

UNIVERSIDAD DE PANAMÁ  
VICERRECTORIA DE INVESTIGACION Y POSTGRADO  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y TECNOLOGIA



PROGRAMA DE MAESTRÍA EN MICROBIOLOGIA AMBIENTAL

FACTORES AMBIENTALES QUE INFLUYEN EN LA PRESENCIA DE  
MICROCISTINAS EN AGUAS DE LA CUENCA DEL CANAL DE PANAMA

MARISELA DEL CARMEN CASTILLO GÓMEZ

TESIS PRESENTADA COMO UNO DE LOS REQUISITOS PARA OPTAR AL  
GRADO DE MAESTRA EN MICROBIOLOGIA AMBIENTAL

PANAMA, REPUBLICA DE PANAMA  
2015

UNIVERSIDAD DE PANAMA  
VICERRECTORIA DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y TECNOLOGIA

PROGRAMA DE MAESTRIA EN MICROBIOLOGIA AMBIENTAL

FACTORES AMBIENTALES QUE INFLUYEN EN LA PRESENCIA DE  
MICROCISTINAS EN AGUAS DE LA CUENCA DEL CANAL DE PANAMA

MARISELA DEL CARMEN CASTILLO GÓMEZ

PANAMA, REPUBLICA DE PANAMA  
2015

57

23 MAR 2016



Título de la Tesis **"Factores Ambientales que influyen en la presencia de Microcistinas en Aguas de la Cuenca del Canal de Panamá"**

TESIS

Sometida para optar al título de Maestría en Microbiología Ambiental

Vicerrectoría de Investigación y Postgrado  
Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología

APROBADO POR

*Margarita X6 Cornejo M*

**Magister Margarita Cornejo  
Presidente**

*Yolanda*

*Yolanda Aguila S*

**Doctora Yolanda Aguila  
Miembro**

*Alex Omar Martínez*

**Profesor Alex Omar Martínez  
Miembro**

REFRENDADO POR:

*Hilva Jacin de Javida*

**REPRESENTANTE DE LA VICERRECTORÍA  
DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO**

FECHA:

*Diciembre 14 de 2015*

## AGRADECIMIENTO

*Deseo que estas líneas sirvan para expresar mi mas profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial a la Dra Marilyn Diéguez Pinto, supervisora de la Unidad de Calidad de Agua, Division de Agua, Departamento de Ambiente, Agua y Energia del Canal de Panamá, por confiar en mi y haberme permitido realizar este trabajo, contando siempre, con su apoyo incondicional en todos los aspectos académico, profesional y personal*

*Agradezco con mucho cariño a mi asesora de tesis Profesora Margarita Cornejo, por todo su apoyo, confianza, amistad y seguimiento durante la tesis Además, a la profesora Carmen Vergara, por ese compartir de conocimientos sobre las “algas verde-azules” Al profesor Gonzalo Carrasco, por su incondicional apoyo en la parte estadística, al Dr Alex Martinez Torres y al Profesor y compañero Jose Correa, quienes me brindaron respuestas a inquietudes en aspectos de biología molecular*

*Deseo agradecer a los investigadores Dr Wayne Carmichael profesor emeritus del Departamento de ciencias biologicas de la Universidad de Wright State, al Dr Luis C Mejia del Smithsonian Tropical Research y a al Dr Jason Woodhouse del Centre for Cyanobacteria and Astrobiology de la University of New South Wales, por atender mis dudas e inquietudes y hacerme recomendaciones vía electronica sobre diversos temas que surgieron durante el desarrollo de mi trabajo Infinitamente gracias*

## DEDICATORIA

*Para todos aquellos que, simplemente, estan motivados en conocer sobre las cianobacterias y su toxicidad*

*A mis abuelos (que en paz descansan), a mi madre Aura E Gómez Castillo, a mi hijo Abel Adrián, a mis profesores, familiares, amigos, compañeros de trabajo, y a todos aquellos que han aportado a mi crecimiento personal y profesional, con todo mi cariño, es para ustedes*

*Quisiera hacer extensiva mi gratitud a mis compañeros de trabajo (EAA-CA), estudiantes de practica profesional de diferentes carreras biotecnología, biología, microbiología, ingeniería ambiental, química, ingeniería de alimentos, biomédica, estudiantes graduandos de secundaria, etc , quienes me apoyaron en cada una de las fases de este trabajo muestreo, análisis físico-químicos, entre otras tareas*

*Un agradecimiento muy especial a todos mis familiares y amigos que confiaron en mí y que tuvieron siempre una voz de aliento y fortaleza para mí ante las dificultades encontradas, a todos ustedes Muchas gracias*

# ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCION</b>	<b>2</b>
<b>1 OBJETIVOS</b>	<b>5</b>
1 1 OBJETIVO GENERAL	5
1 2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
<b>2 HIPÓTESIS DE TRABAJO</b>	<b>6</b>
<b>3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b>	
3 1 GENERALIDADES DE LAS CIANOBACTERIAS	7
3 2 EUTROFIZACIÓN CULTURAL Y CIANOBACTERIAS	8
3 3 PRIMEROS REGISTROS DE CIANOBACTERIAS	8
3 4 CONTEXTO MUNDIAL, REGISTROS DE CIANOBACTERIAS	9
3 4 1 <i>Brasil</i>	9
3 4 2 <i>Estados Unidos y Canadá</i>	11
3 4 3 <i>México</i>	15
3 4 4 <i>Guatemala</i>	16
3 4 5 <i>Uruguay</i>	17
3 4 6 <i>Argentina</i>	17
3 4 7 <i>China</i>	18
3 4 8 <i>España</i>	19
3 4 9 <i>Otros países</i>	20
3 5 REGISTROS DE CIANOBACTERIAS EN PANAMÁ	21
3 5 1 <i>Ostenfeld y Nygaard, 1925</i>	21
3 5 2 <i>Prescott, 1936</i>	21
3 5 3 <i>Drouet, 1937</i>	21
3 5 4 <i>Prescott, 1951</i>	22
3 5 5 <i>Diciembre, 1992</i>	23
3 5 6 <i>Registros fotográficos, Gamboa 1998-2000</i>	24
3 5 7 <i>Estudios de Abundancia y caracterización cualitativa de las microalgas observadas en seis estaciones del embalse Gatun, como parte del proyecto Profundización del cauce de navegación del canal, 2002-2004</i>	26
3 5 8 <i>Registros de algas y cianobacterias realizados por el Canal de Panamá, Unidad de Calidad de Agua</i>	30
3 6 FACTORES AMBIENTALES QUE INFLUYEN EN LA PRESENCIA DE CIANOBACTERIAS	37
3 6 1 <i>Oxígeno disuelto</i>	38
3 6 2 <i>Transparencia</i>	38
3 6 3 <i>Radiación solar</i>	39
3 6 4 <i>Turbiedad</i>	40
3 6 5 <i>pH</i>	41
3 6 6 <i>Nutrientes</i>	42
3 6 7 <i>Clorofila a</i>	44
3 6 8 <i>Temperatura</i>	45
3 7 MICROCISTINAS	46
3 8 VALORES GUÍA DE TOXINAS DE CIANOBACTERIAS (MICROCISTINAS EN AGUA POTABLE Y NATURAL), SEGUN LA ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS) Y OTROS PAÍSES	49
3 9 NORMAS DE CALIDAD AMBIENTAL PARA AGUAS NATURALES Y CALIDAD DEL AGUA POTABLE DE LA REPUBLICA DE PANAMÁ	51

<b>4</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>56</b>
4 1	ÁREA DE ESTUDIO	56
4 1 1	<i>Embalse Gatun</i>	56
4 2	SITIOS DE MUESTREO	58
4 2 1	<i>Toma de agua de Paraiso</i>	58
4 2 2	<i>Toma de agua de Gamboa</i>	59
4 3	TÉCNICAS DE MUESTREO Y PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS	60
4 3 1	<i>Muestreo</i>	60
4 3 2	<i>Procedimiento de análisis físico-químicos</i>	61
4 3 3	<i>Análisis de microcistinas</i>	63
4 3 4	<i>Análisis estadístico</i>	65
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>68</b>
5 1	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS EN LOS SITIOS DE ESTUDIO	68
5 2	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS POR SITIO DE ESTUDIO	69
5 3	DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE MICROCISTINAS EN LOS SITIOS DE ESTUDIO	70
5 4	APLICACIÓN DE MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL MULTIPLE	72
5 4 1	<i>Modelo general</i>	72
5 4 2	<i>Modelo para Gamboa</i>	75
5 4 3	<i>Modelo para Paraiso</i>	79
5 4 4	<i>Modelo para la estación seca</i>	82
5 4 5	<i>Modelo para la estación lluviosa</i>	86
5 5	REGISTROS DE MICROCISTINAS DETECTADAS EN GAMBOA DURANTE 2009	89
5 5 1	<i>Alta concentración de clorofila a, 24 de agosto de 2009</i>	90
5 6	PRINCIPALES GÉNEROS Y ESPECIES DE CIANOBACTERIAS EN LA TOMA DE AGUA CRUDA DE GAMBOA DURANTE EL 2009	92
5 7	PRINCIPALES GÉNEROS Y ESPECIES DE CIANOBACTERIAS EN LA TOMA DE AGUA CRUDA DE PARÁISO DURANTE EL 2009	93
5 8	REVISIÓN DE REGISTROS TAXONÓMICOS DE ALGAS Y CIANOBACTERIAS PARA AGOSTO, SEPTIEMBRE Y DICIEMBRE DE 2009	94
5 8 1	<i>Agosto de 2009</i>	94
5 8 2	<i>Septiembre de 2009</i>	95
5 8 3	<i>Diciembre de 2009</i>	96
<b>6</b>	<b>DISCUSIÓN</b>	<b>98</b>
6 1	ANÁLISIS GENERAL DE LAS VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS EN LOS SITIOS DE ESTUDIO	98
6 2	FACTORES AMBIENTALES QUE INFLUYEN EN LA PRESENCIA DE MICROCISTINAS EN LOS SITIOS DE MUESTREO DEL EMBALSE GATUN 2009	102
6 3	ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL MULTIPLE, EMBALSE DE GATUN, 2009	103
6 3 1	<i>Modelo General</i>	103
6 3 2	<i>Modelo para Gamboa</i>	104
6 3 3	<i>Modelo para Paraiso</i>	104
6 3 4	<i>Modelo para la estación seca</i>	105
6 3 5	<i>Modelo para la estación lluviosa</i>	107
6 4	RESUMEN Y COMPARACIÓN ENTRE LOS MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL MULTIPLE	108
6 5	EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL MULTIPLE	109
6 6	COMENTARIOS GENERALES DE LOS RESULTADOS ENCONTRADOS	110
6 7	ANÁLISIS DE LOS REGISTROS DE MICROCISTINAS DETECTADAS EN GAMBOA DURANTE 2009	113
6 8	ANÁLISIS DE LOS REGISTROS TAXONÓMICOS DE ALGAS Y CIANOBACTERIAS DURANTE EL 2009	114
6 8 1	<i>Análisis de los principales géneros y especies de cianobacterias en la toma de agua de Gamboa durante el 2009</i>	114

