

ARTÍCULO ORIGINAL

La calidad del agua del lago de Izabal, Guatemala. Relaciones temporales y espaciales de variables físico-químicas y biológicas

Water quality Izabal Lake, Guatemala. Temporary and spatial relations of physical-chemical and biologicals variables

M.Sc. José Robledo^I, Dr. C. Eddi Alejandro Vanegas Chacón^{II}, Dr.C. Nancy García Álvarez^{III}

^I Universidad de San Carlos (USAC), Centro Universitario de Izabal, Guatemala.

^{II} Universidad de San Carlos (USAC), Facultad de Agronomía, Guatemala.

^{III} Universidad de Ciego de Ávila (UNICA), Facultad de Ingeniería, Centro de Estudios Hidrotécnicos, Ciego de Ávila, Cuba.

RESUMEN. La preservación del lago de Izabal depende del control de la calidad del agua de sus afluentes, por lo que el monitoreo de variables físico-químicas y biológicas de forma continua permite identificar variaciones en los niveles de contaminación, esto permite evaluar la propuesta del mejor y mayor uso de los suelos en las respectivas subcuencas de la cuenca del lago de Izabal y Río Dulce a través de la Autoridad del Lago. Basados en los registros bimensuales de variables físico-químicas y biológicas de los afluentes del lago, de la serie de años de 2005 al 2011, se determinó que el estado del N-NO_3^- en el lago es considerado como deseable, de conformidad con los estándares de la Agenda de Conservación del Lago. La modelación logística no estableció efecto significativo de época y posición sobre N-NH_4^+ y fósforo total, no obstante, sí lo estableció sobre oxígeno disuelto y transparencia, sin embargo, los modelos son de baja calidad utilizando como criterio el r^2 . Las variables respuesta con correlación al 5% de significación fueron: Ni y Mn (0,731), sólidos en suspensión y Cr (0,7019), sólidos en suspensión y oxígeno disuelto (-0,80), sólidos en suspensión y % de saturación de oxígeno disuelto (-0,791). Igualmente se determinaron modelos estadísticos con 5% de significancia para la predicción de la conductividad, porcentaje de sales, transparencia y sólidos en suspensión.

Palabras clave: manejo de cuencas hidrográficas, contaminación hídrica, regresión logística, control de calidad.

ABSTRACT. The preservation of Izabal Lake depends on the water quality control of its tributaries, since the monitoring of physicochemical and biological variables continuously allows identifying variations in pollution levels; this allows, at the same time, better criteria to evaluate the largest and better land use proposal in the respective sub-basins of the Izabal Lake and Río Dulce through the Lake Authority. Based on bimonthly records of physicochemical and biological properties of the tributaries of the lake, during the years from 2005 to 2011, it was determined that the condition of N-NO_3^- in the lake is considered desirable, in accordance with standards of the Conservation Agenda Lake. Logistics modeling did not establish significant temporary and special effect on N-NH_4^+ and total phosphorus, however, it was established on dissolved oxygen and transparency although those are low quality models using the r^2 criterion. The response variables with correlation at 5% level were: Ni and Mn (0,731), suspended solids and Cr (0,7019), suspended solids and dissolved oxygen (-0,80), suspended solids and % saturation of dissolved oxygen (-0,791). Statistical models are determined using 5% significance for prediction of the conductivity, salinity, suspended solids and transparency.

Keywords: river basin management, water pollution, logistic regression, quality control.

INTRODUCCIÓN

El estudio sobre calidad de los cuerpos de agua es centro de atención de la investigación ambiental y tema de interés para los pueblos y gobiernos, para planificar y regular su uso y/o conser-

vación. Las relaciones hombre-ambiente se manifiestan como cambios en la cobertura y uso del suelo en la cuenca hidrográfica (Chen y Yang 2008) y son reconocidos por varios autores desde

