

CALIDAD MICROBIOLÓGICA DEL AGUA DEL LAGO DE ATITLÁN PARA LOS AÑOS 2001-2006

Edwin Castellanos & Nancy Girón

Resumen

Este artículo presenta los resultados de los análisis de calidad microbiológica del agua obtenidos en muestreos bi-anales en puntos alrededor del lago de Atitlán. Los resultados muestran el efecto de la contaminación proveniente de las aguas servidas de los poblados alrededor del lago. Los muestreos fueron realizados desde abril de 2001 hasta septiembre de 2006, dos veces al año, uno en época seca y otro en época lluviosa. Se muestrearon en total 27 puntos del lago con una combinación de puntos ubicados frente a los poblados principales, otros ubicados en orillas alejadas de poblados y cuatro puntos alrededor del centro del lago. En cada punto se tomaron muestras para medir la concentración de coliformes totales y *Escherichia coli* (*E. coli*). Los análisis muestran que el lago tiene una calidad de agua bastante buena excepto en los puntos cercanos a los poblados grandes donde la concentración por bacterias coliformes es alta. El impacto de verter directamente las aguas servidas hacia el lago es evidente en la degradación de la calidad del agua frente a los poblados principales. Esto presenta un problema de salud pública ya que esta misma agua se usa para consumo humano. Un muestreo limitado mostró que el agua no presenta toxicidad; más bien tiene un potencial eutrofizante, es decir, de estimulación al crecimiento de algas.

Abstract

This paper presents the results of the analyses of microbial quality of water samples collected bi-annually from around Lake Atitlán. The results show the effect of the pollution resulting from sewage directly poured from communities around the lake. The sampling was completed from April 2001 to September 2006, twice per year, one during dry season and one during rainy season. 27 points were sampled from a combination of points right in front of major towns, points in places away from towns and four points around the center of the lake. In each site we collected a sample to measure the concentration of total coliforms and *Escherichia coli* (*E. coli*). The analysis shows that the lake has a water of good microbiological quality except in the points close to large communities where the concentration of coliform bacteria is high. The impact of pouring raw sewage into the lake is evident from the degradation of the water quality in front of major towns. This is a public health problem as the same lake water is used for human consumption. A limited sampling indicated no toxicity coming from the water; rather, a capacity to stimulate the growth of algae was observed.

Introducción

El lago de Atitlán se ha caracterizado por ser uno de los destinos turísticos más importantes de Guatemala, no solo por su belleza escénica, sino también por su riqueza histórica y cultural. Desde épocas precolombinas las orillas del lago han estado habitadas por comunidades pertenecientes a diferentes etnias indígenas. Más recientemente, la región ha experimentado un aumento de población extranjera que ha hecho del lago y sus alrededores su nuevo hogar. En general, el crecimiento poblacional en la región ha sido muy acelerado en los últimos años. El último censo de población en el año 2002 reportó un total de 307,661 habitantes en el departamento de Sololá, prácticamente el doble de la población reportada en 1981 (1); ese mismo censo mostró que Sololá es el quinto departamento más densamente poblado del país.

Por otro lado, la población de Sololá es una de las menos desarrolladas del país en términos de ingresos (75% de pobreza), salud y educación (43% de analfabetismo) ocupando el último lugar de los departamentos del país en índice de desarrollo humano (2). La combinación de pobreza y alta densidad poblacional resulta en una elevada presión sobre los recursos naturales, que resultan ser usualmente explotados en forma no sustentable (3). La creciente presión de la población sobre sus recursos, se evidencia en el uso del agua del lago de Atitlán para diversas actividades humanas; este uso ha impactado este cuerpo de agua natural especialmente debido a que las aguas servidas son devueltas al lago en su gran mayoría prácticamente sin ser tratadas. A este problema, se suma el uso de fertilizantes químicos en la agricultura, lo cual ha enriquecido

con nutrientes las aguas del lago Atitlán. A pesar de que el lago de Atitlán posiblemente permanece como el más limpio del país, la degradación en la calidad de agua, especialmente en las bahías con poca profundidad, es evidente a simple vista debido a la proliferación de vegetación acuática. Esta contaminación acuática ha tenido ya su repercusión en el turismo de la región, especialmente porque algunas guías y sitios de turismo hacen mención que no es seguro bañarse en algunas áreas del lago.

Los monitoreos realizados en cuerpos de agua naturales deben realizarse frecuentemente por la variabilidad que muchos factores o características pueden presentar, especialmente por aspectos de temporalidad, que incluyen no solamente condiciones naturales sino también actividades

humanas. Los cambios en las características de la cuenca pueden llegar a alterar la calidad del cuerpo de agua. Visto de otra forma, la calidad de agua se presenta como un indicador resultante de los procesos que ocurren en una cuenca por lo que su monitoreo continuo podrá permitir a los entes gubernamentales y técnicos tener una mejor información sobre los resultados de intervenciones en el territorio y de cambios en actividades humanas.

