies y estadios de vida.

- Los niveles de OD de 5 a 6 partes por millón (ppm), son generalmente los requeridos para el crecimiento y la actividad.
- Los niveles de OD menores a 3 ppm, someten a un esfuerzo a la mayoría de organismos acuáticos.
- Los niveles de oxígeno disuelto de 1 ó 2 ppm, no permitirían la presencia de peces.

Los peces y otros animales que pueden movilizarse, dejarán las áreas con niveles bajos de oxígeno disuelto y se concentrarán en áreas con niveles más altos. Los animales acuáticos que se mueven muy lentamente, o están atrapados o no son móviles, podrían morir si el nivel de oxígeno disuelto cae por debajo de 1 ppm.

pH El pH del cuerpo de agua regula muchos de los procesos químicos y fisiológicos de la vida acuática, incluyendo la habilidad de obtener los nutrientes esenciales. La mayoría de los organismos requieren de un pH entre 5,6 y 8,5. Los niveles normales de pH varían dependiendo de los minerales y aportes antropogénicos en el cuerpo de agua. Por ejemplo, un pH bajo podría ser el resultado de la lluvia ácida un resultado causado por el humo de los carros o de la energía generada al quemar carbón o podría ser del tipo de suelo o la actividad volcánica. Agua con un pH ácido podría ser perjudicial para los organismos acuáticos, desde los consumidores primarios a las plantas a las bacterias descomponedoras. Las consecuencias de un pH mucho menor de 5.0 podría ser bien serias. En peces e invertebrados, un pH bajo podría afectar e incluso inhibir la respiración, incrementando la mortalidad o un ausencia de huevos que desarrollar, e interferir con la habilidad de regular los iones, incluyendo la pérdida de sodio del cuerpo y causa que no se obtenga suficiente calcio del agua.

Nutrientes Los organismos vivientes requieren de un ámbito de elementos para los procesos vitales, tales como respiración. Las plantas y los animales comparten muchos de los elementos que se requieren, los cuales obtienen de su ambiente. Entre estos requerimientos se incluyen, carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O), los cuales son suministrados por el aire y el agua. Otros elementos, muchos de los cuales se llaman nutrientes, incluyen, nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), hierro (Fe), cloro (Cl), zinc (Zn), molibdeno (Mb),

y otros. Por ejemplo, el potasio y fósforo son requeridos por las plantas para el crecimiento y desarrollo, y son encontrados en forma natural solo en pequeñas cantidades. Para incrementar o acelerar el crecimiento de la planta, muy frecuentemente se agregan fertilizantes. El nitrógeno, potasio y fósforo son los nutrientes más comunes en fertilizantes, porque se necesitan en grandes cantidades comparadas con los otros elementos que necesita la planta y que son muy importantes para el crecimiento y la producción.

Los científicos han determinado que la relación Carbono-Nitrógeno y Fósforo en las algas es constante en el tejido celular. La tasa basada en pesos atómicos es 106:16:1 (Allan 1996). Algunas de las fuentes externas de nitrógeno y fósforo son:

- Desechos humanos y animales
- La descomposición de materia orgánica
- Escorrentía de fertilizantes
- Aportes geotermales (particularmente P)

Nitrógeno Cerca del 78% del aire es nitrógeno; aún así pocos organismos pueden usar el nitrógeno en la forma presente en la atmósfera. De hecho el nitrógeno está en muchos lugares en tan poca disponibilidad que puede limitar el crecimiento de los organismos. Los organismos utilizan nitrógeno en forma de Amonio (NH_3 o NH_4), Nitratos (NO_3), o Nitritos (NO_2). Estos compuestos pueden ser creados por reacciones eléctricas, tales como tormentas eléctricas o emitidas por fijadores de nitrógeno y descomposición de materia orgánica. Las plantas incluyendo las algas, pueden incorporar el nitrato (NO_3) en su citoplasma y usar nitrógeno para ensamblar proteínas.

Nitrato El proceso de descomposición fue identificado anteriormente como una posible fuente de nitrato. Los desechos de seres humanos, animales y plantas en proceso de descomposición, produciendo amonio. Parte del amonio es absorbido por plantas acuáticas en crecimiento, pero la mayoría del amonio es transformado a nitrato y nitrito por las bacterias, incrementando los niveles de nitrato (LaMotte 1994). La proporción natural de reemplazo de material viviente en el trópico puede afectar el ecosistema de la quebrada. Una quebrada tropical podría tener una concentración normal de nitrato entre 0,50 y 0,10 mg/L. Elevadas concentraciones de nitrato podrían observarse cuando un área ha sido recientemente deforestada para pastizales y los nutrientes del suelo están siendo lavadas a las quebradas. El agua superficial no debería exceder 0,5 mg/L para así evitar la eutroficación; el agua subterránea es normalmente 10 mg/L. Las fuentes antropogénicas más comunes de nitrato y nitrito son: descarga de aguas de desecho o aguas sin tratamiento, sistemas funcionando individualmente y escorrentía de operaciones agrícolas, tales como lechería o campos con fertilizantes. La concentración de

nitrato puede indicar el nivel de contaminación por fertilizantes y otras fuentes (Allan 1996).

Amonio La producción de amonio es un ejemplo del proceso de reciclaje natural. El amonio puede ser encontrado en los excrementos de organismos acuáticos y es el resultado de la descomposición de materia fecal e hidrólisis o úrea. También, cuando las plantas y animales mueren, las bacterias transforman las moléculas para formar amonio. El amonio es la forma de nitrógeno preferida por las plantas porque es más fácil de consumir.

Los fertilizantes son una fuente artificial de amonio y el amonio es altamente soluble en agua (Laidlaw 1996).

Los niveles significativos de amonio que se pueden presentar son:

- La concentración de amonio en el agua es generalmente por debajo de 0,1 mg/L.
- Las concentraciones mayores de 0,25 mg/L pueden afectar el crecimiento de los peces.
- Concentraciones sobre 0,5 mg/L son consideradas letales.

2.3.2. Variables bióticas

- Productividad primaria (correlación con concentración de clorofila).
- Biomasa planctónica
- Fauna béntica
- Flora microbiana
- Diversidad de peces

La figura 4 describe en resumen los factores que inciden en el proceso de eutroficación.

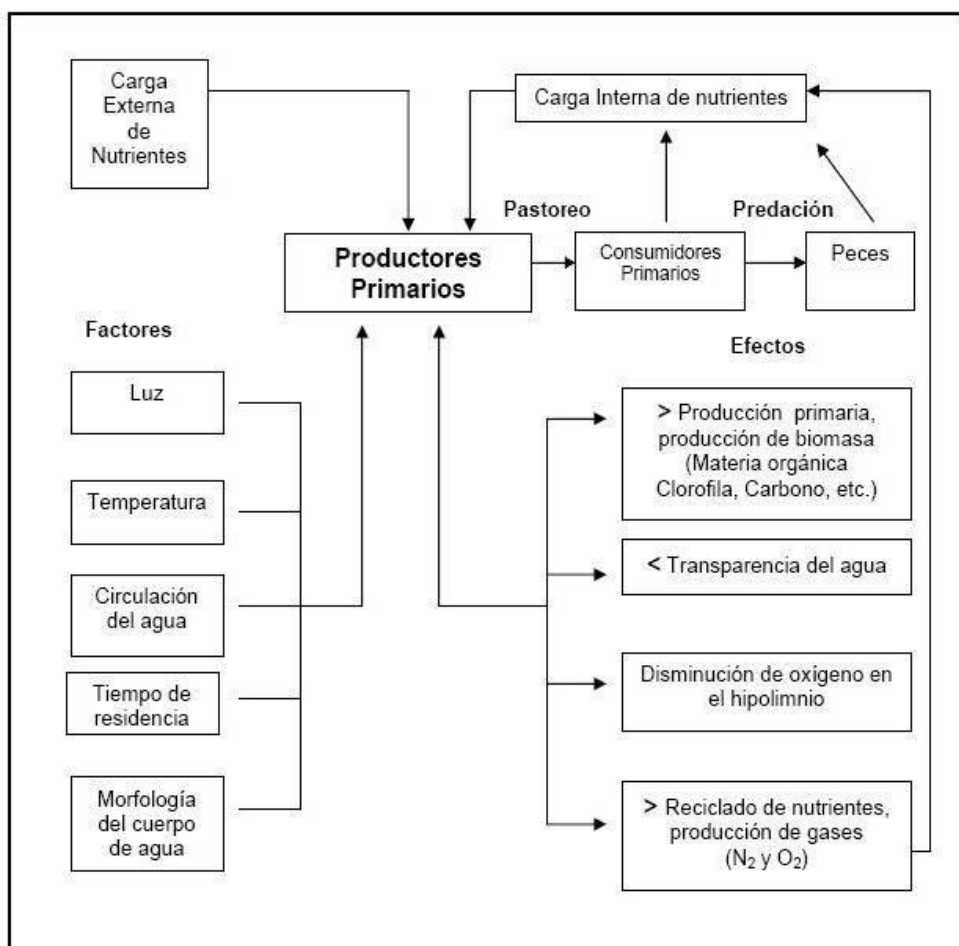
Requerimiento de Nitrógeno y Fósforo en los Sistemas de tratamiento biológico aerobio de aguas residuales. La concentración de macronutrientes en las aguas residuales es de vital importancia para el metabolismo de los microorganismos que constituyen la biomasa de los sistemas de tratamiento aerobios.

El fósforo y el nitrógeno son unos de los macronutrientes que cobran mayor importancia y se ha establecido en la literatura que una relación de DBO5:N:P de 100:5:1, es la relación indicada para que sea eficiente el proceso de desarrollo de la biomasa.