hace más de dos décadas como causa de cambios en el ambiente global (Lambin, 1997). Los lagos se originan principalmente por la obstrucción del drenaje superficial debido a procesos morfo-genéticos, conformando una estructura temporal en la historia erosional de los sistemas geográficos (Bellair y Pomero, 1977). Éstos reciben aportes sólidos y líquidos de su cuenca de drenaje, por escurrimiento lineal, laminar y subterráneo, razón por la cual las características de la calidad del agua reflejan los efectos acumulados de todos los aportes de agua y materiales procedentes del entorno. La estrecha relación entre el estado trófico de un sistema limnético y las condiciones geográficas y particularmente geomorfológicas de los lagos y de su cuenca de drenaje, han sido reportada por Ryding y Rast (1992). A menudo, estos ecosistemas están amenazados debido a que, la actividad antropogénica los convierte en receptores de toda clase de desechos, es por ello que muchos de los ecosistemas acuáticos son monitoreados periódicamente, tal como sucede en la Bahía de Matanzas (Ruiz *et al.*, 2005) y la Bahía de La Habana (Beltrán *et al.* 2005), en Cuba. El monitoreo o control de la calidad de los cuerpos de agua es fundamental para garantizar a los decisores información fidedigna de lo que ocurre en estos ecosistemas, lo cual es imprescindible para cualquier acción de manejo, como es el uso agrícola. Los principales métodos de evaluación son índices de calidad del agua (Behar *et al.*, 1997) o técnicas quimiométricas (Kowalkowski, 2006; Voncina *et al.*, 2002; Samboni *et al.*, 2007). Siendo el lago de Izabal el mayor de Guatemala, muchos son los esfuerzos realizados para su manejo y/o conservación a través de la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca Hidrográfica del Lago de Izabal y río Dulce (AMASURLI), pudiendo mencionarse el Plan de Acción Integrado de la Cuenca (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (Guatemala, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2007a), la

Agenda de Conservación (Guatemala, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2006) y la Agenda Estratégica Institucional de AMASURLI (Guatemala, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2007b), documentos todos que resumen los principios para garantizar la mejor salud del lago. Siendo objetivos de este trabajo evaluar la calidad del agua del lago espacial y temporalmente a través de una metodología local, fundamentada en valores máximos permisibles de variables físico-químicas establecidas por la Agenda de Conservación de AMASURLI y establecer modelos de regresión múltiple para su predicción.

MÉTODOS

El lago de Izabal está ubicado entre las latitudes 15°24'N a 15°38'N y las longitudes 88°58'W a 89°25'W. La cuenca del lago de Izabal va desde la costa del Mar Caribe hasta 250 kilómetros tierra adentro en la parte alta de las Verapaces. Posee un área de 717 kilómetros cuadrados, una profundidad media de 11,6 metros, una longitud máxima de 70 kilómetros y un ancho máximo de 20 kilómetros (Guatemala, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2007a). El 25,5% del lago presenta profundidades menores de 6 m y la profundidad del resto está comprendida entre 6 y 15 m (Guatemala, Oficina Técnica de Biodiversidad, 2003). La AMASURLI realiza colectas y análisis de muestras de agua del lago de Izabal de forma bimensual tanto en la denominada época seca (meses de noviembre a marzo) como de lluvia (abril a octubre).

Los puntos de muestreo fueron ubicados en la desembocadura de los principales ríos que drenan sus aguas hacia el lago (Chapín, Escoria, Estor, Finca Carolina, Finca Paraiso, Jocolo, Playa Dorada, Polochic Bujajal, Punta Brava y Sechoc) y en la propia área central del lago en los puntos mostrados en la Figura.