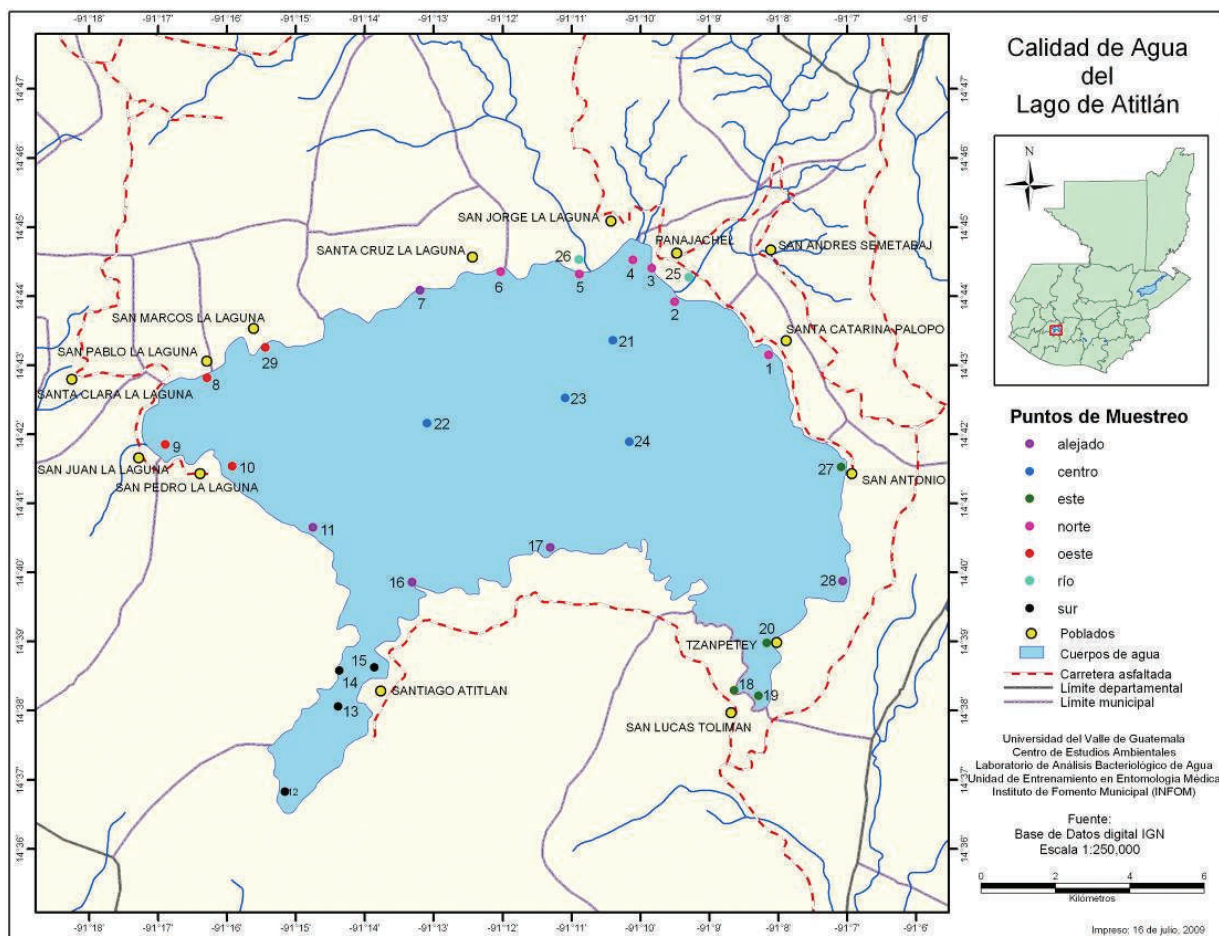
Dada su importancia en muchos aspectos de la vida de los guatemaltecos, el lago de Atitlán ha sido el enfoque de varios estudios sobre calidad de agua desde principios del siglo pasado con el estudio de Meek sobre peces (4), el de Weiss sobre calidad de agua (5) y más recientemente los estudios de investigadores de la UVG (6) y de Anne la Bastille sobre el emblemático Poc (7),

ahora extinto. A principios de esta década, el grupo internacional *The Nature Conservancy* inició una serie de iniciativas de conservación en el área bajo su proyecto Parques en Peligro que en su momento apoyó parte de los estudios sobre calidad de agua (8) reportados en este artículo.

El deterioro de la calidad de agua del lago de Atitlán volvió a ser noticia a raíz de la tormenta Stan que azotó fuertemente el occidente de Guatemala en 2005 con serias pérdidas humanas y económicas y que fue particularmente catastrófica en la cuenca de Atitlán (9). Las crecidas del río Panajachel debidas a esta tormenta, arrastraron la única planta de tratamiento que funcionaba a orillas del lago para reducir el ingreso de aguas servidas provenientes de Panajachel. Desde ese año, todas las aguas servidas de ese importante centro

turístico son vertidas directamente hacia el lago, de igual manera que ocurre en todas las otras poblaciones alrededor del lago. A pesar de que ha habido varias iniciativas para reconstruir la planta de tratamiento de aguas servidas de Panajachel, han pasado ya tres años y medio desde el siniestro y no hay señales que la obra sea iniciada en un futuro cercano.

Esperamos que este artículo demuestre la importancia no solo de reconstruir la planta de tratamiento de Panajachel, sino la importancia de construir plantas en otros centros poblados de gran tamaño y en general de tratar adecuadamente las aguas servidas de todas las poblaciones alrededor del lago de Atitlán para minimizar el ingreso de material orgánico, nutrientes y bacterias fecales a este importante cuerpo de agua del país.



► **Figura 1:**
Mapa con puntos de muestreo organizados por región de análisis.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de muestreo

El Cuadro 1 muestra las coordenadas (UTM WGS84) de los sitios de muestreo alrededor del lago que fueron utilizados en este estudio. En algunas ocasiones, debido a limitantes de tiempo o de recursos financieros, no todos los sitios listados fueron muestreados. El Cuadro 1 clasifica la región del lago en que se ubican los sitios para facilitar el análisis posterior de acuerdo a los cuatro puntos cardinales para los sitios cercanos a un poblado o de acuerdo a su localidad en el centro del lago o alejado de cualquier población humana. Cada una de las regiones tiene cuatro puntos de muestreo excepto la región alejada de poblados que tiene cinco y la región norte que tiene seis. Los sitios de muestreo también están representados en forma visual en la Figura 1 usando las coordenadas listadas en el Cuadro 1 que fueron tomadas usando un sistema GPS. Los puntos 25 y 26 son muestras tomadas 25 metros antes de la desembocadura de los ríos Panajachel y Quiscab, los afluentes principales del lago de Atitlán. Estas muestras sirvieron para completar el estudio descrito en la sección 4.4 y no fueron incluidas en el análisis estadístico de las muestras de agua del lago.

