

Aplicación de algunos modelos de calidad de agua en dos sitios del embalse El Peñol-Guatapé (Antioquia, Colombia)

*Néstor Aguirre**, *Jaime Palacio***, *John Jairo Ramírez****

(Recibido el 9 de agosto de 2001)

Resumen

Durante un año se estudió el comportamiento de dos columnas de agua en el embalse El Peñol-Guatapé. La estación uno se ubicó a la entrada del río Nare (principal tributario del embalse) y la dos en la zona denominada isla del Sol (de características predominantemente lénticas). En cada estación se hicieron muestreos mensuales con el propósito de calcular la tasa de velocidad de reacción biológica y se aplicaron algunos modelos de carga de nutrientes y de eutroficación.

En la estación uno las tasas de asimilación de nutrientes por parte de los microorganismos y de sedimentación de organismos clorofilados fueron más altas que en la estación dos. En general, la producción primaria en la estación uno estuvo limitada por el fósforo y en la estación dos, se detectaron limitaciones por nitrógeno durante cinco meses y en siete por el fósforo. A partir del modelo de predicción de la eutroficación, en lagos cálidos tropicales, se encontró que el embalse El Peñol-Guatapé es oligoproductivo.

----- *Palabras clave:* embalse, río Nare, nutriente limitante, carga, tasa, eutroficación, modelo.

Application of some models of water quality in two places located in the reservoir El Peñol-Guatapé (Antioquia-Colombia)

Abstract

The dynamics behavior in two stations of sample in El Peñol-Guatapé reservoir was studied during a year. The station one was located at the entrance of the Nare river (Main tributary to the reservoir) and the station two in the called Sun island (with mainly lentic characteristics). In each station, monthly samples were done with the purpose of calculating two hydrobiologics parameters and some models of loads of nutrients and eutrophication were applied.

* Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad de Antioquia. naguirre@udea.edu.co.

** Centro de Investigaciones Ambientales y de Ingeniería. Universidad de Antioquia. japalaci@jaibana.udea.edu.co.

*** Instituto de Biología. Universidad de Antioquia. jjramirez@matematicas.udea.edu.co.

According to the this study, it was established that in the station one the rate of nutrient's assimilation by microorganisms and the sedimentation's rate of chlorophylled organisms were more elevated that in the station two. In general, it was found that the primary production in the station one was limitedated by the phosphorus and there were limitations for nitrogen in five months and seven months by the phosphorus in station two. Starting from the model of prediction of eutrophication, in tropical warm lakes, it was found that El Peñol-Guatapé reservoir is oligoproductive.

----- *Key words:* reservoir, Nare River, limiting nutrient, load, rate, eutrophication, model.

Introducción

El estudio hidrobiológico de la calidad de agua brinda información valiosa para el manejo adecuado de embalses de agua [1].

Existen diversos métodos para estudiar la calidad del agua de los ecosistemas acuáticos continentales; Thienemann y Naumann fueron los primeros en aplicar el concepto de eutroficación a los lagos [2, 3]. Con relación a los embalses, se han realizado desde estudios limnológicos aplicados, hasta el empleo de modelos empíricos y teóricos que tratan de resumir la información sobre el tema de la eutroficación. El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (CEPIS) ha reunido datos y trabajos de diversos países neotropicales con el fin de obtener y calibrar un modelo empírico, que permita predecir y diagnosticar el fenómeno de la eutroficación [4].

Uno de los modelos más aplicado en el estudio del fenómeno de la eutroficación fue propuesto por Vollenweider y Kerekes [5]. Para el trópico, el CEPIS desarrolló un modelo que correlaciona

valores experimentales estimados. Los valores estimados se representan por medio de expresiones matemáticas que deben reflejar la posibilidad del fenómeno de la eutroficación y calibrarse de acuerdo con los valores observados en el campo.