6 8 2	<i>Análisis de los principales géneros y especies de cianobacterias en la toma de agua de Paraiso</i>	115
6 9	<b>ANÁLISIS DE LOS REGISTROS TAXONÓMICOS DE ALGAS Y CIANOBACTERIAS PARA AGOSTO, SEPTIEMBRE Y DICIEMBRE DE 2009</b>	115
6 9 1	<i>Agosto de 2009</i>	115
6 9 2	<i>Septiembre de 2009</i>	116
6 9 3	<i>Diciembre de 2009</i>	116
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>118</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>122</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>124</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>133</b>
I	<b>SUPUESTOS DEL MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE PARA EL MODELO GENERAL</b>	<b>133</b>
II	<b>SUPUESTOS DEL MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE PARA EL MODELO DE GAMBOA</b>	<b>136</b>
III	<b>SUPUESTOS DEL MODELO DE REGRESIÓN MULTIPLE PARA EL MODELO DE PARAÍSO</b>	<b>139</b>
IV	<b>SUPUESTOS DEL MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE PARA EL MODELO DE LA ESTACIÓN SECA</b>	<b>142</b>
V	<b>SUPUESTOS DEL MODELO DE REGRESIÓN MULTIPLE PARA EL MODELO DE LA ESTACIÓN LLUVIOSA</b>	<b>145</b>
VI	<b>FOTOGRAFÍAS</b>	<b>148</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Ejemplo de intoxicaciones en humanos debido a la cianotoxinas microcistinas, tomados de Chorus y Bartram, 1999 Se destacan los casos registrados en Brasil	10
Cuadro 2 Intoxicaciones agudas en humanos por cianobacterias en Estados Unidos y Canadá	11
Cuadro 3 Estudio cronológico de artículos publicados sobre brotes de cianobacterias en los Estados Unidos 1883-2003 (US Environmental Protection Agency, 2007)	12
Cuadro 4 Porcentaje de toxicidad por afloramientos de cianobacterias en diferentes países	20
Cuadro 5 Cianobacterias reportadas para el embalse Gatun y Miraflores por diversos autores Fuente Informe de Colecta y Análisis de muestras biológicas de los lagos Gatun y Miraflores N°1 Fitoplancton, 2004	30
Cuadro 6 Principales géneros y especies de cianobacterias presentes en la toma de agua Cuadro 6 Principales géneros y especies de cianobacterias en la toma de agua de Gamboa y Paraíso	31
Cuadro 7 Cianobacterias presentes en la toma de agua de Paraíso, junio 2006	32
Cuadro 8 Países que han utilizado como referencia el valor básico de la OMS para microcistinas en el agua potable Fuente Curso de entrenamiento afloramiento de algas tóxicas Manejo, métodos de calidad de agua y salud ambiental y humana, noviembre 2011 Autoridad del Canal de Panamá-Universidad de Panamá, Panamá	50
Cuadro 9 Detalles relevantes de la Cuenca Hidrográfica	56
Cuadro 10 Métodos analíticos empleados según parámetros de calidad de agua	62
Cuadro 11 Variable independiente y dependiente utilizada para los modelos de regresión lineal múltiple	66
Cuadro 12 Estadísticos descriptivos para el modelo general	72
Cuadro 13 Matriz de correlación de las variables independientes con la microcistina en el modelo general	73
Cuadro 14 Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo general incluyendo todas las variables	73
Cuadro 15 Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo general incluyendo sólo a las variables significativas	74
Cuadro 16 Estadísticos de la regresión para el modelo general	75
Cuadro 17 Análisis de varianza para el modelo general	75
Cuadro 18 Estadísticos descriptivos para el modelo de Gamboa	76
Cuadro 19 Matriz de correlación de las variables independientes con la microcistina en el modelo para Gamboa	76
Cuadro 20 Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo de Gamboa incluyendo todas las variables	77
Cuadro 21 Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo de Gamboa incluyendo sólo a las variables significativas	77
Cuadro 22 Estadísticos de la regresión para el modelo de Gamboa	78
Cuadro 23 Análisis de varianza para el modelo de Gamboa	78
Cuadro 24 Estadísticos descriptivos para el modelo de Paraíso	79
Cuadro 25 Matriz de correlaciones entre las variables independientes y la microcistina en el modelo para Paraíso	80
Cuadro 26 Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo de Paraíso incluyendo todas las variables	80
Cuadro 27 Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo en Paraíso incluyendo sólo a las variables significativas	81
Cuadro 28 Análisis de varianza para el modelo en Paraíso	82
Cuadro 29 Estadísticos descriptivos del modelo para la estación seca	83
Cuadro 30 Matriz de correlaciones entre las variables independientes y la microcistina en el modelo de la estación seca	83
Cuadro 31 Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo de la estación seca incluyendo todas las variables	84
Cuadro 32 Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo de la estación seca incluyendo todas las variables	84
Cuadro 33 Estadísticos de la regresión para el modelo en la estación seca	85