Los sitios de muestreo fueron seleccionados en base a los sitios usados por Weiss (5) que ha sido previo al presente trabajo, el estudio más completo de calidad de agua del lago en cuanto a distribución geográfica de sus puntos de muestreo. Los sitios de Weiss fueron completados con sitios adicionales para asegurar un muestreo más completo de puntos cercanos a poblaciones con puntos alejados de poblados tanto en la orilla como en el centro del lago. Se buscó con este diseño evaluar mejor el impacto de las poblaciones de las riberas en la calidad de agua del lago.

Cada uno de los sitios fue muestreado dos veces por año durante la época seca (abril) y la época lluviosa (julio a septiembre). En el año 2005 se completó un muestreo adicional en el mes de noviembre posterior al paso de la tormenta Stan en octubre para estudiar el efecto de esa tormenta sobre la calidad de agua del lago.

Análisis Microbiológicos:

En cada punto se colectaron muestras de agua a una profundidad de 1 metro. En botellas esterilizadas de 500 ml se tomaron muestras para análisis microbiológico, las cuales fueron conservadas en hielo (4°C) y transportadas al Laboratorio de Agua del Centro de Estudios en Salud de la Universidad del Valle de Guatemala. Estas muestras fueron analizadas bacteriológicamente con el método COLLERT® el cual es una modificación del método del Número Más Probable (NMP). El método se basa en la técnica de sustrato definido, que determina cuantitativamente la presencia/ausencia de las bacterias: Coliformes Totales y *E. coli* y está normado y recomendado su uso en Guatemala por la Comisión Guatemalteca de Normas COGUANOR (NGO 29018h21).

El análisis estadístico de los datos de bacterias coliformes fue realizado con el software SPSS 16.0.

Para el muestreo de la época seca del año 2001 se colectaron muestras adicionales en cuatro puntos para analizar la presencia de los parásitos *Giardia* y *Cryptosporidium*. Se seleccionaron los puntos con mayor potencial de presencia de estos parásitos: frente a las desembocaduras de los ríos

Panajachel y Quiscab (puntos 2 y 5 del Cuadro 1) y frente a los poblados de Panajachel y San Lucas (puntos 3 y 18 del Cuadro 1).

Estudio Ecotoxicológico y de Potencial Eutrofizante:

También en el muestreo de época seca de 2001 se realizó un estudio ecotoxicológico y de potencial eutrofizante en cuatro puntos de muestreo. Se utilizaron los mismos puntos 2, 5 y 18 del Cuadro 1 por considerarse áreas de alta contaminación. Como cuarto punto de muestreo, se utilizó el centro del lago (punto 23 en el Cuadro 1) como un posible control de un punto con niveles de contaminación más bajos. Para estos análisis se siguió la metodología de preparación de muestras de efluentes de los procedimientos estándar operacionales (PEOs o Standard Operational Procedures = SOPs, en inglés) de los siguientes kits ecotoxicológicos: Protokit F (10), Algaltokit F (11), Rotoxkit F acute (12) y Thamnotokit F (13). Las muestras fueron probadas sin dilución. Los organismos de agua dulce utilizados para los análisis de toxicidad y potencial eutrofizante fueron el protista *Tetrahymena thermophila* (Tt), el alga verde unicelular *Selenastrum capricornutum* (Sc), el rotífero *Brachionus calyciflorus* (Bc) y el crustáceo *Thamnocephalus platyurus* (Tp). Se siguieron las indicaciones de los kits mencionados para todas las etapas, excepto para la interpretación de resultados. No se buscó determinar dosis letales (o efectivas) medias (DL(E)50); en cambio, se utilizaron los Sistemas de Clasificación de la Contaminación y de la Eutrofización, presentados por el Programa FITA4 (14).

Estudio de Contaminación por Coliformes frente a Panajachel:

En el año 2002 se realizaron dos estudios para entender mejor el efecto de la contaminación microbiológica acarreada por el río Panajachel sobre los niveles de contaminación presentes en los puntos del lago de Atitlán frente a la población del mismo nombre. Esta región del lago es la más utilizada por turistas locales y extranjeros como área recreativa tanto para nadar en la playa pública como para paseos en lancha.

El primer estudio (marzo de 2002) examinó hasta qué distancia en el lago se observa el efecto de la contaminación por bacterias coliformes del Río Panajachel y de la llamada Toma Tzanjuyú, que originalmente fue una toma de agua utilizada para riego de los campos agrícolas asentados en lo que ahora es el área de hoteles de Panajachel. En este estudio se tomaron tres muestras frente a cada una de las fuentes mencionadas. La primera muestra fue a orillas del lago en la desembocadura de la fuente en cuestión; la segunda muestra a 100 m de la fuente en el lago y la tercera muestra a 200 m de la fuente en el lago.

En el segundo estudio (julio de 2002) se examinó la presencia de bacterias coliformes en perfiles verticales frente a las desembocaduras del río Panajachel y la Toma Tzanjuyú. Se colectaron muestras superficiales y a profundidades de 5, 10, 15 y 20 m utilizando una botella de Van Dorn de 1 litro en las coordenadas de los puntos 2 y 3 del Cuadro 1. Este muestreo se realizó varios meses después de que la Municipalidad de Panajachel instaló un tubo para hacer que el agua de la toma de Tzanjuyú no entrara en la superficie del lago sino a una profundidad de 20 metros y el objetivo fue examinar el efecto de esta medida.