En las aguas residuales de origen industrial, muchas veces no existe la concentración de fósforo y nitrógeno adecuada por lo que es necesario adicionarlo de fuentes de nitrógeno como la urea y el fósforo proveniente de ácido fosfórico.

El utilizar menores cantidades de nitrógeno y fósforo en el tratamiento biológico que precede a la laguna de pulimento tiene implicaciones favorables dado que implícitamente generará menores problemas de eutroficación (6).

Figura 4. Descripción de los factores que inciden en el proceso de eutroficación.



Fuente: Ing. Ana María Chávez de Allain. Rev. Julio 2007. Para uso de la Universidad de Piura.

3. METODOLOGÍA

La metodología del trabajo que se presenta en esta monografía es el siguiente:

3.1. Descripción de variables medidas

3.1.1. Variable biótica

- Biomasa planctónica: Se hizo una caracterización de la lenteja de agua con el fin de identificar su clasificación taxonómica y poder consultar por medio de una revisión bibliográfica las características fisiológicas y metabólicas de la misma y su interacción con las diferentes variables fisicoquímicas del agua de la laguna. (Anexo 1)

3.1.2. Variables abióticas

- Temperatura
- Oxígeno disuelto
- Fósforo total
- Nitrógeno total
- pH
- DQO
- DBO
- Sólidos Suspendidos Totales

Se eligieron estas variables por ser las que se tienen en cuenta como indicador de eutroficación. Se tomaron cuatro muestras como esquema de verificación para evaluar el % de remoción de fósforo y nitrógeno, nutrientes presentes en la laguna.

3.1.3. Carga externa de nutrientes

Se tomaron muestras del afluente de la laguna (desde zanjón de oxidación de lodos activados) y efluente de la laguna (salida a quebrada) durante cinco (5) semanas en el período de estudio entre el 4 de Mayo y 7 de Junio de 2008, en intervalos de 12 horas (6:00 – 18:00) analizando las variables de pH, Temperatura y Oxígeno Disuelto para las primeras 4 semanas y una verificación de Fósforo y Nitrógeno desde la semana 2 a la semana 5, al final de cada semana.

3.1.4. Tiempo de Residencia

El tiempo de residencia estimado en la laguna es de 30 días según las características de diseño.

3.1.5. Morfología de la laguna

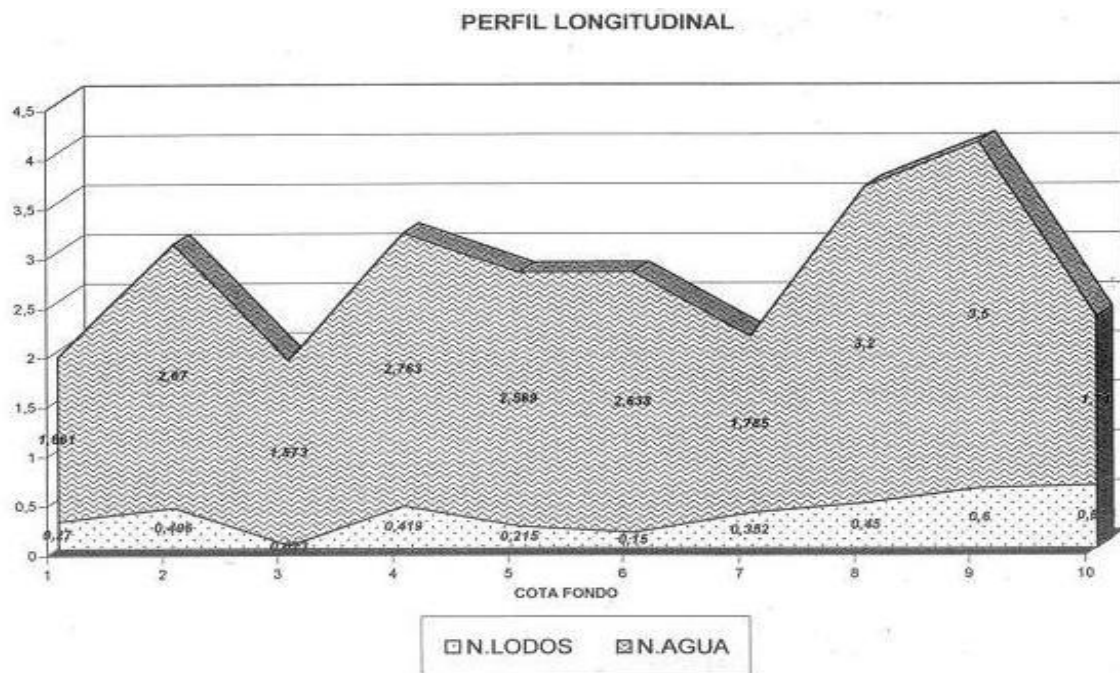
La figura 5 es una fotografía de la laguna de pulimento. La figura 6 describe el perfil longitudinal de la laguna de pulimento obtenido en el estudio de batimetría.

Figura 5. Laguna de pulimento.



Fuente: Industria de lácteos. 2008.

Figura 6. Perfil longitudinal de la laguna de pulimento. Estudio batimetría



Fuente: Industria de lácteos. Año 2002

3.2. Métodos de medición

Para efectos del plan de muestreo establecido se midieron las siguientes variables

- pH- Método potenciométrico
- Temperatura-Termómetro de 0 -100 °C calibrado en laboratorio de metrología.
- Oxígeno Disuelto- Método con oxímetro
- Fósforo-colorimétrico
- Nitrógeno-Kjeldahl

Todos los métodos de análisis utilizados se ejecutaron con base en protocolos internos de la empresa de productos lácteos alineados con los métodos de análisis establecidos por el *Standard Methods for Water and Wastewater* de la EPA revisiones 20 de 2003 y 21 de 2005.

3.3. Muestreo

Durante un lapso de cinco (5) semanas se tomaron muestras del afluente de la laguna de pulimento y del efluente de la misma que es el vertimiento final de todo el tratamiento de aguas residuales de la Empresa de derivados lácteos.

Se evaluaron las variables de temperatura, pH, oxígeno disuelto en las muestras tomadas de la semana 1 a la 4. Se hizo una verificación única de fósforo y nitrógeno con el fin de conocer la calidad de agua de entrada referida a estos nutrientes; en las muestras de la semana 2 a la semana 5 se realizó esta determinación. La tabla 2 presenta la cantidad de lenteja observada en la laguna durante el tiempo de ensayo. Las figuras 7 a 11 presentan un esquema gráfico de la cantidad de lenteja sobre el espejo de agua durante las semanas de muestreo.

Tabla 2. Cantidad de lenteja en la laguna (en área) durante muestreo.

Semana	Observaciones
Uno (1)	Laguna libre de lenteja
Dos (2)	1/3 espejo de agua cubierto
Tres (3)	2/3 espejo de agua cubierto
Cuatro (4)	Todo el espejo de agua cubierto
Cinco (5)	Todo el espejo de agua cubierto

Fuente: Los autores.

Figura 7. Cantidad lenteja semana 1

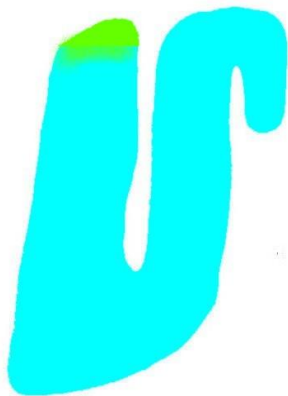


Figura 8. Cantidad lenteja semana 2



Figura 9. Cantidad lenteja semana 3

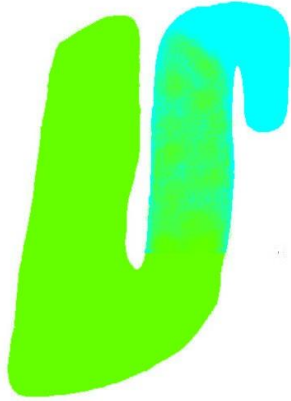
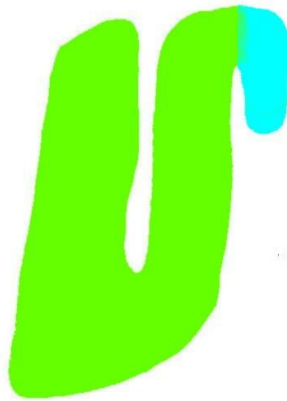


Figura 10. Cantidad lenteja semana 4



Figura 11: Cantidad lenteja semana 5



Fuente: Los autores.

4. RESULTADOS

Los datos obtenidos se encuentran en el anexo 3.

4.1. Cuantificación de la cantidad de lenteja de agua por unidad de área

Para la estimación preliminar de la densidad de la lenteja se hizo una prueba de determinar el peso húmedo de lenteja en 1 m². Un ensayo de determinación de peso, con previo paso de la lenteja por malla fina para eliminar exceso de agua dio como resultado: Peso de 1,08 m² de lenteja húmeda, = 515 g

Por tanto, se estima que 1 m² de lenteja pesa aproximadamente 477 g.