El planteamiento básico de esta investigación fue el de estudiar el comportamiento dinámico de dos columnas de agua durante un año en el embalse El Peñol-Guatapé, calculando dos parámetros hidrobiológicos y aplicando algunos modelos de carga de nutrientes y de masa de agua. Adicionalmente, se reunió para el año de estudio (desde agosto de 1992 hasta julio de 1993) información general del sistema, como un aporte para el estudio de los embalses tropicales.

Descripción del área de estudio y estaciones de muestreo

El embalse El Peñol-Guatapé se localiza en el oriente Antioqueño ($6^{\circ} 13' 20'' N$ y $75^{\circ} 10' 11'' O$) en zona batolítica a 50 km de Medellín y a una altitud de 1.887,5 msnm (véase figura 1). El

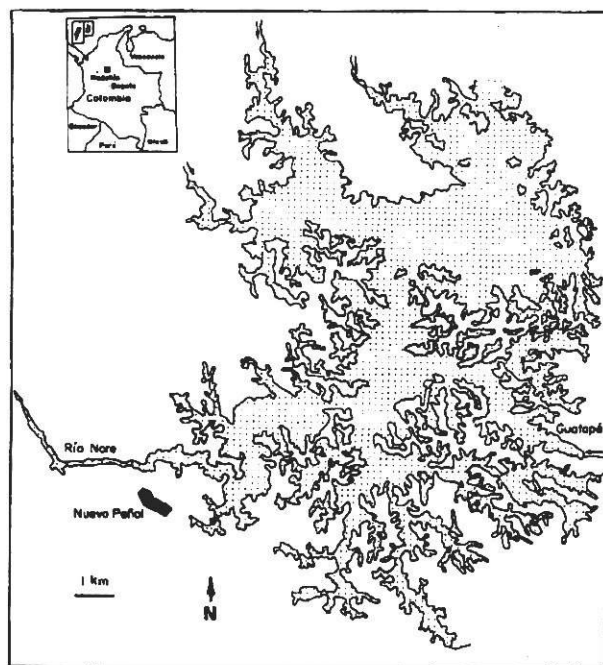


Figura 1 Ubicación general del embalse El Peñol-Guatapé

En donde t es el tiempo, L es la DBO (masa/volumen), K es la constante de velocidad de reacción de primer orden (tiempo⁻¹).

Para evaluar la tasa de sedimentación fitoplanctónica, se tomaron muestras de dos litros de agua a 10 cm de profundidad en las dos estaciones. Durante los experimentos en el laboratorio, la temperatura se mantuvo a 20 °C, en condiciones similares a las del embalse. Cada muestra se depositó en una probeta de 2.000 ml, cubierta con papel aluminio para evitar la entrada de luz. Cada dos horas se tomaron 150 ml de muestra, a la misma altura de la columna de agua contenida en las probetas, para medir la clorofila "a" según la metodología propuesta por Ramírez [8].

Para la medición de la DBO, el nitrógeno total soluble y el fósforo total soluble, se siguieron los criterios establecidos en el Standard Methods [9].

Para determinar el nutriente limitante en cada estación y en cada mes de muestreo, se tomaron los promedios mensuales de las cargas de nitrógeno total y de fósforo total. Esta relación permite establecer el nutriente limitante para la productividad primaria a partir de la regla de decisión: si $N_T/P_T > 9$ el factor limitante es el fósforo y si $N_T/P_T < 9$ el factor limitante es el nitrógeno [5]. Para la estimación de las cargas de nutrientes se utilizaron los caudales y las concentraciones de éstos, con base en las siguientes expresiones:

1. Carga de nitrógeno (kg/día): $N = Q \times C_N$

donde Q es el caudal promedio influente (m³/s), C_N es la concentración promedio (mg/l) de nitrógeno orgánico en el influente.

2. Carga de fósforo (kg/día): $P = Q \times C_p$

donde C_p es la concentración promedio (mg/l) de fósforo total.

En el caso de la estación uno, el caudal promedio del influente se determinó a partir del caudal promedio anual registrado en el río Nare. Para el cálculo del caudal promedio en la estación dos

se consideraron los aportes del río Nare y los principales tributarios del embalse.