Cuadro 34. Análisis de varianza para el modelo en la estación seca.....	86
Cuadro 35. Estadísticos descriptivos para el modelo de la estación lluviosa.....	86
Cuadro 36. Matriz de correlaciones entre las variables independientes y la microcistina en el modelo para la estación lluviosa.....	87
Cuadro 37. Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo de la estación lluviosa incluyendo todas las variables.....	87
Cuadro 38. Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo en la estación lluviosa incluyendo sólo a las variables significativas.....	88
Cuadro 39. Estadísticos de la regresión para el modelo en la estación lluviosa.....	89
Cuadro 40. Análisis de varianza para el modelo en la estación lluviosa.....	89
Cuadro 41. Concentraciones altas de microcistinas y clorofila a en la estación de Gamboa, 2009.....	89
Cuadro 42. Listado de formas, géneros y especies de cianobacterias presentes en muestras de agua de la toma de Gamboa durante el 2009.....	93
Cuadro 43. Listado de formas, géneros y especies de cianobacterias presentes en muestras de agua de la toma de Paraíso durante el 2009.....	94
Cuadro 44. Grupo de algas y cianobacterias presentes en la muestra del 25 de agosto de 2009.....	95
Cuadro 45. Grupo de algas y cianobacterias presentes en la muestra del 09 de septiembre de 2009.....	96
Cuadro 46. Grupo de algas y cianobacterias presentes en la muestra del 15 de diciembre 2009.....	97
Cuadro 47. Cuadro de resumen que contrasta entre los análisis de microcistinas realizados en este estudio y resultados de la ACP de muestras enviadas a un laboratorio en el extranjero.....	113

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Sistema de tratamiento y distribución de agua en Cuaruru, Brasil (izquierda) Reporte de pacientes fallecidos por intoxicación de toxinas producidas por cianobacterias (derecha) Fuente Curso de entrenamiento Ensayos toxicológicos con cianobacterias aplicados a la calidad ambiental, Universidad Federal de Sao Carlos, Brasil 2009	10
Figura 2 Imagen satelital de un afloramiento de cianobacterias en el lago de Atitlán Fuente Noticiero prensa libre de Guatemala, 20 de noviembre de 2009	16
Figura 3 Publicación sobre la presencia de cianobacterias tóxicas en el lago Atitlán Fuente Noticiero prensa libre de Guatemala, 20 de noviembre de 2009	16
Figura 4 Pueblos de Haimen y Qidong de la Republica de China asociada con alta incidencia de cáncer hepático en humanos (Yu, Tang, & Wu, 1989)	18
Figura 5 Algas en el lago pueden ser peligrosas Revista del canal de Panamá, volumen XXX, N°25	24
Figura 6 Manchas verdes en el cauce de navegación del embalse Gatun, posible afloramiento de cianobacterias <i>Microcystis</i> sp Fuente Unidad de Control y Respuesta a Contaminación del Canal de Panamá	25
Figura 7 Manchas verdes en el cauce de navegación del embalse Gatun (área de Gamboa), posible afloramiento de cianobacterias <i>Microcystis</i> sp Fuente Unidad de Control y Respuesta a Contaminación del Canal de Panamá	25
Figura 8 Afloramiento de cianobacterias en el área de Gamboa (muelle), embalse Gatun, posible afloramiento del género <i>Microcystis</i> sp 23 de agosto de 2006 Foto tomada por Iván Domínguez, ACP	32
Figura 9 Periódicos locales (La Prensa y El Siglo), informan quejas sobre sabor y olor en el agua debido a la presencia de algas	33
Figura 10 Manchas de color verde en la toma de agua de Paraíso, presencia de algas en la superficie	34
Figura 11 Embalse Gatun, área de Gamboa 23 de octubre de 2007 (izquierda), Toma de agua de Paraíso, afloramiento 25 de octubre de 2007 (derecha)	34
Figura 12 Observación bajo el microscopio de una muestra colectada en la Toma de agua de Paraíso (5 de enero de 2007)	35
Figura 13 Colonia de <i>Microcystis aeruginosa</i> (izquierda), asociación entre <i>M. aeruginosa</i> y <i>Phormidium muscicola</i> (derecha), foto de E. Aguilar (UP)	36
Figura 14 Toma de agua de Paraíso, coloración verde en el agua (10 de octubre de 2008)	36
Figura 15 Observación al microscopio de una muestra colectada en la toma de agua de Paraíso (10 de octubre de 2008)	37
Figura 16 Toma de agua de Paraíso, nótese la formación de espuma en la superficie del agua (izquierda) Area de Pedro Miguel, frente al edificio 105, 21 de octubre de 2008 (derecha)	37
Figura 17 <i>M. aeruginosa</i> PCC7806 Operón <i>mcy</i> (55 Kb) compuesto por 10 genes dispuestos en dos operones que se transcriben bidireccionalmente ( <i>mcyABC</i> y <i>mcyDEFGHIJ</i> ) (Carrasco, 2007)	47
Figura 18 Ejemplo de modularidad de las NPRS y las PKS C = dominio de condensación, A = Adenilación, Negro = Tiolación, KS = $\beta$ -Cetoacil sintasa, AT = Acil tranferasa, CM = C-metiltransferasa, DH = Dehidratasa, KR = Cetoacil reductasa, ACP = Proteína transportadora del grupo acilo Extraído de Tillet et al, 2000 Fuente <a href="http://linux1.nu.res.in/~pkfdb/polyketide.html">http://linux1.nu.res.in/~pkfdb/polyketide.html</a>	49
Figura 19 Tabla de estándares de referencia para la clase 1C del Anteproyecto de normas de calidad ambiental para aguas naturales de la Republica de Panamá	53
Figura 20 Tabla de estándares de referencia para la clase 2C del Anteproyecto de normas de calidad ambiental para aguas naturales de la Republica de Panamá	54
Figura 21 Anexo 2 de la Resolución la resolución No 507 del Ministerio de Salud (30 de diciembre de 2003), la cual indica las características biológicas que se deben analizar y sus correspondientes valores máximos permisibles	55
Figura 22 Mapa de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá	58
Figura 23 Toma de agua de Paraíso (PRAW)	59
Figura 24 Toma de agua en Gamboa (GRAW)	60
Figura 25 Equipo de medición para la radiación solar, Kipp y Zonen modelo CMP-10, Canadá	62
Figura 26 Principio inmunológico y químico del método ELISA para la determinación de microcistinas en muestras de agua	63