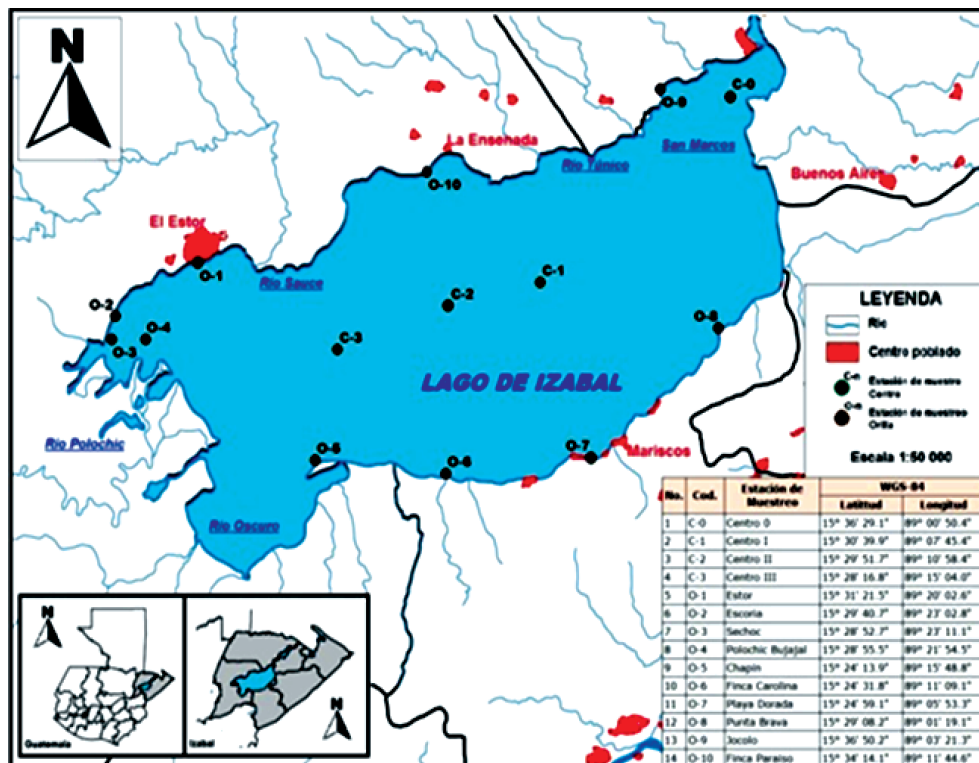


FIGURA 1. Puntos de muestreo de la base de datos de AMASURLI, Lago de Izabal, Guatemala.

Las muestras se colectaron de forma superficial y las variables determinadas fueron: pH, saturación de oxígeno disuelto (%), conductividad (S/m), Sales (%), todas por sonda multiparamétrica; transparencia (metros) por disco Secchi; amonio (mg/L), nitritos (mg/L), nitratos (mg/L), fósforo total (mg/L), ortofosfatos (mg/L), Mn (mg/L), Fe (mg/L), Cr (mg/L), Al (mg/L), Pb (mg/L) y demanda química de oxígeno (mg/L) por espectrofotometría visible utilizando un espectrofotómetro Nova 60; demanda biológica de oxígeno (mg/L) por OxiTop; Sólidos sedimentarios-20 min. (mg/L), sólidos sedimentarios-60 min. (mg/L) por conos Imhoff; sólidos en suspensión (mg/L) por filtración y secado y presencia o ausencia de E. coli por prueba de cultivo para coliformes (NMP/100). Para el estudio se utilizó la base de datos con registros bimensuales de la serie de años de 2005 al 2011 (Guatemala, Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Izabal y Río Dulce, 2013).

En primera instancia se realizó un análisis de regresión logística para las variables respuesta: amonio, fosforo total, nitratos, nitritos, oxígeno disuelto y transparencia en el agua del lago, de conformidad con las categorías de estado deseable o indeseable, según los límites máximos permisibles establecidos por La Agenda de Conservación de la Cuenca del Lago de Izabal y Río Dulce (Guatemala, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2006), para cuerpos de agua lenticos (Tabla 1).

TABLA 1. Límites máximos permisibles para la preservación de la calidad del agua del lago de Izabal

No.	Indicador	Indeseado	Deseado
1	Amonio	> = 0,07 mg/L	< = 0,06 mg/L
2	Fosforo total	> = 0,1 mg/L	< 0,1 mg/L
3	Nitratos	> 5 mg/L	< = 5 mg/L
4	Nitritos	> 0,002 mg/L	< = 0,002 mg/L
5	Oxígeno disuelto	< = 6 mg/L	> 6 mg/L
6	Transparencia	< = 2 m	>2,5 m

Fuente: Guatemala, Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Izabal y Río Dulce (2006).

El modelo de regresión logística utilizó como variable dependiente el estado indeseado de la variable respuesta P (Y), con variables independientes cualitativas de época y posición

y como variable independiente cuantitativa, la temperatura del agua al momento del muestreo. Para el análisis se utilizó el procedimiento “Logistic” del programa estadístico mencionado, que permitió estimar la probabilidad de ocurrencia de la variable dependiente.

$$P(Y) = 1 / (1 + \exp(-(E_i + P_j + CT_k)))$$

P (Y)- Probabilidad del estado indeseable de la variable dependiente;

E_i -Efecto de época;

P_j-Efecto de posición;

T_k - Covariable de temperatura.