Cuadro 1. Puntos de muestreo utilizados en este estudio con coordenadas WGS84.

No.	Sitio	Área	Latitud	Longitud
1	Santa Catarina	Alejado	14.7191039	-91.1355985
2	Panajachel frente al río	Norte	14.7319842	-91.1583507
3	Panajachel Tzanjuyú	Norte	14.7400902	-91.1639100
4	Bahía San Buenaventura	Norte	14.7420604	-91.1684624
5	Frente a Río Quiscab	Norte	14.7385929	-91.1814550
6	Santa Cruz	Norte	14.7391840	-91.2004035
7	Frente a Río Jaibal	Alejado	14.7347708	-91.2199315
8	San Pablo	Oeste	14.7135958	-91.2714335
9	San Juan	Oeste	14.6975287	-91.2815877
10	San Pedro	Oeste	14.6922377	-91.2653252
11	Volcán San Pedro	Alejado	14.6775126	-91.2458613
12	Final Bahía Santiago	Sur	14.6137622	-91.2526423
13	Centro Bahía Santiago	Sur	14.6342638	-91.2398008
14	Frente a Santiago	Sur	14.6430012	-91.2394526
15	Santiago	Sur	14.6437238	-91.2310462
16	La Isla	Alejado	14.6643246	-91.2219131
17	Volcán Tolimán	Alejado	14.6726611	-91.1884250
18	San Lucas Bahía Oeste	Este	14.6381926	-91.1440157
19	San Lucas Bahía Este	Este	14.6368526	-91.1380588
20	Salida Bahía San Lucas	Este	14.6496163	-91.1360853
21	Centro Norte	Centro	14.7226309	-91.1732954
22	Centro Oeste	Centro	14.7026726	-91.2182699
23	Centro	Centro	14.7087039	-91.1848597
24	Centro Este	Centro	14.6981880	-91.1693114
25	Río Panajachel	Río	14.7378338	-91.1548504
26	Río Quiscab	Río	14.7421209	-91.1815223
27	San Antonio	Alejado	14.6920897	-91.1181433
28	Finca Tzanpetey	Alejado	14.6645165	-91.1177088
29	San Marcos	Oeste	14.7217917	-91.2575417

RESULTADOS

Análisis microbiológico en puntos alrededor del lago de Atitlán.

El Cuadro 2 muestra los resultados de concentración de coliformes totales y fecales (Número Más Probable de colonias por 100 mL de muestra, NMP/100 mL) de los doce muestreos (6 años dos temporadas) realizados en los 27 puntos alrededor del lago de Atitlán. No todos los puntos fueron analizados en cada muestreo debido en ocasiones a limitaciones de fondos o de tiempo al completar el trabajo de campo. Aun así, la base de resultados es bastante robusta ya que se cuenta con un total de 324 resultados para cada uno de los parámetros de coliformes totales y *E. coli*. Las pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smirnov) mostraron que los datos no presentan una distribución normal cuando son analizados bajo cualquiera de las variables año, época seca o lluviosa o región en el lago. Se observa que tanto para coliformes totales como para *E. coli* existen valores extremos altos que hacen que la distribución presente una asimetría en esa dirección. Dada la falta de normalidad, en las figuras de barras que resumen los datos del Cuadro 2 se utilizan las medianas con sus respectivas barras de error al 95%.

Las Figuras 2 y 4 muestran las medianas de las concentraciones de coliformes totales y *E. coli* respectivamente calculadas sobre la localidad de muestreo y la época del año. Las Figuras 3 y 5 muestran las medianas de las concentraciones de coliformes totales y *E. coli* respectivamente calculadas sobre el año y la época de muestreo y se incluye también como comparación la barra correspondiente a la mediana de los datos del muestreo realizado un mes después del paso de la tormenta Stan.

Se realizó una transformación usando logaritmo natural para las concentraciones de coliformes totales para lograr una distribución normal. No fue posible normalizar los datos de *E. coli* con esta transformación. Con los datos de coliformes ya normalizados se corrió un análisis de varianza utilizando un diseño factorial completo usando como factores el año, la época y la región de muestreo. El modelo mostró que los tres factores y sus interacciones son altamente significativos (99.9%). La prueba de Tukey para comparar todas las medias mostró los siguientes resultados. Para el factor año, las medias presentan tres grupos homogéneos, ordenando las medias de menor a mayor: grupo 1 años 01, 04 y 03; grupo 2 años 06 y 02 y grupo 3 año 05. Para el factor región también se pueden hacer tres grupos homogéneos de menor a mayor: grupo 1 región central; grupo 2 regiones alejada y oeste; grupo 3 regiones norte,

Cuadro 2a. Resultados del análisis de concentración de coliformes totales y *E. coli* (NMP/100 mL) para el lago de Atitlán.