Figura 27 Hoja de calibración y cálculo para las microcistinas	64
Figura 28 Diagrama de caja del pH, transparencia, nitratos, ortofosfatos, fósforo total, nitrógeno total, toxina (microcistina) y oxígenos disuelto Febrero-mayo y julio-diciembre, 2009	68
Figura 29 Diagrama de caja de la turbiedad, clorofila a, radiación solar y temperatura Febrero-mayo y julio-diciembre, 2009	69
Figura 30 Diagrama de caja de los parámetros de calidad de agua en los sitios de muestreo Gamboa y Paraíso	70
Figura 31 Distribución porcentual de las microcistinas en las tomas de agua cruda de Gamboa y Paraíso Febrero-mayo y julio-diciembre, 2009	71
Figura 32 Concentración de microcistinas en los sitios de muestreo Gamboa (GRAW) y Paraíso (PRAW)	71
Figura 33 Afloramiento de cianobacteria, 24 de agosto de 2009	91
Figura 34 Observación bajo el microscopio de la muestra del 24 de agosto de 2009, afloramiento de <i>Microcystis</i> sp	91
Figura 35 División de la columna de agua en zona trofógena y trofólitica (Segundo Esteves, 1988)	101
Figura 36 Gráfico P-P plot e histograma para la verificación de la normalidad de los residuos en el modelo general	133
Figura 37 Diagrama de dispersión para evaluar la homocedasticidad de los residuos en el modelo general	134
Figura 38 Gráfico de regresión parcial de la microcistina con las variable pH y clorofila a en el modelo general	135
Figura 39 Gráfico P-P plot e histograma para la verificación de la normalidad de los residuos en el modelo de Gamboa	136
Figura 40 Diagrama de dispersión para evaluar la homocedasticidad de los residuos en el modelo de Gamboa	137
Figura 41 Gráfico de regresión parcial de la microcistina con las variable pH y clorofila a en el modelo de Gamboa	138
Figura 42 Gráfico P-P plot e histograma para la verificación de la normalidad de los residuos en el modelo de Paraíso	139
Figura 43 Diagrama de dispersión para evaluar la homocedasticidad de los residuos en el modelo de Paraíso	140
Figura 44 Gráfico de regresión parcial de la microcistina con las variable temperatura, transparencia, pH, turbiedad y fósforo total en el modelo de Paraíso	141
Figura 45 Gráfico P-P plot e histograma para la verificación de la normalidad de los residuos en el modelo para la estación seca	142
Figura 46 Diagrama de dispersión para evaluar la homocedasticidad de los residuos en el modelo para la estación seca	143
Figura 47 Gráfico de regresión parcial de la microcistina con las variable temperatura, pH y transparencia en el modelo para la estación seca	144
Figura 48 Gráfico P-P plot e histograma para la verificación de la normalidad de los residuos en el modelo para la estación lluviosa	145
Figura 49 Diagrama de dispersión para evaluar la homocedasticidad de los residuos en el modelo para la estación lluviosa	146
Figura 50 Gráfico de regresión parcial de la microcistina con las variable temperatura, nitratos y clorofila a en el modelo para la estación lluviosa	147
Figura 51 24 de agosto de 2009, Gamboa	148
Figura 52 Colonias de cianobacterias en muestra de agua	148
Figura 53 Análisis de microcistinas en muestras de agua	149
Figura 54 Manchas de color verde en la superficie del agua, Paraíso	149
Figura 55 Toma de agua de Gamboa, poca profundidad	150
Figura 56 Análisis de microcistinas en muestras de agua, suspensión de cianobacterias	150
Figura 57 Análisis de clorofila a en muestras de agua	151
Figura 58 Colonia de cianobacterias, género <i>Microcystis</i> sp	151