Los aportes de nutrientes se determinaron por medio del modelo de Clark, incluye la medición de nutrientes y flujos en los tributarios. El estimador de razones de Clark calcula el aporte diario promedio para la variación del flujo durante el ciclo anual [4].

En la predicción de la eutroficación se empleó un modelo propuesto por el CEPIS, que corresponde a la expresión:

$$\frac{L_{(P)}}{z} \text{ vs } T_w, \text{ y cuya formulación es la siguiente:}$$

$$P = \frac{L_{(P)} T_w^{3/4}}{3z}$$

Donde P es el fósforo total (mg/l), $L_{(P)}$ es el aporte de fósforo total (g/m² año), z es la profundidad promedio (m) y T_w (años) es el tiempo de retención hidráulico.

Resultados y discusión

Características generales de las estaciones de muestreo

Durante el año de estudio se reunió la información limnológica que permitió la aplicación de los modelos, con el fin de lograr un acercamiento al fenómeno de la eutroficación en el embalse El Peñol-Guatapé y mejorar el conocimiento sobre el funcionamiento del cuerpo de agua, en especial como un aporte al estudio de los embalses cálidos del trópico. En la tabla 1 se presentan los promedios mensuales de las variables consideradas en el estudio.

En la tabla 1 se presentan los promedios anuales obtenidos de muestras de agua de la subsuperficie de la estación isla del Sol. Es importante anotar que, durante el año de estudio, el fósforo total, el fósforo soluble, el nitrógeno amoniacal soluble, el nitrógeno total, los nitratos, los nitritos, el

Tabla 1 Información para el principal tributario, el río Nare (estación uno) [10]

<i>Parámetro</i>	<i>Río Nare</i>	<i>Isla del Sol</i>
Caudal promedio durante el año de muestreo	18,85 m ³ /s	
Área de la cuenca	1.210 km ²	
Área superficial del embalse		6.240 Ha
Volumen total en su cota máxima		1.240 Mm ³
Profundidad media		27,5 m
Transparencia media del agua		2,7 m
Temperatura ambiente	20 °C	20 °C
Temperatura promedio del agua		21 °C
Fósforo total	0,1037 mg/l	0,07015 mg/l
Fósforo soluble reactivo	0,04195 mg/l	0,03537 mg/l
Nitrógeno total Kjeldahl	1,1923 mg/l	0,8957 mg/l
Nitratos	0,3045 mg/l	0,2192 mg/l
Nitritos	0,01758 mg/l	0,003453 mg/l
Nitrógeno amoniacal	0,4669 mg/l	0,4363 mg/l
Conductividad eléctrica	58,11 µmhos/cm	46,96 µmhos/cm
Oxígeno disuelto	8,2 mg/l	6,2 mg/l
Carga anual de nitrógeno total	711,6 ton.	
Carga anual de fósforo total	63,3 ton.	
Carga anual de hierro total	604,4 ton.	
Carga anual de DBO5	1.368,2 ton.	

hierro total, los sólidos totales, los sólidos suspendidos, la conductividad y la alcalinidad registraron valores superiores en los primeros meses de estudio, con respecto a reportes previos en la literatura para este embalse. Sin embargo, los valores de estas variables mostraron tendencias decrecientes como consecuencia del efecto de dilución [11].

En la tabla 2 se sintetizan los resultados de la cinética de la DBO. Los valores de *K* indican probablemente que en la estación uno el agua tiene bajo contenido de materia orgánica. En la estación dos (isla del Sol) el valor de *K* es muy bajo debido a la reducida concentración de materia orgánica. En general, la *K* de la estación dos es menor que en la uno, al igual que la DBO.