No.	Área	Abril 2001 Época Seca		Septiembre 2001 Época Lluviosa		Abril 2002 Época Seca		Julio 2002 Época Lluviosa		Abril 2003 Época Seca		Agosto 2003 Época Lluviosa	
		CT	EC	CT	EC	CT	EC	CT	EC	CT	EC	CT	EC
1	N	51	3	42	2	ND	ND	980	51	22	2	19	0
2	N	39	0	733	110	ND	ND	7701	1414	20	10	370	0
3	N	1300	70	388	10	ND	ND	6131	6	5170	823	2000	17
4	N	172	12	613	25	488	30	1450	488	31	2	460	5
5	N	548	11	66	3	30	0	308	10	24	0	400	1
6	N	30	0	14	3	19	0	47	0	ND	ND	130	0
7	A	61	2	15	0	365	0	115	0	ND	ND	200	0
8	O	121	13	150	19	80	1	2000	43	24	1	4100	4.1
9	O	33	0	20	1	10	0	2000	4	31	1	370	1
10	O	55	0	249	0	30	0	2000	5	51	1	870	0
11	A	56	1	72	1	345	0	365	0	86	3	410	0
12	S	387	0	770	6	866	1	105	0	1980	1	7300	0
13	S	152	9	579	5	1730	2	2000	0	112	1	3400	1
14	S	89	1	313	3	816	2	2000	1	74	4	1700	0
15	S	248	34	365	22	649	10	2000	0	214	47	4900	5.2
16	A	66	2	20	1	101	0	579	0	21	1	1600	0
17	A	108	0	435	2	34	0	345	0	0	0	300	3.1
18	E	649	48	ND	ND	2420	1120	285	0	990	105	2400	22
19	E	199	4	387	3	548	6	105	0	119	3	730	2
20	E	10	0	99	1	115	0	461	0	17	0	520	0
21	C	3	0	10	1	12	0	2000	1	27	3	170	6.3
22	C	4	0	14	0	60	0	345	1	3	0	ND	ND
23	C	6	0	4	0	ND	0	579	0	1	0	11	0
24	C	4	0	2	0	6	0	326	0	2	0	28	0
27	E	ND	ND	299	22	517	42	69	7	34	0	300	1
28	A	ND	ND	21	0	66	0	35	0	19	0	70	0
29	O	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

El No. de muestra es mismo indicado en el Cuadro 1. Área: N=Norte A=Alejado O=Oeste S=Sur E=Este C=Centro CT = Coliformes totales; EC = *E. coli*; ND = No Determinado

Cuadro 2b. Resultados del análisis de concentración de coliformes totales y *E. coli* (NMP/100 mL) para el lago de Atitlán.

No.	Área	Abril 2004 Época Seca		Julio 2004 Época Lluviosa		Abril 2005 Época Seca		Agosto 2005 Época Lluviosa		Abril 2006 Época Seca		Septiembre 2006 Época Lluviosa	
		CT	EC	CT	EC	CT	EC	CT	EC	CT	EC	CT	EC
1	N	100	15	102	0	1553	29	816	1	980	17	1300	127
2	N	100	0	276	30	2010	100	8164	52	2909	579	281	31
3	N	20	2	1120	34	9804	137	11199	23	548	89	8664	219
4	N	10	0	488	34	5794	126	14136	12	192	11	816	135
5	N	18	0	178	20	3873	26	6867	25	63	63	504	5
6	N	23	0	101	5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
7	A	38	0	44	0	ND	ND	1203	1	35	0	46	1
8	O	73	0	153	15	2382	15	3448	4	ND	ND	ND	ND
9	O	6	0	142	5	1203	7	ND	ND	ND	ND	ND	ND
10	O	6	0	308	0	1300	7	602	1	82	10	770	29
11	A	230	0	10	0	1046	2	461	0	52	0	20	0
12	S	1000	0	166	1	ND	ND	ND	ND	866	0	556	9
13	S	1230	0	122	1	7270	11	8164	3	186	3	187	9
14	S	1900	0	4884	80	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
15	S	130	2	99	2	4611	32	1986	2	461	35	63	0
16	A	80	0	58	0	816	0	613	0	166	1	25	0
17	A	79	0	0	0	1733	91	1733	0	2	0	222	3
18	E	480	20	111	3	14100	96	756	119	4611	1414	663	110
19	E	240	0	613	34	ND	ND	ND	ND	770	44	ND	ND
20	E	50	0	22	0	2755	0	649	0	80	0	291	0
21	C	16	0	84	3	ND	ND	2430	3	ND	ND	179	20
22	C	ND	ND	55	0	921	1	2420	0	ND	ND	63	9
23	C	35	0	76	0	1120	0	2430	1	ND	ND	68	4
24	C	31	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
27	E	1800	380	1553	126	2430	56	980	5	2420	727	627	51
28	A	31	0	16	0	2419	0	727	0	29	0	105	0
29	O	130	0	91	0	ND	ND	ND	ND	106	0	130	9

El No. de muestra es mismo indicado en el Cuadro 1. Área: N=Norte A=Alejado O=Oeste S=Sur E=Este C=Centro CT = Coliformes totales; EC = *E. coli*; ND = No Determinado

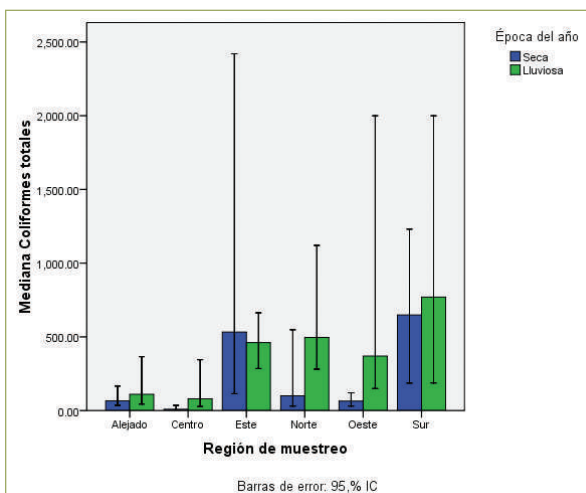


Figura 2: Medianas de las concentraciones de coliformes totales (NMP/100 mL) calculadas por región y por época de muestreo.