4.2. Remoción de nitrógeno y fósforo vs cantidad de lenteja

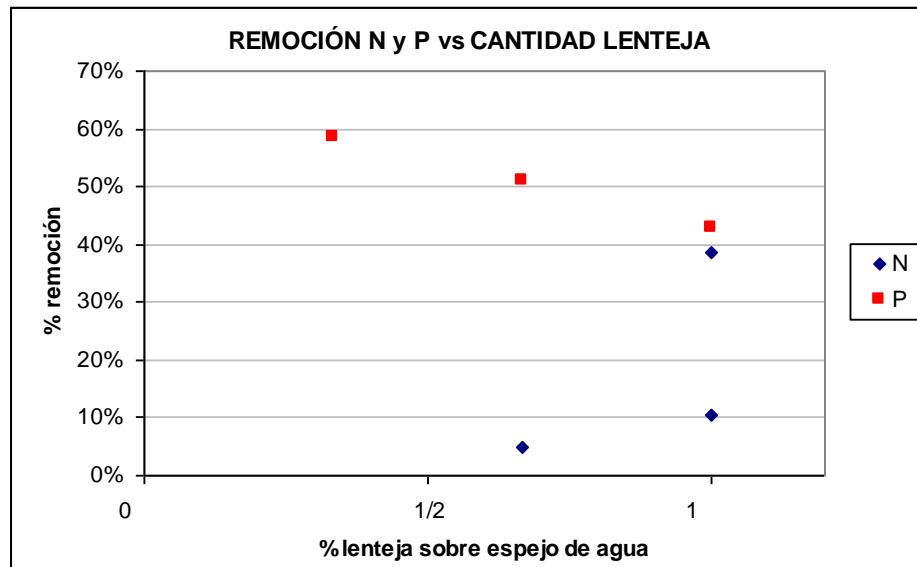
La tabla 3 presenta los resultados del cálculo de remoción de nitrógeno y fósforo con los datos tomados en los ensayos, teniendo en cuenta el área de cobertura de lenteja sobre el espejo de agua. La figura 12 presenta el % de remoción de N y P frente al área de lenteja presente en la laguna.

Tabla 3. Remoción de nitrógeno y fósforo en función de la cantidad de lenteja sobre el espejo de agua.

Semana	Cobertura de lenteja sobre el espejo	% remoción	
		N	P
2	1/3		58,5%
3	2/3	4,8%	51,1%
4	1	10,5%	42,9%
5	1	38,5%	

Fuente: Los autores.

Figura 12. Remoción de nitrógeno y fósforo vs cantidad de lenteja en la laguna.

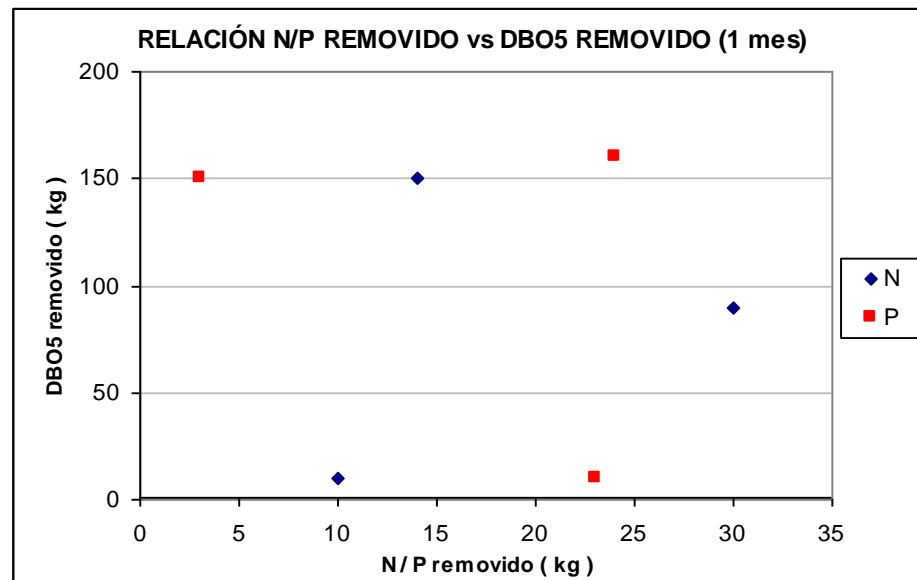


Fuente: Los autores.

4.3. Remoción nitrógeno y fósforo vs remoción DBO5 (estimación mensual)

La figura 13 presenta la relación entre el nitrógeno y el fósforo removido frente a la carga orgánica removida (DBO5) en 1 mes.

Figura 13. Remoción nitrógeno y fósforo vs remoción DBO5.



Fuente: Los autores.

4.4. Determinación de la concentración de saturación de OD en la laguna

Se empleó el método reportado en [12] para la determinación de la concentración de saturación de oxígeno disuelto.

$$C_s = OD \frac{P - p}{760 - p} \quad \underline{\underline{Cs OD = 6,91 \text{ mg/L}}}$$

OD = Cs a 760 mm Hg y 18°C = 9,54 mg/L

P = P atm lugar ubicación laguna = 555 mm Hg (2580 msnm)

p = Presión de vapor del agua a 18°C = 15,86 mm Hg.

4.5. Estimación del tiempo de residencia en la laguna

Q entrada laguna = 14 m³/h

Volumen de diseño laguna = 10000 m³

Tiempo de residencia aproximado = 29,5 días → 30 días

4.6. Determinación de humedad y contenido de nitrógeno de la lenteja.

Con los resultados de los ensayos de humedad y de contenido de nitrógeno realizados sobre una muestra de lenteja se determinó el % de humedad y el % de N base seca, reportados en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados determinación humedad y % nitrógeno lenteja.

	%N Base húmeda	%Humedad	%N Base seca
Lenteja al ingreso de laguna	0,26	75,7	1,07
Lenteja a la mitad	0,21	67,2	0,64
Lenteja a la salida de Laguna	0,25	76,3	1,05

Fuente: Los autores.

La tabla 5 presenta los resultados de la cantidad en kg de nitrógeno removido por mes, con información tomada en cada semana de ensayo.

Tabla 5. Resultados determinación de N removido / mes.

Semana	kg de N removidos / mes
2	10,0
3	14,0
4	30,0
promedio	18,0

Fuente: Los autores.

Tomando el valor promedio de kg de N removidos, base húmeda, por mes (18 kg) y tomando el valor de % de N, base húmeda promedio (0.24%) se determina la cantidad estimada de lenteja que puede crecer fijando ese porcentaje de nitrógeno. El resultado es 7500 kg lenteja / mes.

Con este resultado, y teniendo en cuenta la estimación del peso de lenteja por unidad de área (477g/m^2) se plantea el crecimiento de lenteja en $15728\text{ m}^2/\text{mes}$.

Considerando el valor estimado del área de la laguna (2946 m^2) y dividiendo por el crecimiento de la lenteja ($15728\text{ m}^2/\text{mes}$) se obtiene un tiempo de cubrimiento de la laguna por lenteja de aproximadamente **6 días**.

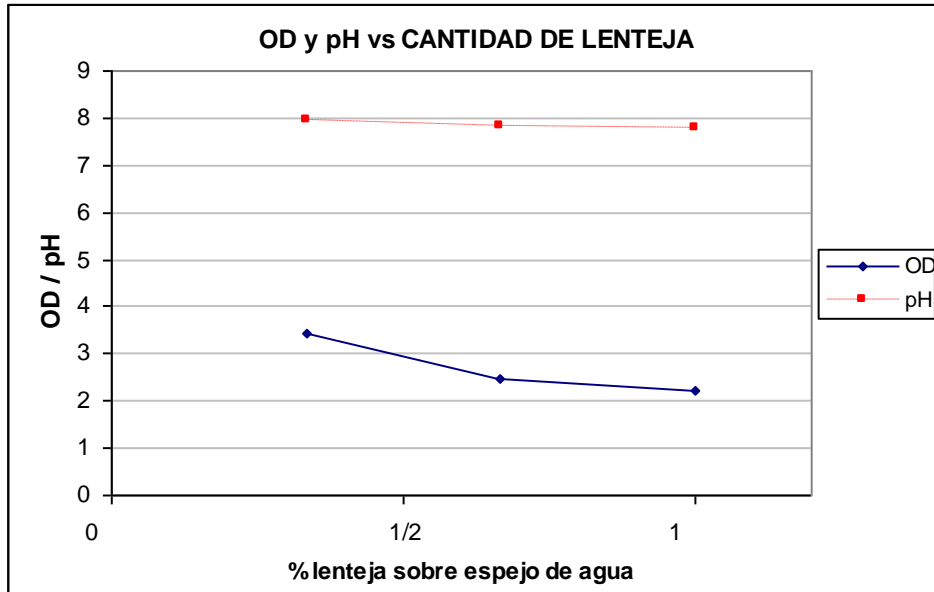
4.7. Tendencia OD y pH vs cantidad de lenteja en el espejo de agua

La figura 14 contiene los promedios de OD y pH medidos por semana de ensayo versus el % de lenteja sobre el espejo de agua.