Tabla 2 Tasas de velocidad de reacción, según la cinética de la DBO, en dos estaciones del embalse El Peñol-Guatapé

<i>Estación</i>	<i>DBO</i>								<i>Variable</i>	
	1	2	3	4	5	6	7	<i>K</i>	<i>Lo</i>	
Río Nare	0,6	1,1	1,4	1,7	2,0	2,2	2,3	0,232	2,90	
Isla del Sol	0,5	0,7	1,1	1,2	1,4	1,6	1,7	0,151	2,60	

A partir del concepto de que la velocidad de oxidación de la materia orgánica es directamente proporcional a la cantidad de ésta remanente en el tiempo, se puede afirmar que la constante de tasa de velocidad de reacción K es mayor en la estación uno que en la dos. En la estación uno probablemente existe mayor afinidad de los microorganismos por el sustrato, por lo que la materia orgánica se asimila con mayor rapidez. La DBO última (Lo) es superior en la estación uno, debido a la mayor concentración de materia orgánica.

Tasa de sedimentación fitoplanctónica

La tasa de sedimentación fitoplanctónica fue mucho mayor en la estación uno que en la dos. En este caso, la mayor densidad de fitopláncetes conduce a una competencia más intensa de las poblaciones por los recursos. Por tanto, se incrementa la mortalidad de los organismos, se produce mayor cantidad de material sedimentable

y, consecuentemente, se incrementa la fracción no viva del seston.

En la tabla 3 se presentan los resultados de las concentraciones de clorofila a en las dos columnas de agua en el embalse El Peñol-Guatapé.

En las tablas 4 y 5 se presentan las cargas de nitrógeno total, fósforo total y la relación entre éstas, para cada mes de muestreo en las esta-

Tabla 3 Concentración de clorofila "a" (en µg/l) en función del tiempo en el embalse El Peñol-Guatapé. Mayo de 1993

Tiempo	Río Nare antes del puente al Marjal	Isla del Sol
8 :00 a.m.	11,900	_____
10:00 a.m.	_____	3,5700
12:00 m.	8,5680	2,1182
2:00 p.m.	5,9976	1,3328

Eutroficación

Tabla 4 Cargas de nitrógeno total (kg/día) y fósforo total (kg/día) en la estación uno de agosto de 1992 a julio de 1993

Mes	Nitrógeno total (kg/día)	fósforo total (kg/día)	Relación Nt/Pt	Nutriente limitante
Agosto	2.641,77	169,86	15,552	¹ P
Septiembre	3.849,12	158,63	24,265	P
Octubre	1.632,96	510,45	3,199	² N
Noviembre	2.944,06	241,57	12,175	P
Diciembre	1.788,48	113,36	15,777	P
Enero	1.476,58	342,06	4,317	N
Febrero	1.232,06	55,99	22,006	P
Marzo	8.33,76	81,39	10,244	P
Abril	1.437,70	94,18	15,266	P
Mayo	2.763,07	208,05	13,281	P
Junio	1.130,01	42,77	26,424	P
Julio	1.687,40	63,76	26,463	P

1 $P = Nt/Pt > 9$ limitado por fósforo.

2 $N = Nt/Pt < 9$ limitado por nitrógeno.

Tabla 5 Cargas de nitrógeno total (kg/día) y fósforo total (kg/día) en la estación dos de agosto de 1992 a julio de 1993

<i>Mes</i>	<i>Nitrógeno total (kg/día)</i>	<i>Fósforo total (kg/día)</i>	<i>Relación Nt/Pt</i>	<i>Nutriente limitante</i>
Agosto	3.725,57	1.756,51	2,12	² N
Septiembre	2.827,01	453,60	6,23	N
Octubre	1.874,02	334,37	5,60	N
Noviembre	3.140,64	122,69	26,60	¹ P
Diciembre	3.344,54	418,18	8,00	N
Enero	1.518,05	149,47	10,16	P
Febrero	1734,91	78,62	22,07	P
Marzo	1.146,53	40,61	28,23	P
Abril	2.198,02	78,62	28,00	P
Mayo	2.025,22	296,35	6,83	N
Junio	1190,59	37,15	32,05	P
Julio	1.841,18	57,89	31,80	P

1 $P = Nt/Pt > 9$ limitado por fósforo.