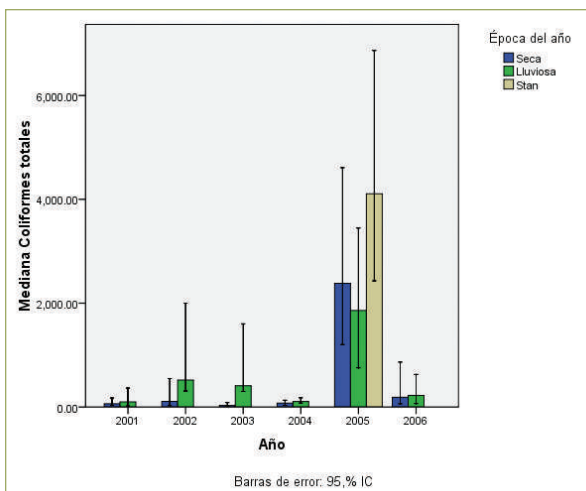


Figura 3: Medianas de las concentraciones de coliformes totales (NMP/100 mL) calculadas por año y por época de muestreo. Se incluye la media de las muestras tomadas un mes después del paso de la tormenta Stan.

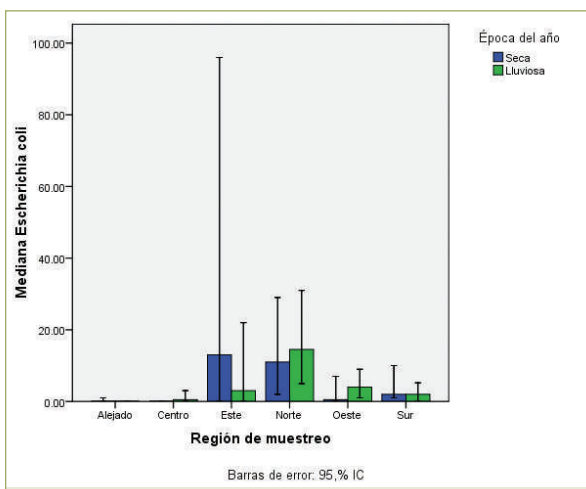


Figura 4: Medianas de las concentraciones de *E. coli* (NMP/100 mL) calculadas por región y por época de muestreo.

este y sur. Finalmente, para el factor época, la media de las muestras de época lluviosa es significativamente más alta que la media de las muestras de época seca. Adicionalmente, la media de los datos del muestreo post-Stan son significativamente más altos.

Para la variable de respuesta *E. coli*, los intervalos de confianza al 95% de las medianas usando la variable región indican que las medianas de las regiones este y norte son significativamente mayores del resto de las medianas.

El Cuadro 3 muestra los resultados del análisis de los parásitos *Giardia* y *Cryptosporidium* realizado en cuatro puntos en el muestreo de la época seca de 2001. Solamente la muestra en la bahía de San Lucas estuvo libre de estos parásitos. Llama la atención este resultado ya que esta bahía frecuentemente mostró las concentraciones de bacterias coliformes más altas.

Estudio Ecotoxicológico y de Potencial Eutrofizante:

El Cuadro 4 muestra los resultados del análisis ecotoxicológico y de potencial eutrofizante realizado en cuatro puntos en el muestreo de la época seca de 2001. El potencial toxicológico de la muestra se mide como el porcentaje de inhibición del desarrollo o de mortandad en los organismos de prueba. El porcentaje negativo de inhibición indica que el efecto fue el opuesto: el de promover el crecimiento del organismo. El efecto de promover el crecimiento de algas verdes es el que determina el potencial eutrofizante de las muestras que es sustancial cuando pasa del 50%.

La única muestra con un efecto de inhibición sobre el organismo protista fue la tomada frente al Río Quiscab, aunque el valor está justo por debajo del 20% de inhibición que es el límite para considerar la muestra "levemente tóxica" (10). La muestra frente a la desembocadura del río Panajachel causó una mortandad del 3% en los crustáceos, pero este valor es muy bajo para considerarlo significativo (13). En resumen, ninguna de las cuatro muestras mostró un nivel de toxicidad detectable. Por el contrario, todas las muestras promovieron el crecimiento de algas verdes lo que muestra el potencial eutrofizante de las aguas del lago.

Estudio de Contaminación por Coliformes frente a Panajachel:

El Cuadro 5 presenta los resultados de las muestras tomadas en dos transectos frente a las desembocaduras del río Panajachel y la toma Tzanjuyú. En la desembocadura de ambas fuentes la concentración de bacterias coliformes es muy alta, de un millón o más de colonias. Esta concentración decae rápidamente a la mitad a sólo 100 m de la orilla y a 200 m de la orilla los valores son más característicos de un cuerpo de agua natural no contaminado.

El Cuadro 6 presenta los perfiles verticales tomados frente a estas mismas desembocaduras. En el perfil frente al río Panajachel las concentraciones decaen rápidamente al sumergirse a 5 m de profundidad pero en el punto frente al embarcadero Tzanjuyú donde se instaló un tubo para sumergir las aguas servidas, se observa el efecto de esa acción al encontrar la cantidad más alta de bacterias a una profundidad de 10 m y todavía presentar cantidades significativas de bacterias hasta los 20 m.