Para estudiar la dinámica de las variables físico-químicas en el agua del lago de Izabal se realizó un análisis de correlación de Pearson, para establecer el grado de asociación entre variables y posteriormente un análisis inferencial para comparar los valores promedio de las variables estudiadas en grupos definidos por posición dentro del lago (centro u orilla) y época (seca o lluviosa). Para ello se utilizó la técnica de modelos mixtos, mediante el procedimiento “Mixed” del programa Statistical Analysis System SAS, versión 9.3. La presencia o ausencia de E. coli, se evaluó mediante una prueba de Chi-cuadrado, según época (seca y lluvia) y posición (centro del lago y orilla).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación de la calidad del agua mostró que los indicadores físico-químicos evaluados se encontraban en el estado indeseado, aunque mostraron diferencias estadísticas en cuanto al efecto de época y posición para el oxígeno disuelto y efecto de posición para la transparencia. En cuanto al efecto temperatura se encontraron diferencias con el amonio, el oxígeno disuelto y la transparencia. El ión nitrato no fue objeto de estudio pues su valor máximo no alcanzó los límites máximos permisibles (menor o igual que 5 mg/L). Se identificaron como indicadores de sensibilidad el oxígeno disuelto y la transparencia, sobre los cuales existió efecto significativo tanto en la época lluviosa como en el centro del lago aún cuando el coeficiente de determinación de todas las estimaciones fue de poca calidad (Tabla 2).

TABLA 2. Análisis de variables físico- químicas de calidad del agua del lago de Izabal con 5% de significación

Variable	Intercepto	Efecto de época y posición	Intercepto época lluviosa	Intercepto posición central	Efecto de temperatura	Coefficiente temperatura	R ²
N-NH ₄ ⁺	-5,4170	Sin efecto			Con efecto	0,2884	0,11
N-NO ₂ ⁻		Sin efecto			Sin efecto		
Fósforo Total		Sin efecto			Sin efecto		
Oxígeno disuelto	-4,5608	Época y posición	-0,4581	-0,2245	Con efecto	0,1609	0,05
Transparencia	-6,5574	Posición		-1,2221	Con efecto	0,2108	0,24

Existieron correlaciones positivas a un nivel de significación del 5%, entre oxígeno disuelto (mg/L) y porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (0,886), conductividad y porcentaje de sales (0,876), Ni y Mn (0,731), Ni y fósforo orgánico (0,564), DQO y N-NO₃⁻ (0,58), sólidos sedimentarios-20 min. y fósforo total (0,657), sólidos sedimentarios-

60 min. y fósforo total (0,659), sólidos en suspensión y Cr (0,7019), sólidos en suspensión y Al (0,618), sólidos sedimentarios 20 min. y sólidos sedimentarios 60 min. (0,99), y correlaciones negativas entre sólidos en suspensión y

Oxígeno disuelto (-0,80), sólidos en suspensión y porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (-0,791), sólidos en suspensión y DQO (-0,606). Como producto del análisis inferencial se determinó un efecto estadísticamente significativo al 5% de la época

de muestreo, posición y temperatura al momento de colecta de las muestras, según se observa en la Tabla 3, donde también se muestra que las variables $N-NH_4^+$, $N-NO_2^-$, Pb, DBO_5 , DQO y sólidos en suspensión, no presentan efecto de estación, posición y temperatura al momento de colecta de las muestras. Las variables pH, oxígeno disuelto, conductividad, hierro y sólidos sedimentarios-20 min. sí presentan efecto de época en la estación lluviosa y de posición en el centro del lago, así como la temperatura al momento de colecta de la muestra. Las variables $N-NO_3^-$, P total y Al presentan efecto de posición en el centro del lago y el Cr efecto de estación en la época lluviosa mientras que el Cu y el Al no presentan efecto de temperatura al momento de toma de la muestra. Otro elemento interesante a considerar es que el lago de Izabal es un sistema abierto con una entrada (río Polochic) y una salida (río Dulce, que drena al Mar Caribe), con tiempo de resiliencia del agua en el lago estimada en 6,6 meses, es decir como promedio el agua del lago se re-cambia dos veces por año (Brinson y Nordlie, 1975). Basados en esta información, se pudo generar modelos mixtos para predecir o elaborar hipótesis sobre cada una de las variables de estudio, con efecto de por lo menos uno de los factores época, posición y temperatura, los modelos son de la forma:

$$y_{ijklm} = \mu + T_i + A_j + P_k + \varepsilon_{ijk}$$

donde:

y_{ijklm} -valor de la variable dependiente medida con la i^a temperatura, en el j^o posición, correspondiente a la l^a época;

μ -efecto común a todas las observaciones;

T_i -covariable, temperatura del agua en el momento del muestreo;

A_j -efecto fijo de la j^o posición (se evaluó la posición centro);

P_k -efecto fijo de la l^a época (se evaluó la época de lluvia);

ε_{ijk} -error aleatorio.