2 $N = Nt/Pt < 9$ limitado por nitrógeno.

ciones uno y dos. En la estación uno, la mayoría de los meses el nutriente limitante es el fósforo. Por su parte, en agosto, septiembre, octubre y diciembre de 1992 y mayo de 1993 el nutriente limitante fue el nitrógeno. En contraste, en noviembre de 1992, y enero, febrero, marzo, abril, junio y julio de 1993 el fósforo fue el factor limitante.

Mientras en la estación uno las limitaciones por fósforo fueron muy marcadas, en la estación dos se presentaron en cinco meses limitaciones por nitrógeno, y en los otros siete meses por el fósforo. Esta situación se fundamenta en la fertilización antrópica en la zona de drenaje del embalse, principalmente con el uso de agroquímicos con una alta carga de nitrógeno. Sin embargo, esta característica no es muy clara en la estación dos, donde las limitaciones pueden ser por fósforo o por nitrógeno. En este caso, se descarta el efecto limitante de la luz debido a la presencia de clima lumínico adecuado en este sitio.

Para el modelo de aporte de nutrientes de Clark fueron estudiadas las cargas de fósforo total, nitrógeno total, hierro total y DBO₅, en las dos estaciones. Los valores estimados se presentan en la tabla 6 y son basados en once grados de libertad. Con la aplicación del modelo de Clark las relaciones entre nutrientes en la estación uno fueron:

El modelo de aporte de nutrientes permitió calcular las cargas de nutrientes, basado en un diseño estadístico que tiene en cuenta las desviaciones diarias causadas por eventos pico y cuyos valores estimados presentan once grados de libertad. Las cargas de hierro, nitrógeno y fósforo fueron más altas en la estación dos. En contraste, las cargas de DBO fueron mayores en la estación uno. A partir de este modelo, se estableció que en la estación uno las limitaciones fueron por fósforo y en la estación dos la producción estuvo limitada por nitrógeno.

El modelo de predicción de la eutrofización basado en el fósforo total [4] fue aplicado en la

estación dos, ya que ésta presenta condiciones propias de un sistema léntico. Este modelo permitió calcular una concentración de fósforo total de 2,1727 mg P/m³. Con este valor y haciendo uso del modelo probabilístico propuesto por

Vollenweider & Kerekes [5], se clasificó al embalse de El Peñol-Guatapé como un cuerpo de agua en transición ultraoligoproductivo-oligoproductivo (figuras 3 y 4).

Tabla 6 Cargas diarias y anuales y los respectivos errores medios, de cuatro variables fisicoquímicas calculadas con el modelo de clark en dos estaciones, en El embalse el Peñol-Guatapé, desde agosto de 1992 hasta julio de 1993

Estación	1				2			
	<i>Antes del puente al Marial</i>				<i>Isla del Sol</i>			
Variable	Fósforo	Nitrógeno	Hierro	DBO ₅	Fósforo	Nitrógeno	Hierro	DBO ₅
Estimativos	Total	Total	Total	Total	Total	Total	Total	Total
Carga diaria kg/día	173,5	1.949,6	1.655,9	3.748,4	320,1	2.211,8	1.783,4	2.989,3
Error medio (kg)	36,9	212,9	176,5	441,4	133,7	213,9	275,8	395,2
Carga anual toneladas	63,3	711,6	604,4	1.368,02	116,8	807,3	650,9	1091,1
Error medio toneladas	13,5	77,7	64,4	161,1	48,8	78,1	100,7	144,3