4.8. Comparación comportamiento OD en tiempo de ensayo vs laguna eutroficada.

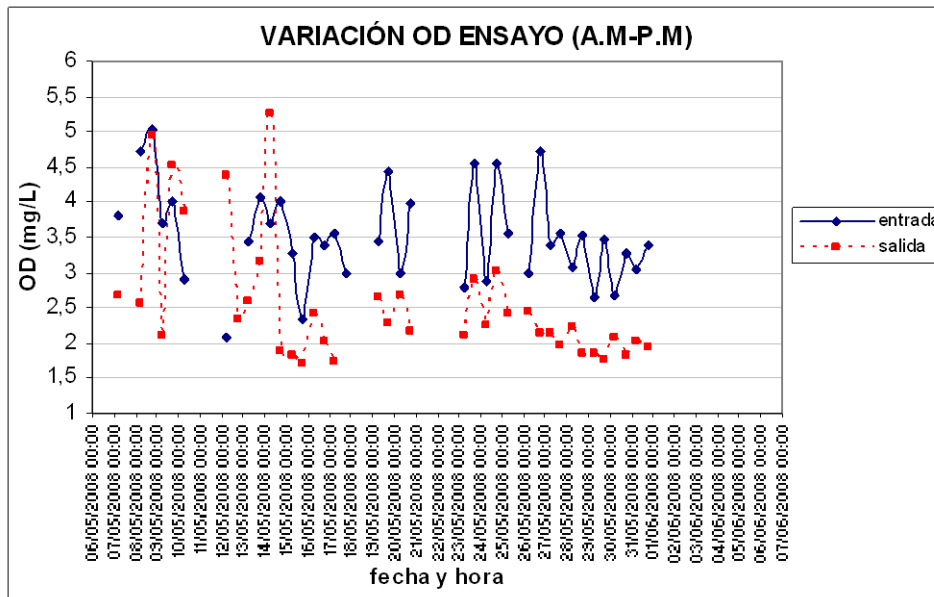
La figura 15 presenta las curvas de los datos tomados de OD durante el tiempo de ensayo (5 semanas) a la entrada y la salida de la laguna y se comparó con las curvas de OD tomadas en la condición de eutroficación del 2002, presentadas en la figura 16. La figura 17 presenta las curvas de OD para un tiempo de 5 días durante el tiempo de ensayo con el fin de observar alguna tendencia o similitud con las curvas de la laguna en condiciones de eutroficación.

Figura 14. OD y pH vs cantidad de lenteja en el espejo de agua.



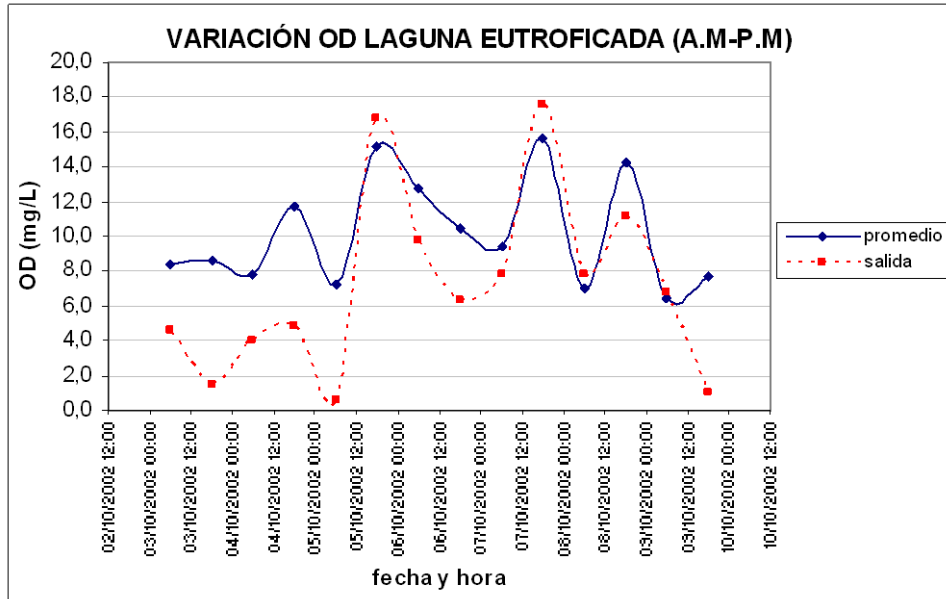
Fuente: Los autores.

Figura 15. Variación OD durante 4 semanas de ensayo.



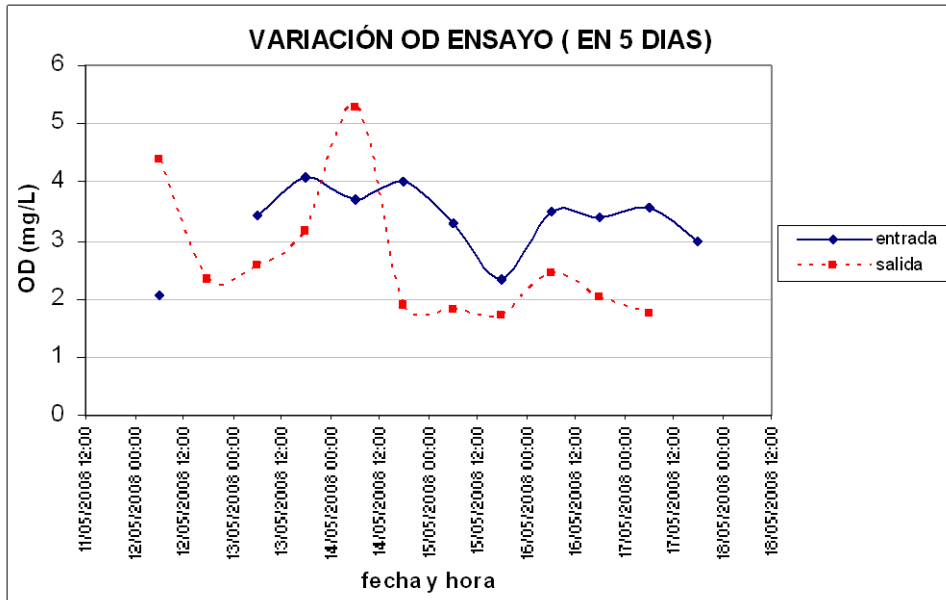
Fuente: Los autores

Figura 16. Variación OD durante 5 días con laguna eutrofizada. 2002.



Fuente: Industria de lácteos. 2002.

Figura 17. Variación OD tomando 5 días de ensayo.

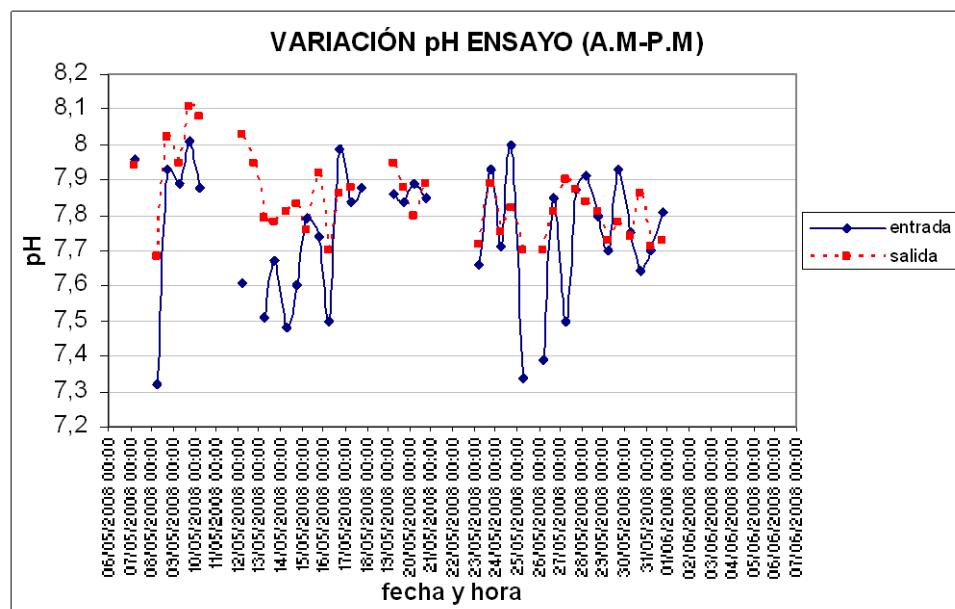


Fuente: Los autores

4.9. Comparación comportamiento pH tiempo de ensayo vs laguna eutroficada

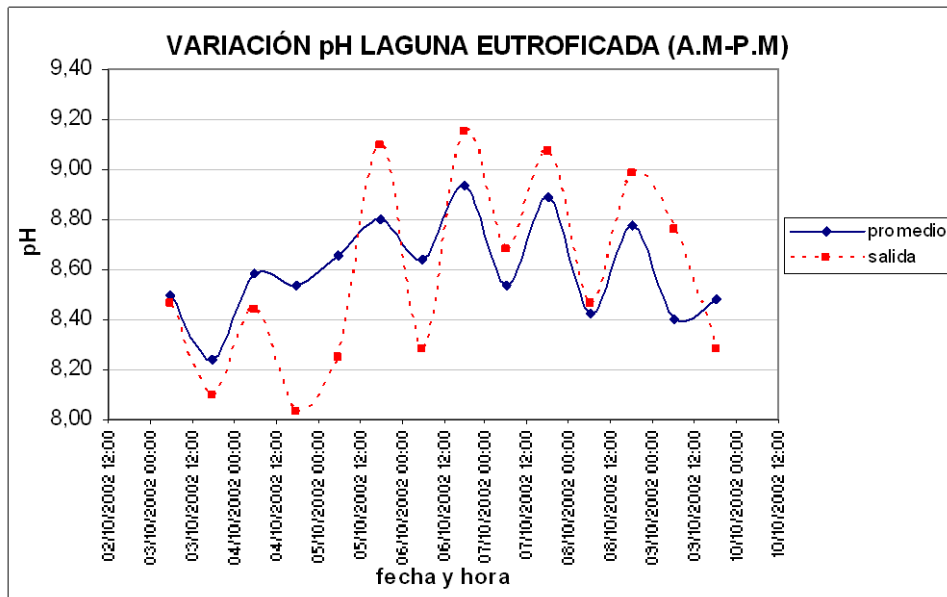
Siguiendo el mismo esquema realizado para la comparación de las curvas de OD, la figura 18 presenta las curvas de los datos tomados de pH durante el tiempo de ensayo a la entrada y la salida de la laguna y se comparó con las curvas de pH construidas con los datos reportados en la condición de eutroficación de la laguna en 2002, presentadas en la figura 19. La figura 20 muestra las curvas de pH para un tiempo de 5 días durante el tiempo de ensayo con el fin de observar alguna tendencia o similitud con las curvas de la laguna en condiciones de eutroficación.