Los modelos de mayor coeficiente de determinación al 5% de significación son conductividad eléctrica ($r^2=0,52$), porcentaje de sales ($r^2=0,56$), transparencia ($r^2=0,56$), Ni ($r^2=0,44$) y sólidos en suspensión ($r^2=0,78$). Respecto a la calidad biológica la prueba de Chi cuadrado, con significación al 5%, indicó que existe una mayor cantidad de puntos muestreados con E. coli positivos durante la época seca y posición de orilla en el lago de Izabal (Tabla 3).

TABLA 3. Síntesis de análisis inferencial de variables físico-químicas del agua del lago de Izabal

Variable	Término independiente	Efecto de época y posición	Intercepto época lluviosa	Intercepto posición central	Efecto de temperatura	Coeficiente de temperatura	R ²
pH	7,11456	Época y posición	-0,16785	0,161604	Con efecto	0,020514	0,31
Oxígeno disuelto	4,47009	Época y posición	-0,32443	0,502286	Con efecto	0,08833	
Conductividad	106,9773	Época	-36,02958		Con efecto	8,5674	0,52
Sales	0,01643	Época	-0,01996		Con efecto	0,005119	0,46
Transparencia	-1,100252	Posición		1,094283	Con efecto	0,059104	0,56
$N-NH_4^+$		Sin efecto			Sin efecto		0,03
$N-NO_2^-$		Sin efecto			Sin efecto		0,14
$N-NO_3^-$		Posición			Sin efecto		0,12
Ortofosfatos	0,97356	Posición		-0,025046	Con efecto	-0,00712	0,15
Fósforo Total	0,609117	Posición		-0,0271829	Con efecto	-0,01730	0,05
Mn	0,629820	Sin efecto			Con efecto	-0,01378	0,37
Fe	3,052360	Época y posición	0,305885	-0,264176	Con efecto	-0,09639	0,32
Cr	0,129310	Época	0,021114		Con efecto	-0,00331	0,07
Cu	0,177180	Época y posición	0,044367	-0,003586	Sin efecto		0,19
Al	0,189123	Posición		0,0346149	Sin efecto		0,33
Ni	0,756327	Época y posición	0,080487	-0,044873			0,44
Pb		Sin efecto			Sin efecto		0,07
Zn	0,189385	Época	-0,146688				0,35
DQO		Sin efecto			Sin efecto		0,21
DBO		Sin efecto			Sin efecto		0,14
Sólidos sedimentarios tamiz 20 mm	0,4515899	Época y posición	0,098659	-0,0118952	Con efecto	-0,01665	0,08
Sólidos sedimentarios tamiz 60 mm	0,7954135	Época	0,178027		Con efecto	-0,02937	0,07

Variable	Término independiente	Efecto de época y posición	Intercepto época lluviosa	Intercepto posición central	Efecto de temperatura	Coefficiente de temperatura	R ²
Sólidos en suspensión E. coli	0,1967936	Sin efecto			Sin efecto		0,78
Prueba de Chi cuadrado							
	Época	Lluviosa Menor positivos	Seca Mayor de positivos	Posición	Orilla Mayor de positivos	Centro Menor positivos	