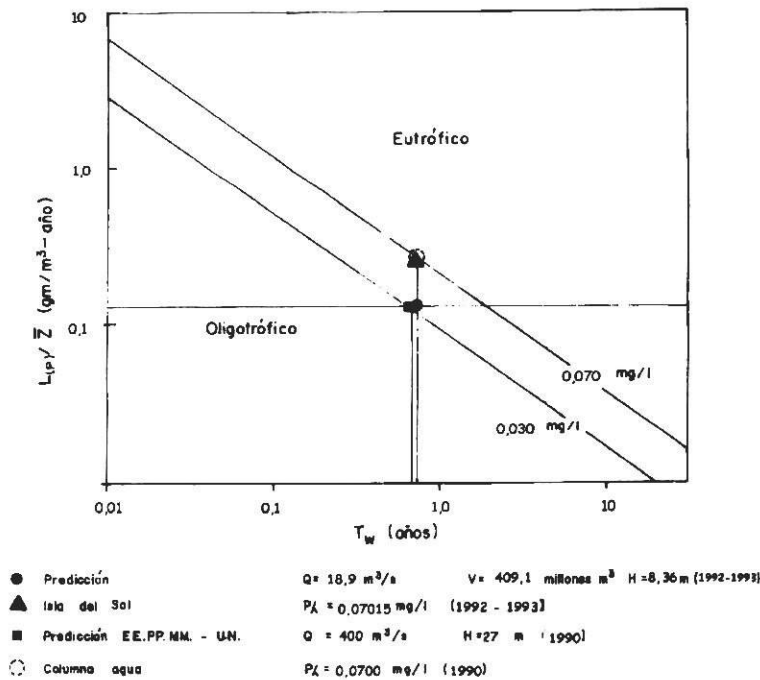


Figura 3 Predicción de la eutrofización en el embalse El Peñol-Guatapé. Método del CEPIS para lagos cálidos tropicales

En el embalse El Peñol-Guatapé hay diferencias importantes en la calidad del agua entre las dos estaciones; las aguas más ricas en nutrientes son aquellas que presentan marcada influencia del río Nare y gradualmente disminuyen las concentraciones de nutrientes en dirección norte, debido a considerable aumento en el volumen de agua almacenada. La riqueza de nutrientes y la productividad primaria en el embalse son diferenciales, y en el embalse se presentan varios niveles tróficos, desde aguas euproductivas en la estación uno hasta aguas ultraoligoproductivas en la dos. Es de esperarse que entre las diferentes áreas dendríticas del embalse, se encuentre una

amplia gama de zonas con diferentes estados tróficos y de calidad de agua.

La influencia del río Nare sobre el embalse se mitiga rápidamente, en los dos primeros kilómetros en dirección sur-norte, debido a la interacción entre la comunidad fitoplanctónica y el sedimento, en la zona correspondiente a la estación uno. Esta característica le confiere propiedades de regulación, manteniendo gran parte de la zona A y aguas abiertas de las zonas B y C sin aportes significativos de la materia orgánica del río Nare. Con base en lo anterior, se puede afirmar que la mayor parte de la masa de agua del embalse presentó características oligoproductivas (figura 5).