Figura 18. Variación pH durante 4 semanas de ensayo.



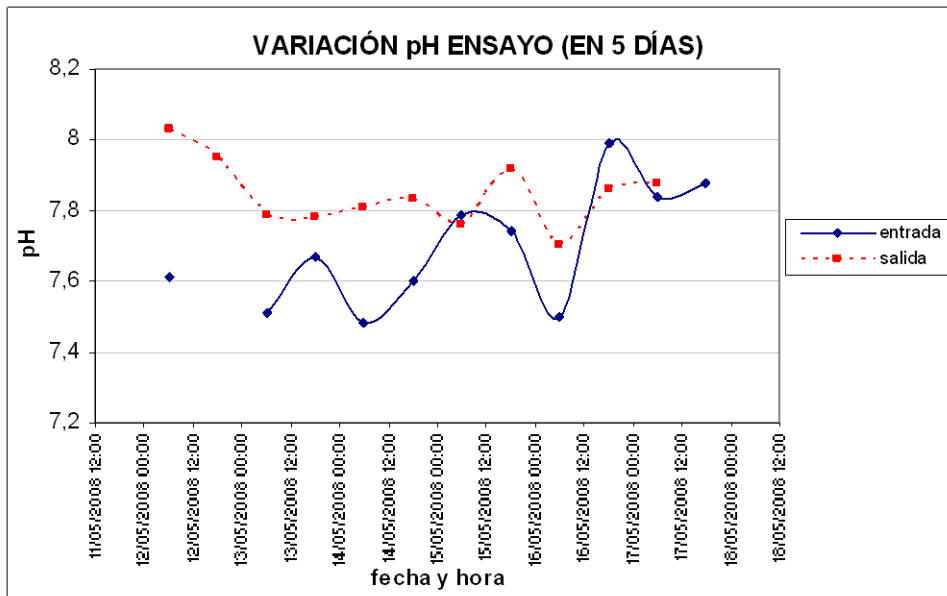
Fuente: Los autores

Figura 19. Variación OD durante 5 días con laguna eutroficada. 2002.



Fuente: Industria de lácteos. 2002.

Figura 20. Variación pH tomando 5 días de ensayo.



Fuente: Los autores

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Variables fisicoquímicas estudiadas

DBO-DQO

El porcentaje de remoción de carga orgánica ha sido establecido teniendo en cuenta el tiempo de residencia en la laguna (30 días aproximadamente) Se revisó el comportamiento de las variables fisicoquímicas empleadas en el monitoreo de la laguna de compensación (DBO5 y DQO) para observar el comportamiento de la remoción en función de la cantidad de lenteja presente en el espejo de agua y poder considerar esta información para obtener una correlación entre carga removida y cantidad de lenteja. Al observar la figura 22 (anexo 2), la curva muestra que la remoción promedio es elevada en la semana 1, cuando la laguna se encontraba con 1/3 de lenteja sobre el espejo; entre la semana 2 y 3 el 5 de remoción se incrementa y vuelve a decrecer en las siguientes dos semanas, donde la laguna se encontraba cubierta en su totalidad por la lenteja. Esta variación inicialmente no permitió establecer una relación directa entre las dos variables, dado los errores que presentó el método de determinación de la remoción, por lo que se hizo una revisión de los datos históricos de remoción reportados para encontrar una tendencia. Las figuras 23, 24 y 25 (anexo 2) muestran variación de remoción en un intervalo de 4 semanas, tiempo establecido para despejar 1/3 del espejo de agua, lo cual muestra diferencia con el comportamiento descrito en la figura 22. Lo anterior no permite establecer de manera concreta si existe dependencia de la remoción y la cantidad de lenteja, dado que existen múltiples variables que afectan la remoción, como cantidad y composición de los lodos, entre otras.

N y P

La figura 12 presenta el porcentaje de remoción de nitrógeno y fósforo vs cantidad de lenteja (en área) en el espejo de agua (0-1/3-2/3-1). La tendencia observada muestra mayor remoción de P con menor cantidad de lenteja; para el N la tendencia es más remoción con mayor contenido de lenteja ya que, aunque se presentan dos puntos de diferente remoción para la misma cantidad de lenteja, es mayor respecto a la laguna con 1/3 de lenteja. En principio se esperaba una remoción mayor de P teniendo en cuenta que en principio se supone mayor crecimiento de lenteja con mayor contenido de P en el cuerpo de agua. Quizás este comportamiento esté dado por una concentración limitante de P, donde se haya dado un valor máximo donde la lenteja deja de asimilar fósforo. Por tanto, no

es posible emitir un juicio de valor dado los pocos datos tomados para determinación de remoción de N y P y el error de no considerar el tiempo de residencia estimado (30 días) para la evaluación a la entrada y la salida.

DBO5 vs N y P removido

Con los datos específicos de cantidad de nitrógeno y fósforo removidos en la laguna, presentados en la figura 13, no se puede evidenciar una tendencia con la remoción de DBO5. Se puede afirmar, de manera preliminar, que no existe dependencia entre estas dos variables. Por tanto quedaría explícito que la remoción de carga orgánica en la laguna no es realizada por la lenteja de agua.

Relación OD y pH vs cantidad de lenteja

La figura 14 presenta el comportamiento del OD y el pH medido a la salida de la laguna vs la cantidad de lenteja presente en el espejo de agua. Se observa que es inversamente proporcional, con lo cual se puede asegurar que es la tendencia esperada puesto que entre mayor cantidad de lenteja más se consume el oxígeno disuelto disponible en la laguna para el proceso fotosintético. El pH puede decirse que se mantiene en un valor constante.

Comportamiento OD y pH. Comparación con laguna eutroficada.

Comparando la curva de medición de OD a la salida de la laguna (figura 15) con la curva de salida presentada en la figura 16 se observa la diferencia en la amplitud de la curva, lo que sugiere un estado “saludable” de la laguna durante el tiempo de ensayo respecto al estado eutroficado, donde se presentaban variaciones de OD mayores a 10 unidades. La curva de OD a la salida para la laguna durante el tiempo de ensayo muestra un comportamiento estable con variaciones promedio de 1 unidad en el valor de OD. Lo anterior puede verse mejor si se compara la figura 16 con la figura 17 (esta última construida para un intervalo de 5 días dentro del tiempo de ensayo) para observar el comportamiento en un intervalo de tiempo igual. La curva de salida para la laguna eutroficada presenta variaciones de OD con un pico en 18,0 mg/L aproximadamente y un mínimo en casi 0,0 mg/L; a diferencia del comportamiento que presenta la curva de salida de la figura 17 con valores significativos dentro del intervalo de 1,8 mg/L a 3 mg/L aproximadamente, con un pico de 5,4 mg/L. Por tanto, tanto la curva de OD de entrada como salida, no presentan el comportamiento inestable de la figura 16.

Al analizar el valor calculado de la concentración de saturación de oxígeno disuelto para la laguna (6,91 mg/L) respecto al valor promedio obtenido de las mediciones de OD en la entrada (3,51 mg/L) y la salida (2,54 mg/L), tabla 9, se

puede inducir un comportamiento “saludable” de la laguna, contrario a la comparación respecto al valor promedio obtenido de los valores de OD de la laguna eutrofizada (promedio laguna 10,2 mg/L; salida laguna 7,8 mg/L), valores específicos que superan la concentración de saturación de oxígeno disuelto y que evidencian, en efecto, el estado eutrofizado a condiciones del cuerpo de agua estudiado.

Al observar las curvas de las figuras 18 y 19, para los valores de pH a la salida de la laguna, el comportamiento estando la laguna eutrofizada es irregular, con variaciones de 0,8 unidades entre la madrugada y la tarde. El comportamiento del pH durante el tiempo de ensayo muestra una tendencia estable con variaciones de 0,2 unidades aproximadamente. Al igual que para el análisis de OD, se construyó la figura 20 para un tiempo de 5 días dentro de las semanas de ensayo, para comparar el pH contra el estado eutrofizado en igual intervalo de tiempo. La curva de pH a la salida (figura 20) presenta un comportamiento variable entre 7,7 y 7,9 con los mayores datos, comparado con la amplitud de la curva de salida (figura 19) que varía entre 8,0 y 9,2 aproximadamente.

Estimación del tiempo de cosecha

La estimación del tiempo de cosecha se plantea teniendo en cuenta el tiempo calculado que demora la lenteja en cubrir el espejo de agua (6 días aproximadamente). Este resultado inicialmente no concuerda con las observaciones cualitativas del crecimiento de la lenteja presentadas en las figuras 5 a 9, donde se observa que la laguna se cubre totalmente por lenteja en un lapso aproximado de 1 mes. La diferencia respecto al valor determinado en la estimación calculada del tiempo en que la lenteja crece se pudo dar por errores en la toma de muestras para determinación de nitrógeno a la entrada y la salida de la laguna, pues no se consideró el tiempo de residencia estimado de 30 días para toma de muestra inicial y muestra final. A su vez, no se conoce el volumen real de la laguna, dado que los cálculos fueron realizados con el volumen de diseño.