## ABREVIATURAS UTILIZADAS

<b>CHCP</b>	Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá
<b>CHL_A</b>	Clorofila <i>a</i>
<b>ACP</b>	Autoridad del Canal de Panamá
<b>IDAAN</b>	Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales
<b>m</b>	Metro
<b>Max</b>	Máximo
<b>MC</b>	Microcistina
<b>mg</b>	Miligramo
<b>mg/l</b>	Miligramo por litro
<b>µg/l</b>	Microgramo por litro
<b>Min</b>	Mínimo
<b>N-NO3</b>	Nitrógeno como Nitrato
<b>NTU</b>	Nephelometric Turbidity Units por sus siglas en ingles, que significan unidades nefelométricas de turbiedad
<b>OD</b>	Oxígeno Disuelto
<b>pH</b>	Potencial de Hidrogeno
<b>P-PO4</b>	Fosforo como ortofosfato
<b>PVSCA</b>	Programa de Vigilancia y Seguimiento de la Calidad del Agua
<b>SM</b>	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, por sus siglas en ingles que significan Método Estándar para el análisis de Agua y Agua residual
<b>T</b>	Temperatura
<b>Turb</b>	Turbiedad
<b>Cyano HABs</b>	Cyanobacterial Harmful Algal Blooms
<b>NASA</b>	Administración Nacional de Aeronautica y del Espacio
<b>MINSA</b>	Ministerio de Salud
<b>ASEP</b>	Autoridad de Servicios Públicos
<b>MC-LR</b>	Microcistina cuyo aminoácido variables son leucina y Arginina
<b>MC-RR</b>	Microcistina cuyo aminoácido variables son Arginina y Arginina
<b>MC-YR</b>	Microcistina cuyo aminoácido variables son Tirosina y Arginina
<b>DW</b>	Peso seco

<b>ADN</b>	Acido desoxirribonucleico
<b>OMS</b>	Organización Mundial de la Salud
<b>TMR</b>	Toma de agua cruda de Paraiso
<b>DC1</b>	Gamboa (a un costado del Puente de Gamboa)
<b>GRAW</b>	Toma de agua cruda de Gamboa
<b>PRAW</b>	Toma de agua de Paraiso
<b>YSI 556 MPS</b>	Sistema multi-sonda
<b>ELISA</b>	Ensayo de inmunoabsorción ligado a enzimas
<b>ELISA ET039</b>	Quantube Kit para detección de microcistinas
<b>ELISA EP022</b>	QuantuPlate Kit para detección de microcistinas
<b>N:P</b>	Relación nitrógeno/fósforo
<b><i>mcyB</i></b>	Gen involucrado en la síntesis de la microcistina
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dioxido de carbono
<b>O<sub>2</sub></b>	Oxígeno disuelto
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	Nitrógeno amoniacal
<b>NRPS</b>	Enzimas sintetisas peptídicas no-ribosómicas
<b>PKS</b>	Enzimas poliquetido sintasas
<b>Adda</b>	3-amino-9-methoxy-2,6,8-trimethyl-10-phenyldeca-4,6-dienoic acid
<b>NOAEL</b>	Nivel sin efecto adverso observable
<b>TDI</b>	Ingesta diaria tolerable
<b>1C, 2C</b>	Clasificación de los cuerpos de agua según el anteproyecto de normas de calidad ambiental para aguas naturales en la República de Panamá, capítulo III
<b>SRFAA</b>	Estación de Balboa, encima de la caseta próxima al mercado de abastos donde se encuentra ubicado el medidor de radiación solar
<b>APHA</b>	American Public Health Association
<b>AWWA</b>	American Water Works Association
<b>WEF</b>	Water Environment Federation
<b>HCL</b>	Acido clorhídrico
<b>BCS Laboratories</b>	Biological Consulting Services
<b>EAA-CA</b>	Unidad de calidad de agua