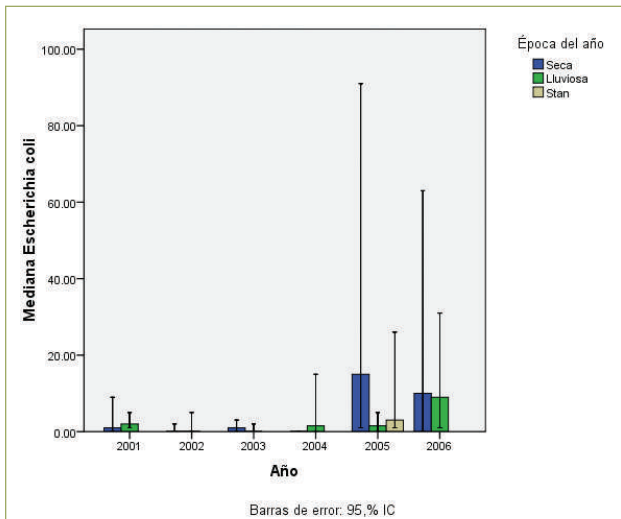


Figura 5: Medianas de las concentraciones de *E. coli* (NMP/100 mL) calculadas por año y por época de muestreo. Se incluye la media de las muestras tomadas un mes después del paso de la tormenta Stan.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los análisis estadísticos de los datos de bacterias coliformes y *E. coli* del Cuadro 2 muestran claramente el efecto puntual de la contaminación por verter directamente al lago las aguas servidas de las comunidades a su alrededor. Para coliformes totales las medias de las regiones norte, este y sur fueron significativamente más altas. Estas regiones reciben los desechos de Panajachel y Sololá (a través del río Quiscab) en el norte, San Lucas en el este y Santiago en el sur. Para *E. coli*, las medianas de las regiones este y norte también son significativamente más altas. La contaminación por *E. coli* se deriva directamente del contacto con heces fecales de humanos y otros animales de sangre caliente. Las coliformes totales incluyen a la *E. coli* y a otras coliformes que pueden provenir del suelo acarreado hacia las aguas. Esta diferencia en el origen puede explicar el por qué las coliformes totales suben durante la época lluviosa cuando se acarrean más sedimentos al lago, efecto evidenciado dramáticamente en las muestras post-Stan. Por otro lado, la *E. coli* no varía significativamente con la lluvia ya que la cantidad de humanos y animales alrededor del lago no varía fuertemente entre una época y otra.

En contraposición a los altos niveles de bacterias en los puntos cercanos a poblados, se observa que la media de coliformes totales de la región central fue significativamente más baja que el resto de las medias. Esto concuerda con los resultados del Cuadro 5 que muestran que las concentraciones de bacterias decaen muy rápidamente al alejarse de la orilla. Esto es el resultado de varios factores, como el efecto de dilución que es muy alto en el lago debido a su profundidad (más de 300 m en el centro), el efecto esterilizante de la luz solar UV que penetra las aguas superficiales, y finalmente el efecto de la baja temperatura del agua. La Figura 4 muestra que los puntos alejados de poblados y los puntos en el centro del lago no tienen presencia de *E. coli*, lo que refuerza la conclusión de que son los poblados la principal fuente de contaminación; también se concluye que en puntos alejados de poblados, el agua del lago está muy limpia bacteriológicamente hablando, incluso a nivel de considerarse potable.

Los resultados del Cuadro 3 son preocupantes ya que se comprueba que al tener contaminación por heces fecales, el mayor problema no necesariamente es la *E. coli*, que puede no tener efectos diarreicos en los usuarios del lago, especialmente los locales. La contaminación por heces fecales puede causar la presencia de parásitos que si están asociados directamente con enfermedades diarreicas como la *Giardia* y *Cryptosporidium*. Estos resultados confirman el hecho de que el agua del lago no debe ser consumida sin un tratamiento previo adecuado que incluya como mínimo aplicación de cloro u otro desinfectante.

La solución al problema de contaminación por aguas residuales debe ser más permanente que la simple acción de entubar el agua servida para depositarla en aguas más profundas. Como lo muestran los datos del Cuadro 6, esta medida si funciona para reducir la concentración de bacterias fecales en la superficie, pero la medida debe verse sólo como temporal ya que en efecto lo que se está haciendo es mover la contaminación de un punto a otro. La solución para los problemas de tratamiento de aguas residuales de los poblados alrededor del lago debe ser una combinación de plantas de tratamiento para poblados más grandes que pueden beneficiarse de un sistema de alcantarillado central y de letrinas y fosas sépticas para poblados más pequeños a los que les es más difícil costear un sistema de tratamiento centralizado.

Cuadro 3. Resultados del análisis de la concentración de parásitos *Giardia* y *Cryptosporidium* en número de quistes por litro en muestras colectadas en abril de 2001.

No.	Sitio	Área	<i>Giardia</i>	<i>Cryptosporidium</i>
2	Panajachel frente al río	Norte	21	5
3	Panajachel Tzanjuyú	Norte	5	21
5	Frente a Río Quiscab	Norte	41	11
18	San Lucas Bahía Oeste	Este	0	0

Cuadro 4. Resultados del Análisis Ecotoxicológico y de Potencial Eutrofizante en muestras colectadas en abril de 2001.

No.	Sitio	% Inhibición		% Mortalidad		Potencial de Eutrofización
		Protista Tt	Alga Verde Sc	Rotífero Bc	Crustáceo Tp	
2	Panajachel frente al río	-25	-57	0	3	Sustancial (clase III)
5	Frente a Río Quiscab	19	-83	0	0	Sustancial (clase III)
18	San Lucas Bahía Oeste	-13	-47	0	0	Leve (clase II)
23	Centro del lago	-19	-57	0	0	Sustancial (clase III)

Tt = *Tetrahymena thermophila*; Sc = *Selenastrum capricornutum*; Bc = *Brachionus calyciflorus*; Tp = *Thamnocephalus platyurus*.

Cuadro 5. Concentración de coliformes totales y *E. coli* (NMP/100ml) en dos transectos frente a la playa de Panajachel.