Por tanto, una estimación preliminar del tiempo de cosecha con los resultados obtenidos comparados con las observaciones cualitativas y al considerar los errores propios del ensayo y los demás factores involucrados en la dinámica de tratamiento en la laguna, puede ser de **15 días**. Ahora bien, este resultado preliminar tendría que ser evaluado considerando factores técnicos y operativos pues económicamente no es factible remover la lenteja con esa frecuencia pues implica costos en mano de obra que no justifica asumirlos, teniendo en cuenta que, aplicando lo estipulado en el instructivo, donde se define una frecuencia máxima de retiro de 3 meses, y considerando la operación actual, donde en los últimos meses se ha removido 2/3 de la lenteja con una frecuencia mensual, la laguna está siendo bien manejada, en términos de operación y mantenimiento.

6. CONCLUSIONES

Las variables de monitoreo de la laguna de compensación (DBO, DQO) no son dependientes de la cantidad de lenteja presente en el espejo de agua. Su comportamiento variable viene dado por varios factores físicos (cantidad de lodos sedimentados) químicos y biológicos (componentes de los lodos, algas presentes en el cuerpo de agua, etc.) que no se consideraron en el presente trabajo.

Las variables de monitoreo de la laguna de compensación (DBO, DQO) no permiten predecir el fenómeno de eutroficación.

Con los resultados obtenidos no se puede asegurar dependencia directa entre remoción de N y P versus remoción de carga orgánica. Esto permite afirmar que la remoción de carga orgánica no es realizada por la lenteja de agua.

Los resultados obtenidos no permiten validar el tiempo de retiro establecido en el instructivo de remoción de la lenteja, pues, aunque se estimó como tiempo tentativo 15 días, factores económicos y operativos tendrían que ser evaluados para determinar la factibilidad de esta frecuencia de retiro, que previamente afirmamos no sería conveniente debido al buen manejo que se ha dado a la laguna removiendo 2/3 de lenteja con una frecuencia mensual.

Es necesario tomar mayor cantidad de muestras para medir OD y pH, en un intervalo cada 2 horas, para poder plantear un modelo que permita predecir condiciones inestables de comportamiento de la laguna con estas variables de monitoreo.

7. RECOMENDACIONES

Determinación eutroficación.

Existe un método para medir estado de eutroficación en una laguna con la medición del contenido de clorofila de algas en la columna de agua y este valor se combina con otros parámetros como el contenido de fósforo y de nitrógeno y el valor de penetración de la luz

1. INDICE DE ESTADO TRÓFICO DE CARLSON TSI (1977) (11)

Es uno de los índices más utilizados. Puede variar entre: 0 (oligotrófico) y 100 (hipereutrófico). Se obtiene a partir de una transformación de la transparencia del disco de Secchi (DS), tal que un valor de índice TSI= 0 corresponda a una profundidad del disco de DS= 64 m y de tal manera que un incremento de 10 en el valor de TSI represente una reducción de DS en un 50%. El mismo índice puede determinarse a partir de otros parámetros, tales como la concentración de clorofila y fósforo total en superficie, cuya relación con la transparencia se ha calculado previamente. Las fórmulas que figuran en la figura 21 resultan de una modificación realizada por Aizaki *et al* (1981) a la propuesta por Carlson (1977).

Figura 21. Índice de estado trófico de Carlson

ESTADO TRÓFICO	TSI	Disco de Secchi (m)	Fósforo en superficie (mg/m ³)	Clorofila en superficie (mg/m ³)
OLIGOTRÓFICO (< 30)	0	64	0.75	0.04
	10	32	1.5	0.12
	20	16	3	0.34
	30	8	6	0.94
MESOTRÓFICO (> 30 - 60)	40	4	12	2.6
	50	2	24	6.4
	60	1	48	20
EUTRÓFICO (> 60 - 90)	70	0.5	96	56
	80	0.25	192	154
	90	0.12	384	427
HIPEREUTRÓFICO (> 90)	100	0.062	768	1183

Fuente: Chávez Ana María. Ing. Revista Universidad de Piura. Perú. Julio 2007

Se puede averiguar si este análisis lo realiza algún laboratorio para poder enviar una muestra cada 2 años como verificación del estado trófico de tal manera que estar al límite de un estado oligotrófico entrar en un estado mesotrófico sería una alerta para la toma de acciones

2. Otro método de verificación visual es la verificación periódica de la ausencia del alga *Arabaena spiroides* que es un indicador de eutroficación.

Figura 22. *Arabaena spiroides*, indicador de eutroficación.



Fuente: CEDEX.

3. Otras medidas para evitar la eutroficación.

- Control de la entrada de nutrientes:
- Tratamiento de residuos antes de ser volcados al cuerpo de agua.
- Restricción del uso de detergentes fosfatados.
- Control del uso de la tierra.
- Pantanos: eliminan nutrientes de las aguas residuales que quedan fijados en la biomasa de algas y macrófitas.
- Tratamiento físico y químico de aguas residuales: precipitación química y filtración.

4. Se puede efectuar un estudio de batimetría cada 5 años con el fin de evaluar el estado de sedimentación de lodos en la laguna.

5. Conociendo el perfil actual de la laguna se pueden definir los puntos críticos donde se aumenta la probabilidad de mayor sedimentación y hacer medición con regla aforada para poder ir verificando el estado de la laguna y poder tomar acciones preventivas.

Variables fisicoquímicas de monitoreo

Se recomienda incluir dentro del monitoreo rutinario de la laguna de pulimento realizado por el departamento de gestión ambiental de la industria de lácteos la medición de oxígeno disuelto (OD) por lo menos una vez por semana, muestreo por la mañana y por la tarde, y compararlo con el valor de concentración de saturación para poder generar una alerta en caso que el valor medido supere el de saturación.

Ensayos

Es claro que se necesita una mayor cantidad de datos de concentración de nitrógeno y fósforo para poder plantear un modelo comparando valores de concentración vs cantidad de lenteja y poder establecer con un mayor grado de certeza la dependencia del crecimiento con estas dos variables. Por tanto, se recomienda hacer ensayos de 6 semanas cada uno, con las condiciones de cantidad de lenteja analizadas en este trabajo y medir la concentración de nitrógeno y fósforo teniendo en cuenta el tiempo de residencia estimado (30 días) para la entrada y la salida.

Para validar el tiempo de residencia de 30 días se puede realizar un estudio con trazadores a lo largo de la laguna.

8. BIBLIOGRAFÍA

Arroyabe Maria del Pilar. *La lenteja de Agua (Lemna minor): Una planta acuática promisoría*. En: Revista EIA, Número 1 p. 33-38. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín. Febrero 2004. (10)

Caicedo B, Julia. *Lenteja de agua para el tratamiento de aguas residuales: Factores ambientales y fisicoquímicos que afectan su crecimiento*. Revista EIA, número 1, pág. 33-38, febrero 2004. (2)

Chávez, Ana. *Sustancias nutrientes y eutroficación*. Universidad de Piura, Perú, 2007. (11)

Gutiérrez S. Laura. *Eutroficación en embalses*. Revista Ambiente Ecológico. Edición 72. Julio 2000. Disponible en <http://www.ambiente-ecologico.com>. (5)

J. Ceng, L. Landesman et al. *Nutrient removal from swine lagoon liquid by Lemna minor*. En: Journal Series. Department of Biological and Agricultural Engineering, North Carolina State University. 2004. Disponible en www.info.sciencedirect.com (7)

López L. Eugenia, y Soto G. Eduardo. *Diagnostic of Eutrophication of the Ignacio Allende Dam, Guanajuato, Mexico*. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Instituto Politécnico Nacional. México, 1993. (4)

Metcalf & Eddy, Inc. *Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*, Mc Graw Hill, 1995. (3)

Montenegro M Isbelia. *Estudio de Batimetría. Laguna de Vertimiento y Compensación*. Agosto de 2004. (9)

Muñoz. Mario, y Saya Mauricio. *Evaluación del requerimiento de Nitrógeno y Fósforo en los sistemas de tratamiento biológico aerobio de aguas residuales*. Tunja, Abril de 1998. (6)

Ramírez Y. Ana M. *La lenteja de agua Lemna en el Lago de Maracaibo*. PlaniGestión, C.A. 2004. Disponible en <http://www.planigestion.com/Documentos/LentejadeAguaLagoMaracaibo.pdf>. (1)

Romero Rojas Jairo. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Escuela Colombiana de Ingeniería. 2002. (12)

S. Koerner and J. E. Vermaat. *The relative importance of Lemna gibba, bacteria and algae for the nitrogen and phosphorus removal in duckweed-covered domestic wastewater*. International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, DA Delft. Disponible en www.info.sciencedirect.com. (8)

9. ANEXOS

Anexo 1: Informe de caracterización de la lenteja. Herbario Nacional, Universidad Nacional de Colombia.



Bogotá D.C., 06 de Mayo de 2008
COL-107

Señor
Diego Alejandro González.
Bogotá

Asunto: **Identificación Taxonómica.**


Cordial Saludo:

Me permito dar respuesta a su solicitud referente a la identificación taxonómica de la(s) muestra(s) botánica(s):

Nombre: ***Lemna cf. minuta* Kunth.**
Familia: **LEMNACEAE**
No. COL: **525183.**
No. Colección: **Diego Alejandro González No.1**
Determinó: **Jhon Infante-Betancour**

Esta certificación no es válida para trámites ante el INVIMA o el ICA. El (Los) pliego(s) testigo(s) quedará(n) como muestra permanente en nuestro herbario.