## RESUMEN

Muchos son los factores que influyen en la presencia-abundancia de cianobacterias, y la producción de toxinas en un cuerpo de agua. Estas especies planctónicas, son importantes en virtud de los problemas que pueden causar en los ecosistemas acuáticos, desde el punto de vista ecológico y sanitario. El embalse Gatun, además de servir como ruta de tránsito para el paso de barcos, provee agua cruda para el abastecimiento público en algunas áreas de la capital de Panamá. Reportes previos indican la presencia de cianobacterias en este cuerpo de agua, en especial del género *Microcystis sp*. Con el objetivo de analizar que factor(es) ambiental(es) tiene(n) mayor incidencia en la presencia de microcistinas en las tomas de agua cruda del embalse Gatun, Gamboa y Paraiso, se analizaron los siguientes parámetros: temperatura ( $T$  °C), pH, transparencia (m), turbiedad (NTU), nitratos (mg/l), ortofosfato (mg/l), fósforo total (mg/l), nitrógeno total (mg/l), radiación solar (Langley), y la concentración de clorofila ( $\mu\text{g/l}$ ). Durante los meses de febrero a mayo y julio a diciembre de 2009, se colectaron muestras en cada toma de agua cruda realizando dos muestreos por mes. Para ello, se utilizó una sonda YSI 556 MPS (Yellow Springs, Estados Unidos) para mediciones de temperatura y pH en campo, un disco de Secchi para medir la transparencia y se realizaron observaciones en campo. Las muestras fueron colectadas, preservadas y analizadas conforme a los criterios de colecta, almacenamiento y análisis establecidos en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. La detección de microcistinas se realizó utilizando el *Quantitube kit* ET039 de Envirologix (Portland, Estados Unidos). A través de un modelo de regresión lineal múltiple se espera conocer qué factor(es) ambiental(es) está(n) influyendo en la presencia de estas toxinas en las tomas de agua cruda del embalse de Gatun.

## SUMMARY

Many factors influence the presence/abundance of algae blooms and toxin production in a water body. These planktonic species are important due to the fact that they can cause problems in aquatic ecosystems, from an environmental and health perspective. Gatun lake, in addition to serving as a transit route for the passage of ships, the lake serves as a raw water source for public consumption in some areas of Panama City. Previous reports indicate the presence of cyanobacteria in this reservoir, chiefly, the genus *Microcystis sp*. In order to analyze which factor(s) have greater environmental impact on the presence of microcystins in the raw water intakes of Gamboa and Paraiso, the following parameters were analyzed: temperature, pH, transparency, turbidity, nitrates ( $\text{NO}_3$ ), orthophosphates ( $\text{PO}_4$ ), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), solar radiation (SR), and chlorophyll concentration (Chl a). During the months of February to May and July to December 2009, two water samples were collected per month at each raw water intake. Other field environmental observations were done using an YSI 556 MPS (Yellow Springs, USA) probe for measuring temperature and pH in the field, a Secchi disk to measure the transparency. The samples were collected, preserved and analyzed according to the criteria of collection, storage and analysis given in the *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. The detection of Microcystins was conducted using a *Quantitube kit* ET039 from Envirologix (Portland, USA). By means of multiple regression models, it's expected to understand which factor/s are triggering the environmental presence of this toxin in the raw water intakes of Gatun lake.

## INTRODUCCION

El planeta Tierra cuenta con una cantidad casi ilimitada de agua, pero solo una fracción muy pequeña del agua en la tierra es dulce y renovable. El ambiente, el ciclo del agua y las actividades humanas determinan la calidad del agua. A diario nuestras vidas dependen del acceso al agua dulce, sin embargo, el deterioro progresivo de la calidad de las aguas continentales para uso recreativo, abastecimiento a poblaciones, riego y/o actividades pesqueras o acuícolas, conlleva riesgos a la salud pública, a los ecosistemas naturales y por ende, generan impactos negativos a la economía de un país.

Naturalmente, los ecosistemas acuáticos experimentan el proceso de eutrofización (enriquecimiento de las aguas por aporte de nutrientes). Sin embargo, las actividades antropogénicas influyen fuertemente llevando a un aumento en el vertido de efluentes ricos en nutrientes, estos a su vez, determinan importantes cambios en la calidad de los cuerpos de agua, acelerando la eutrofización (ANAM, 2006). Esto se evidencia por los cambios cuantitativos y cualitativos en la comunidad del fitoplancton y en particular de cianobacterias, las cuales desplazan a otros grupos de algas, así como, un incremento en el desarrollo de macrofitas acuáticas, flotantes, emergentes y sumergidas. Este fenómeno está ligado a la degradación de los recursos hídricos. Las cianobacterias, producen un amplio rango de metabolitos secundarios bioactivos, algunos de los cuales son tóxicos. Las toxinas de cianobacterias (cianotoxinas), son compuestos químicamente diversos que se agrupan según su modo de acción en hepatotoxinas, neurotoxinas y dermatotoxinas. Dichos tóxicos incluyen a las microcistinas, cilindrospermopsina, saxitoxinas, nodularinas y anatoxinas (Giannuzzi, 2009).