Localización	Río Panajachel		Toma Tzanjuyú	
	Colif. totales	<i>E. coli</i>	Colif. totales	<i>E. coli</i>
Desembocadura	2×10^6	7×10^5	$> 2 \times 10^6$	$> 2 \times 10^6$
A 100 m de la orilla	1×10^4	2×10^3	2×10^3	900
A 200 m de la orilla	800	17	750	40

Cuadro 6. Concentración de coliformes totales y *E. coli* (NMP/100 mL) en perfiles verticales en los puntos de muestreo 2 y 3 frente a Panajachel.

Profundidad	Panajachel frente a río		Panajachel Tzanjuyú	
	Coliformes totales	<i>E. coli</i>	Coliformes totales	<i>E. coli</i>
superficie	7,701	1,414	6,131	6
5 m	214	26	1,733	272
10 m	387	34	8,164	3,255
15 m	649	91	5,475	2,419
20 m	613	70	2,187	980

Los resultados del Cuadro 4 indican que la contaminación del agua en Atitlán no es de naturaleza tóxica, sino más bien de potencial fertilizante que promueve el crecimiento de algas. No existen grandes industrias en la cuenca del lago que puedan verter compuestos tóxicos. Más bien la contaminación proviene de aguas residuales que presentan un riesgo bacteriológico para los humanos pero que proveen de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, que ayudan al crecimiento de algas y otras plantas mayores. Evidencia clara de esto se dio a finales de 2008 cuando se tuvo un crecimiento inusual de algas azul verdosas.

Posiblemente la voluntad política de mejorar la situación de Atitlán no se mueva como resultado de la excesiva presencia de bacterias fecales que no son visibles al ojo humano, pero si se mueva por las algas verdosas que dan la alarma visual que es cuestión de tiempo antes de que la contaminación que ahora se observa en puntos localizados se extienda a todo el lago y sea muy tarde para rescatar esta joya natural que es parte del patrimonio de los guatemaltecos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de las siguientes instituciones para completar el trabajo de campo: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno AMSCLAE, Asociación Vivamos Mejor y Asociación Amigos del Lago. Esta investigación contó con el apoyo financiero del Proyecto Volcanes de Atitlán que fue parte del acuerdo cooperativo USAID-TNC #EDG-A-00-01-00023-00 y de la Embajada de Holanda a través del Fondo de Inversión Ambiental manejado por CIPREDA, convenio FIA-04-2005. Se agradece el apoyo de Maricruz Álvarez y Beatriz López del Laboratorio de Análisis Bacteriológico de Agua de la UVG por el análisis microbiológico; Pablo Mayorga de SEPRa realizó el análisis ecotoxicológico y de eutrofización. Mercedes España apoyó en el estudio de la cuenca del Río Panajachel. Finalmente, se agradece el apoyo de Lucía Corral, Ana Lucía Solano y Gabriela Alfaro en el procesamiento y análisis estadístico de los datos.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Instituto Nacional de Estadística INE. 2002. XI Censo de Población y VI de habitación.
- 2) Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD Guatemala. 2008. Informe Nacional de Desarrollo Humano 2007/2008. Volumen II.
- 3) Dix, M., I. Fortín, O. Medinilla y L. Ríos. Diagnóstico Ecológico-Social en la Cuenca de Atitlán. Universidad del Valle de Guatemala/The Nature Conservancy, Guatemala.
- 4) Meek, S. E. 1908. The zoology of Lakes Amatitlán and Atitlán, Guatemala, with special reference to ichthyology. Field Columbian museum, Publ. 127; Zool. Ser. 7 (6): 159-206.
- 5) Weiss, C. 1971. Lake Atitlán, Guatemala 1968-1970. Water Quality Investigations. Instituto Geográfico Nacional de Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, University of North Carolina, Estados Unidos.
- 6) Castillo, J., M. Dix, M. Montufar, G. Huertas, E. Pérez, P. Colon y S. Masselli. 1986. Análisis comparativo de las características físicas, químicas y biológicas del Lago de Atitlán en los años de 1968-69, 1976 y 1983. Reporte Científico, Universidad del Valle de Guatemala, Departamento de Biología.
- 7) Bastille, A. 1988. Salvemos Atitlán. En Memoria del Banco Industrial, Guatemala.
- 8) Girón, N. 2004. Calidad de agua del lago de Atitlán, 2004. Reporte del proyecto Parques en Peligro, Volcanes de Atitlán. The Nature Conservancy. 34 pp.
- 9) Guerra, A. 2006. El Huracán Stan en la cuenca del lago de Atitlán, Guatemala: un estudio en Ecología Política. Tesis de Maestría en Ciencia Política y Manejo de Agua. Oxford University, Inglaterra. 64 pp.
- 10) Protokit F™. 1998. Freshwater toxicity test with a ciliate protozoan. Standard Operational Procedure. Cresel, Deinze, Bélgica. 18 pp.
- 11) Algaltokit F™. 1996. Freshwater toxicity test with microalgae. Standard Operational Procedure. Cresel, Deinze, Bélgica. 28 pp.
- 12) Rotokit F™. 1992. Rotifer toxicity screening test for freshwater. Standard Operational Procedure. Cresel, Deinze, Bélgica. 22 pp.
- 13) Thamnotokit F™. 1995. Crustacean toxicity screening test for freshwater. Standard Operational Procedure. Cresel, Deinze, Bélgica. 23 pp.
- 14) FITA4 Programme. 2000. Sustainable development, water quality and human health. International Workshop, Budapest, Hungría, 7-8 Diciembre 2000.



Edwin Castellanos & Nancy Girón

Centro de Estudios Ambientales, Instituto de
Investigaciones, Universidad del Valle de
Guatemala
ecastell@uvg.edu.gt