Cordialmente,


Prof. Luis Carlos Jiménez
Curador General
Herbario Nacional Colombiano -COL
E-mail: herbacol_fcbog@unal.edu.co

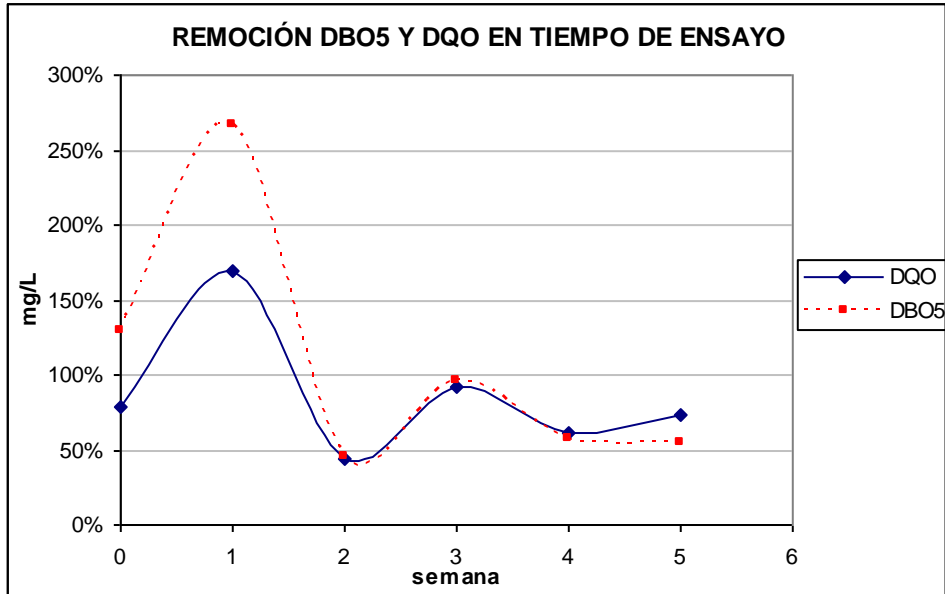
Copia: Archivo COL
Elaine A.

ciencia y tecnología para el país

Carrera 30 No.45-04, Ciudad Universitaria, Edificio 425, Entrada Calle 53
Tel: (57-1) 3165305 Conmutador: (57-1) 3165000 Ext.11538 - Apartado 7495
Fax (57-1) 3165365 Conmutador: (57-1) 316 50 00 Ext.11502 o 11538
Correo electrónico: herbacol_fcbog@unal.edu.co
Bogotá, Colombia, Sur América

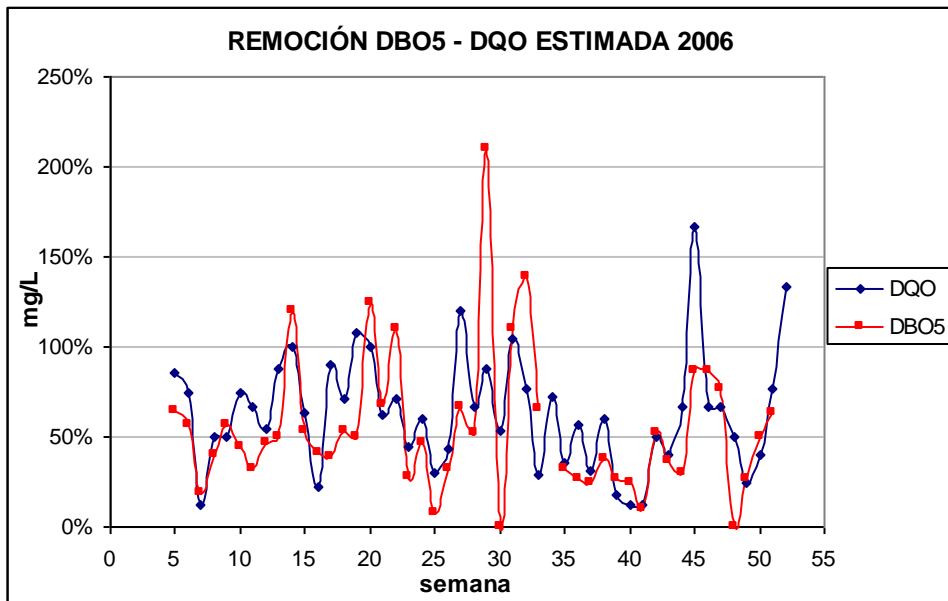
Anexo 2. Figuras monitoreo DBO5- DQO año 2006, 2007 y 2008 (junio)

Figura 22. Curva de remoción de DBO5 y DQO estimada para el tiempo de ensayo (5 semanas), construida con datos reportados en monitoreo



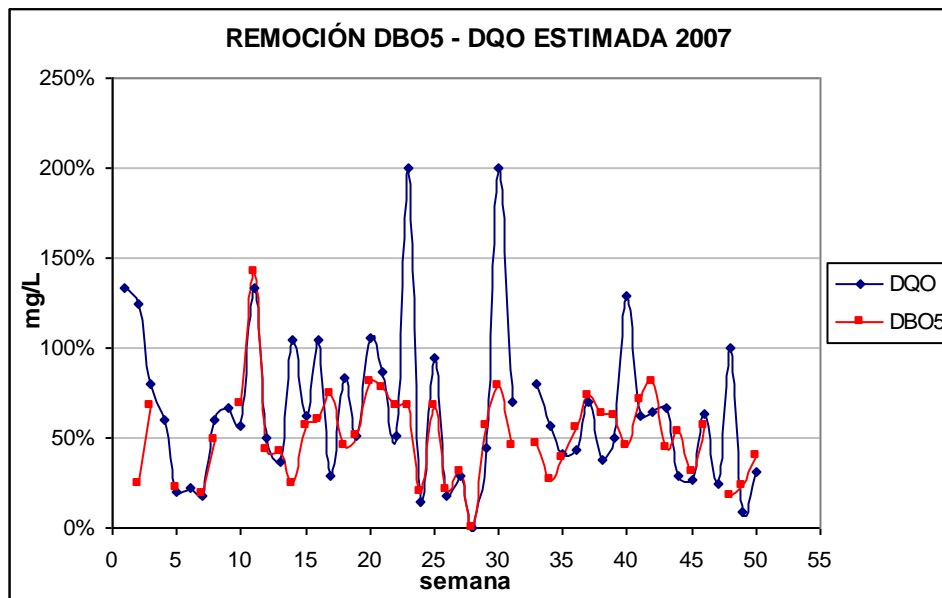
Fuente: Industria de lácteos.

Figura 23. Curva de remoción de DBO5 y DQO estimada para 2006, construida con datos reportados en monitoreo.



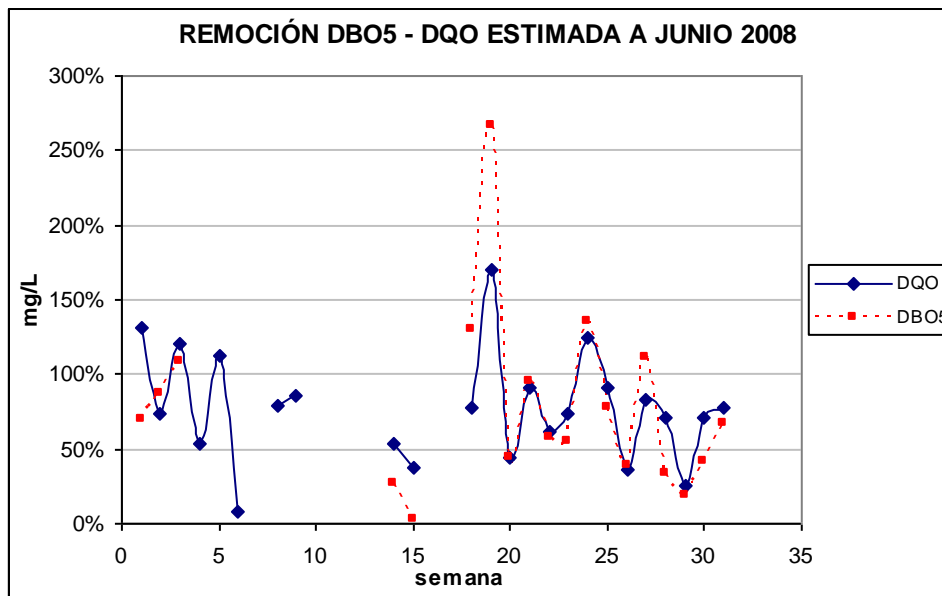
Fuente: Industria de lácteos.

Figura 24. Curva de remoción de DBO5 y DQO estimada para 2007, construida con datos reportados en monitoreo.



Fuente: Industria de lácteos.

Figura 25. Curva de remoción de DBO5 y DQO estimada para 2008 (a junio), construida con datos reportados en monitoreo.



Fuente: Industria de lácteos.

Anexo 3. Tablas con resultados de ensayos y datos históricos año 2002.

Tabla 6. Resultados ensayo. Medición de OD, pH y T.