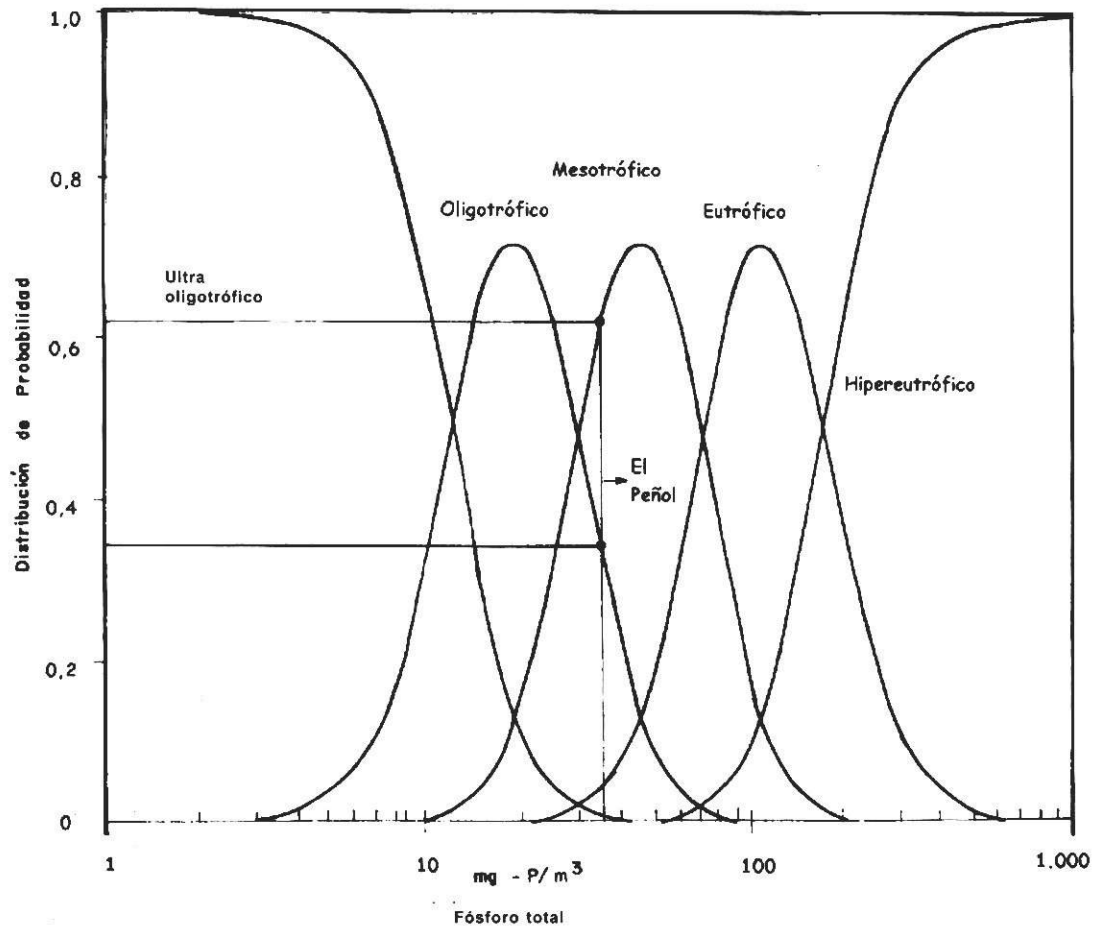


Figura 4 Estado trófico del embalse El Peñol-Guatapé de acuerdo a la distribución de probabilidad de nivel trófico para lagos cálidos tropicales basado en el fósforo total
Fuente: adaptado de [4] y [5].