CONCLUSIONES

- La calidad del agua respecto a la concentración de N-NO_3^- es considerada como deseable, pues durante los años 2005-2011 su valor máximo no sobrepasa el máximo permisible de 5 mg/L.
- Se determinó efecto significativo de época y posición respecto al oxígeno disuelto y transparencia, sin embargo, los modelos logísticos son de baja calidad utilizando como criterio el r^2 . No se determinó efecto significativo sobre N-NH_4^+ y P total.
- Los modelos estadísticos generados a través del análisis inferencial con 5% de significación permiten la predicción de la conductividad, porcentaje de sales, transparencia y sólidos en suspensión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEHAR, R.; M. ZUÑIGA; O. ROJAS: "Análisis y Valoración del Índice de Calidad de Agua (ICA) de la NSF: Casos Ríos Cali y Meléndez", *Ingeniería y Competitividad*. (1): 17-27, 1997.
- BELLAIR, P. & CH. POMEROL: *Elementos de Géologie*. Ed. Collin, Guatemala, 1977.
- BELTRÁN, J.; A. MARTÍN; F. RUIZ, M. PÉREZ; M. MANCEBO, M. RAMÍREZ; O. PÉREZ, I. TORRES y R. RODRÍGUEZ: Control y evolución de la contaminación en la bahía de la Habana, En: *Memorias de la V Convención Internacional sobre medio Ambiente y Desarrollo*, MEC 001, La Habana, Cuba, 2005.
- BRINSON, M. M & NORDLIE, F.G.: "Lake Izabal, Guatemala. Verhandlungen Internationale Vereinigung fur Theoretische Undhangevan-dre", *Limnology*, (19): 1468-1479, 1975.
- CHEN, L. & H. YANG: "Scenario simulation and forecast of land use/cover in northern China", *Chines Science Bulletin* (53): 1401-1412, 2008.
- GUATEMALA, AUTORIDAD PARA EL MANEJO SUSTENTABLE DE LA CUENCA DEL LAGO DE IZABAL Y RÍO DULCE (AMASURLI): *Base de datos, serie de los años 2005-2011*, Laboratorio de Calidad de Agua, Río Dulce, Izabal, Guatemala, 2013.
- GUATEMALA, AUTORIDAD PARA EL MANEJO SUSTENTABLE DE LA CUENCA DEL LAGO DE IZABAL Y RÍO DULCE (AMASURLI): *límites máximos permisibles establecidos por La Agenda de Conservación de la Cuenca del Lago de Izabal y Río Dulce para cuerpos de agua lentico*, Guatemala, 2006.
- GUATEMALA, MINISTERIO DE AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (MARN): *Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Izabal y Río Dulce (AMASURLI)*, 45pp., Fundación Defensores de la Naturaleza (FDN), The Natural Conservancy (TNC). Agenda de Conservación de la Cuenca del Lago de Izabal y Río Dulce, Guatemala, 2006.
- GUATEMALA, MINISTERIO DE AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (MARN): *Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Izabal y Río Dulce (AMASURLI)*, 76pp., Plan de Acción Integrado de la Cuenca del Lago de Izabal, Río Dulce, Guatemala, 2007a.
- GUATEMALA, MINISTERIO DE AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (MARN): *Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Izabal y Río Dulce (AMASURLI)*, 34pp., Agenda Estratégica Institucional 2007-2017, Guatemala, 2007b.
- GUATEMALA, OFICINA TÉCNICA DE BIODIVERSIDAD (OTECBIO): *Estudio de caso: presencia de Hydrilla verticillata (L.F.) Royle en el sistema hidrológico del Lago de Izabal y Río Dulce*, 60pp., Departamento de Izabal, Guatemala, 2003.
- KOWALKOWSKI, T., R. ZBYTNIESWSKI; J. SZPEJNA; B. BUSZEWSKI: "Application of chemometrics in river water classification", *Water Research*, (40): 744-752, 2006.
- LAMBIN, E.F.: "Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions", *Progress in Phisycal Geography*, 21(3): 375-393, 1997.
- RUIZ, F.; M. PÉREZ; J. BELTRÁN; H. MANCEBO; R. REGADERA; A. MARTÍN; M. RAMÍREZ y F. SOLAR: Calidad ambiental de la Bahía de Matanzas, Cuba, En: *Memorias de la V Convención Internacional sobre medio Ambiente y Desarrollo*. MEC 07, La Habana, Cuba, 2005.
- RYDING, S. & W. RAST: *El control y de la eutrofización en lagos y pantanos*, UNESCO, Ed. Pirámide, Madrid, España, 1992.
- SAMBONI, N.; Y. CARVAJAL; J. ESCOBAR: "Parámetros Físicoquímicos como Indicadores de Calidad y Contaminación del Agua, Estado del Arte" *Ingeniería e Investigación*, (27): 172-181, 2007.
- VONCINA, D.; D. DOBCNIK; M. NOVIC; J. ZUPAN: "Chemometric characterization of the quality of river water", *Analytica Chimica Acta*, (462): 87-100, 2002.

Recibido: 31 de agosto de 2013.

Aprobado: 22 de julio de 2014.

José Robledo, Ingeniero Agrónomo, M.C., Universidad de San Carlos (USAC), Centro Universitario de Izabal, Tel. (502) 42126338, Guatemala, Correo electrónico: jarobledoh@yahoo.com