FECHA	Entrada Laguna 6:00			Salida Laguna 6:00			Entrada Laguna 18:00			Salida Laguna 18:00		
	OD	pH	T	OD	pH	T	OD	pH	T	OD	pH	T
07-May	3,8	7,96	19,5	2,68	7,94	19,7						
08-May	4,71	7,32	20,3	2,57	7,68	17,8	5,02	7,93	20,8	4,96	8,02	11,8
09-May	3,71	7,89	17,5	2,11	7,95	17	4,02	8,01	20	4,52	8,11	17,8
10-May	2,91	7,88	19,9	3,86	8,08	16,7				19,5		
12-May	2,07	7,61	17,8	4,38	8,03	16,2			19,4	2,33	7,95	20,1
13-May	3,44	7,51	18,5	2,58	7,79	15,4	4,08	7,67	19,2	3,15	7,78	16,9
14-May	3,69	7,48	17,2	5,27	7,81	16,8	4,01	7,6	18	1,88	7,83	17,6
15-May	3,28	7,79	20,6	1,81	7,76	16,1	2,34	7,74	17,5	1,7	7,92	17,9
16-May	3,51	7,5	18,3	2,43	7,7	15,6	3,4	7,99		2,01	7,86	17,2
17-May	3,57	7,84	21,8	1,74	7,88	16,1	2,98	7,88				
19-May	3,45	7,86	20,8	2,65	7,95	15,9	4,44	7,84	19,8	2,28	7,88	18,3
20-May	2,99	7,89	19,5	2,69	7,8	16	3,99	7,85	19,6	2,17	7,89	18
23-May	2,8	7,66	17,1	2,1	7,72	16,5	4,55	7,93	20,3	2,91	7,89	18,7
24-May	2,88	7,71	18,5	2,25	7,75	17,1	4,56	8	19,4	3,01	7,82	18,1
25-May	3,56	7,34	18,2	2,43	7,7	15,2						
26-May	2,98	7,39	18	2,45	7,7	17,5	4,72	7,85	20,7	2,14	7,81	16,2
27-May	3,4	7,5	17,9	2,13	7,9	17,4	3,55	7,87	20,8	1,97	7,87	11,3
28-May	3,08	7,91	16,3	2,21	7,84	15,8	3,53	7,8	20,4	1,84	7,81	16,9
29-May	2,64	7,7	16,1	1,85	7,73	15,8	3,47	7,93	21	1,76	7,78	16,8
30-May	2,69	7,75	16,5	2,09	7,74	15,9	3,27	7,64	20,8	1,82	7,86	16,4
31-May	3,05	7,7	16	2,01	7,71	16	3,4	7,81	21,4	1,93	7,73	16,8

Fuente: Los autores.

Tabla 7. Datos tomados con laguna eutroficada (2002).

Fecha	Prom. Laguna 6:00 a.m			Salida Laguna 6:00 a.m			Prom. Laguna 18h			Salida Laguna 18 h		
	OD	pH	T	OD	pH	T	OD	pH	T	OD	pH	T
03/10/2002 .	8,4	8,49	17,7	4,6	8,46	17,5	8,7	8,24	17,6	1,5	8,10	16,5
04/10/2002 .	7,9	8,58	17,1	4,0	8,44	16,6	11,7	8,53	17,8	4,9	8,03	19,0
05/10/2002 .	7,3	8,66	16,7	0,6	8,25	16,8	15,2	8,80	18,4	16,8	9,10	16,5
06/10/2002 .	12,7	8,64	18,6	9,8	8,28	18,3	10,5	8,94	17,6	6,3	9,15	19,0
07/10/2002 .	9,4	8,54	18,0	7,9	8,68	17,7	15,7	8,89	17,2	17,6	9,07	21,3
08/10/2002 .	7,0	8,42	17,3	7,8	8,46	17,0	14,2	8,78	17,8	11,1	8,98	17,0
09/10/2002 .	6,5	8,40	18,1	6,8	8,76	17,8	7,7	8,48	18,5	1,0	8,28	17,6

Fuente: Industria de lácteos.

Tabla 8. Resultados ensayos de nitrógeno y fósforo.

FECHA	NITROGENO (mg/L)		FOSFORO (mg/L)	
	entrada	salida	entrada	salida
11-May			4,1	1,7
18-May	21	20	4,5	2,2
25-May	13,3	11,9	0,7	0,4
06-Jun	7,8	4,8		

Fuente: Industria de lácteos.

Tabla 9. Datos OD ensayo

ENSAYO	OD	
	entrada	salida
07/05/2008 06:00	3,8	2,68
07/05/2008 18:00		
08/05/2008 06:00	4,71	2,57
08/05/2008 18:00	5,02	4,96
09/05/2008 06:00	3,71	2,11
09/05/2008 18:00	4,02	4,52
10/05/2008 06:00	2,91	3,86
10/05/2008 18:00		
11/05/2008 06:00		
11/05/2008 18:00		
12/05/2008 06:00	2,07	4,38
12/05/2008 18:00		2,33
13/05/2008 06:00	3,44	2,58
13/05/2008 18:00	4,08	3,15
14/05/2008 06:00	3,69	5,27
14/05/2008 18:00	4,01	1,88
15/05/2008 06:00	3,28	1,81
15/05/2008 18:00	2,34	1,7
16/05/2008 06:00	3,51	2,43
16/05/2008 18:00	3,4	2,01
17/05/2008 06:00	3,57	1,74
17/05/2008 18:00	2,98	
18/05/2008 06:00		
18/05/2008 18:00		
19/05/2008 06:00	3,45	2,65
19/05/2008 18:00	4,44	2,28
20/05/2008 06:00	2,99	2,69
20/05/2008 18:00	3,99	2,17
21/05/2008 06:00		
21/05/2008 18:00		
22/05/2008 06:00		
22/05/2008 18:00		
23/05/2008 06:00	2,8	2,1
23/05/2008 18:00	4,55	2,91
24/05/2008 06:00	2,88	2,25
24/05/2008 18:00	4,56	3,01
25/05/2008 06:00	3,56	2,43
25/05/2008 18:00		
26/05/2008 06:00	2,98	2,45
26/05/2008 18:00	4,72	2,14
27/05/2008 06:00	3,4	2,13
27/05/2008 18:00	3,55	1,97
28/05/2008 06:00	3,08	2,21
28/05/2008 18:00	3,53	1,84
29/05/2008 06:00	2,64	1,85
29/05/2008 18:00	3,47	1,76
30/05/2008 06:00	2,69	2,09
30/05/2008 18:00	3,27	1,82
31/05/2008 06:00	3,05	2,01
31/05/2008 18:00	3,4	1,93
promedio	3,51	2,54

Fuente: Los autores

Tabla 10. Datos OD laguna condición eutrofizada.

LAGUNA EUTROFICADA	OD	
	promedio	salida
03/10/2002 06:00	8,4	4,6
03/10/2002 18:00	8,7	1,5
04/10/2002 06:00	7,9	4,0
04/10/2002 18:00	11,7	4,9
05/10/2002 06:00	7,3	0,6
05/10/2002 18:00	15,2	16,8
06/10/2002 06:00	12,7	9,8
06/10/2002 18:00	10,5	6,3
07/10/2002 06:00	9,4	7,9
07/10/2002 18:00	15,7	17,6
08/10/2002 06:00	7,0	7,8
08/10/2002 18:00	14,2	11,1
09/10/2002 06:00	6,5	6,8
09/10/2002 18:00	7,7	1,0
promedio	10,20	7,18

Fuente: Industria de lácteos

Tabla 11. Datos pH ensayo.
ENSAYO

Fecha y hora	pH	
	entrada	salida
07/05/2008 06:00	7,96	7,94
07/05/2008 18:00		
08/05/2008 06:00	7,32	7,68
08/05/2008 18:00	7,93	8,02
09/05/2008 06:00	7,89	7,95
09/05/2008 18:00	8,01	8,11
10/05/2008 06:00	7,88	8,08
10/05/2008 18:00		
11/05/2008 06:00		
11/05/2008 18:00		
12/05/2008 06:00	7,61	8,03
12/05/2008 18:00		7,95
13/05/2008 06:00	7,51	7,79
13/05/2008 18:00	7,67	7,78
14/05/2008 06:00	7,48	7,81
14/05/2008 18:00	7,6	7,83
15/05/2008 06:00	7,79	7,76
15/05/2008 18:00	7,74	7,92
16/05/2008 06:00	7,5	7,7
16/05/2008 18:00	7,99	7,86
17/05/2008 06:00	7,84	7,88
17/05/2008 18:00	7,88	
18/05/2008 06:00		
18/05/2008 18:00		
19/05/2008 06:00	7,86	7,95
19/05/2008 18:00	7,84	7,88
20/05/2008 06:00	7,89	7,8
20/05/2008 18:00	7,85	7,89
21/05/2008 06:00		
21/05/2008 18:00		
22/05/2008 06:00		
22/05/2008 18:00		
23/05/2008 06:00	7,66	7,72
23/05/2008 18:00	7,93	7,89
24/05/2008 06:00	7,71	7,75
24/05/2008 18:00	8	7,82
25/05/2008 06:00	7,34	7,7
25/05/2008 18:00		
26/05/2008 06:00	7,39	7,7
26/05/2008 18:00	7,85	7,81
27/05/2008 06:00	7,5	7,9
27/05/2008 18:00	7,87	7,87
28/05/2008 06:00	7,91	7,84
28/05/2008 18:00	7,8	7,81
29/05/2008 06:00	7,7	7,73
29/05/2008 18:00	7,93	7,78
30/05/2008 06:00	7,75	7,74
30/05/2008 18:00	7,64	7,86
31/05/2008 06:00	7,7	7,71
31/05/2008 18:00	7,81	7,73

Fuente: Los autores

Tabla 12. Datos pH laguna condición eutrofizada.

LAGUNA EUTROFICADA

Fecha y hora	pH	
	promedio	salida
03/10/2002 06:00	8,49	8,46
03/10/2002 18:00	8,24	8,10
04/10/2002 06:00	8,58	8,44
04/10/2002 18:00	8,53	8,03
05/10/2002 06:00	8,66	8,25
05/10/2002 18:00	8,80	9,10
06/10/2002 06:00	8,64	8,28
06/10/2002 18:00	8,94	9,15
07/10/2002 06:00	8,54	8,68
07/10/2002 18:00	8,89	9,07
08/10/2002 06:00	8,42	8,46
08/10/2002 18:00	8,78	8,98
09/10/2002 06:00	8,40	8,76
09/10/2002 18:00	8,48	8,28

Fuente: Industria de lácteos