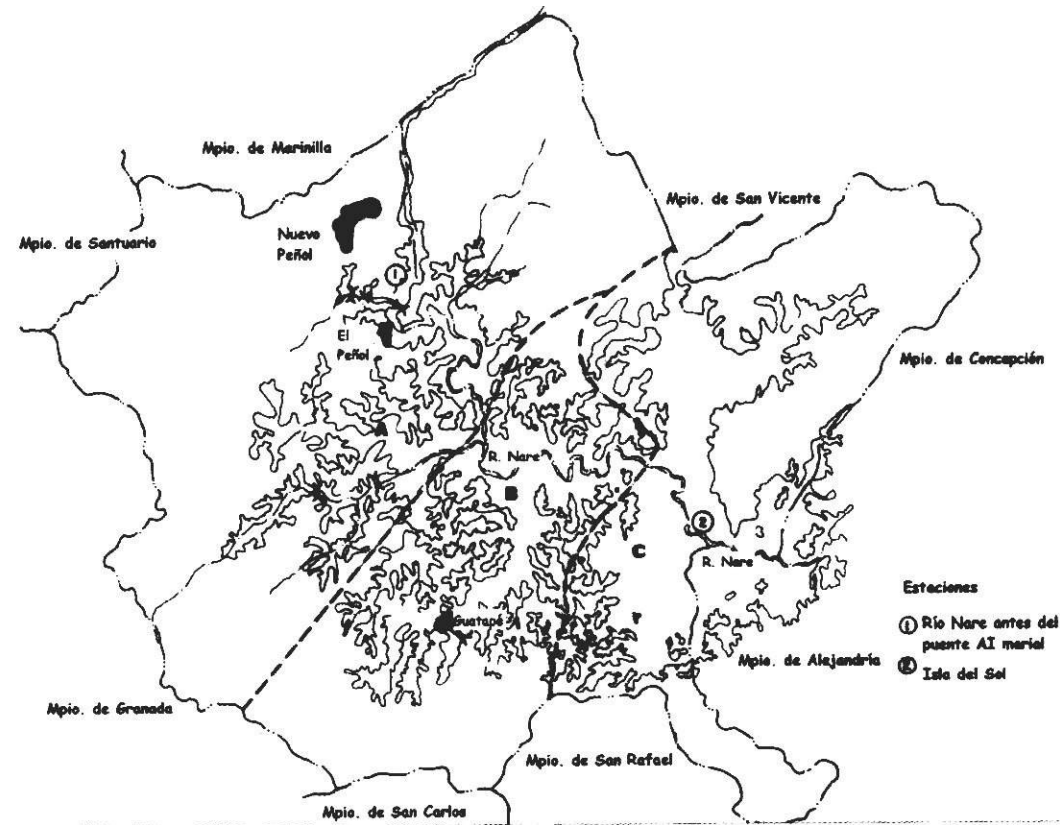


Figura 5 Zonas de calidad de agua del embalse El Peñol-Guatapé [12]

Agradecimientos

Este trabajo se pudo realizar como parte del proyecto "Identificación de la dinámica hidrobiológica que permita planificar actividades de desarrollo pesquero y turístico en el embalse El Peñol, Antioquia" suscrito entre Cornare y la Universidad de Antioquia [12].

Referencias

1. UNESCO. *El Control de la eutrofización en lagos y pantanos*. Madrid. UNESCO. 1992. pp. 82-118.
2. Thienemann, A. "Untersuchungen über die Beziehungen zwischen dem Sauerstoffgehalt des Wassers und der Zusammensetzung der Fauna in norddeutschen Seen". En: *Arch. Hydrobiol.* No. 12. 1918. pp. 1-65.
3. Naumann, E. "Några synpunkter angående limnoplanktons ekologi med särskild hänsyn till fytoplankton". En: *Svensk Botanisk Tidskrift*. No. 13. 1919. pp. 129-163.
4. CEPIS. *Memoria del IV encuentro del proyecto regional "Desarrollo de metodologías simplificadas para la evaluación de la eutrofización en lagos cálidos tropicales"*. CEPIS. 1990.
5. Vollenweider, R. et al. "OECD cooperative program for monitoring of inland waters (eutrophication control)". *Synthesis Report*. Paris, 1980.
6. Empresas Públicas de Medellín. *Registros climáticos años 1992 y 1993*. Medellín. Departamento de Hidrometría e instrumentación. 1993.
7. Monod, J. *La technique de culture continue: théorie et applications*. Ann. Inst. Pasteur Lille 79. 390. 1950.
8. Ramírez J. J. "Determinación de biomasa por clorofila". En: *AINSA*. Año 11. No. 1. Medellín. Enero-junio. 1989.
9. APHA, AWWA. *Standard methods for examination of water and wastes water*. Ciudad. WPCF. 1989.
10. Aguirre, Néstor. *Limnología y biodinámica del embalse El Peñol-Guatapé*. Medellín-Colombia. Tesis de

- Maestría. Departamento de Biología. Universidad de Antioquia. 1994.
11. Aguirre, Néstor *et al.* "Características limnológicas del embalse El Peñol-Guatapé". En *Colombia*. (En prensa). 2000.
 12. Cornare y Universidad de Antioquia. *Identificación de la dinámica hidrobiológica que permita planificar actividades de desarrollo pesquero y turístico en el embalse El Peñol, Antioquia*. Centro de Investigaciones Ambientales. 1993.
 13. Cuervo F., Hernán. *Método aproximado para dos observaciones divisibles en enteros igual a dos, para la determinación de la tasa de velocidad de reacción*. Universidad de Antioquia. 1986. (Sin publicar).