La cianobacteria del género *Microcystis* es la más asociada con afloramientos en todo el mundo. Generalmente, cinco (5), especies de *Microcystis* (*M. aeruginosa*, *M. ichthyoblabe*, *M. novacekii*, *M. viridis* y *M. wesenbergii*), han sido reconocidas como especies dominantes. Estas han sido definidas en base a las características morfológicas como “morfoespecies” (Tanabe *et al.*, 2003). La clasificación taxonómica de *Microcystis* *sp.* es difícil, sin embargo, varios morfotipos característicos fueron usualmente clasificados como especies tradicionales que ocurren en diferentes regiones. En el presente solo pueden caracterizarse convencionalmente como morfotipos a morfoespecies que pertenecen a un genotipo con ecología similar. Tales especies tradicionales con fenotipo y caracteres ecofisiológicos distintos, no pueden ser omitidos, su identificación es útil y necesaria para investigaciones ecológicas y estudios ecotoxicológicos (Komarek y Komarkova, 2002).

La identificación de géneros de cianobacterias mediante morfología y/o análisis moleculares no indican el potencial para la producción de toxinas. Diferentes cepas de una misma especie pueden ser morfológicamente idénticas, pero pueden diferir en toxicidad. Por ejemplo, *M. aeruginosa* tiene ambas cepas, tóxicas y no tóxicas (Baker *et al.*, 2002). Las diferencias entre cianobacterias tóxicas y no tóxicas en respuesta a condiciones externas no son comprendidas actualmente (Vézic *et al.*, 2002).

Los embalses destinados al suministro de agua potable se encuentran entre los ambientes de mayor riesgo para la salud humana.

En Panamá, son escasas las investigaciones básicas y estudios de toxicidad relacionadas a afloramientos de cianobacterias. La falta de laboratorios y equipos especializados causa

dificultades para el desarrollo de investigaciones de toxicidad y por lo tanto, de las posibles consecuencias para el ambiente y la salud pública. El conocimiento de los efectos perjudiciales que las cianobacterias pueden tener para el ambiente y la salud, justifica la necesidad de abordar la existencia de estos organismos con mayor atención en el contexto de la gestión de la calidad de agua. A partir del presente estudio, se espera conocer qué factor(es) ambiental(es) está(n) influyendo en la presencia de microcistinas en las tomas de agua cruda del embalse Gatún.

## **Objetivos**

### *1.1 Objetivo general*

Evaluar los factores ambientales asociados con la presencia de microcistinas en dos sitios (tomas de agua de Gamboa y Paraiso), del embalse Gatun en la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá, durante el 2009

### *1.2 Objetivos específicos*

- Realizar una revisión bibliográfica de la presencia de algas y cianobacterias en Panamá, principalmente en los sitios de interés
- Determinar la presencia de microcistinas en muestras de agua
- Determinar si las concentraciones de microcistinas están correlacionadas con la temperatura, pH, transparencia, turbiedad, nitratos, ortofosfatos, fósforo total, nitrógeno total, clorofila, radiación solar y oxígeno disuelto
- Comparar la influencia de parámetros físico-químicos y biológicos con respecto a las microcistinas en Gamboa y Paraiso
- Comparar la influencia de parámetros físico-químicos y biológicos con respecto a las microcistinas para ver si influye la estacionalidad
- Formular ecuaciones que podrían predecir la concentración de microcistinas en función de las variables que influyan en la detección de sus concentraciones
- Describir la calidad de agua en los sitios de muestreo

### **Hipótesis de trabajo**

Se desconoce a ciencia cierta qué factores influyen en la presencia de afloramientos de cianobacterias en los ecosistemas acuáticos, y estos a su vez, en la producción de toxinas. Revisiones bibliográficas sugieren que los factores que intervienen en la presencia de cianobacterias en los embalses, podrían ser el aporte de nutrientes y las condiciones físico químicas del embalse, tales como el pH y la temperatura, el viento, entre otros, las cuales, podrían jugar un papel importante en el desarrollo o la manifestación de afloramientos de cianobacterias y estos a su vez, la producción de toxinas como las microcistinas.

## **FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

### 3.1 Generalidades de las cianobacterias

Las cianobacterias, cianofitas, cianoprocariontas o algas verde-azules, son organismos procariontas muy primitivos, autotrofos y que realizan fotosíntesis con liberación de oxígeno. Habitan en casi todos los ambientes acuáticos: charcas, lagos, embalses, reservorios, aguas tranquilas y corrientes, agua dulce, salobre o marina, así como en ambientes terrestres. Las cianobacterias, pueden ser planctónicas o bentónicas. Las planctónicas, bajo condiciones favorables se desarrollan en forma abundante, originando “afloramientos acuáticos” (en inglés conocidos como “*Bloom*”). Esto ocurre, por ejemplo, en aguas dulces con géneros tales como *Microcystis*, *Anabaena*, entre otros. Los niveles de organización biológica son unicelulares, coloniales y filamentosos. Algunas cianobacterias tienen la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, lo que favorece el desarrollo masivo en ambientes con baja relación nitrógeno/fósforo (N/P).

Pueden ser evidentes a simple vista por la coloración generalmente verde y la turbiedad que le confieren al agua o por la presencia de acumulaciones o franjas densas superficiales. Además, regulan su posición en la columna de agua, mediante la presencia de vesículas de gas que se agrupan en las células. Todas las cianobacterias secretan mucilago en mayor o menor grado. Esta secreción constituye el estuche mucilaginoso que rodea a los individuos solitarios y a las formas coloniales y filamentosas. Difieren en la cantidad de mucilago secretado en su consistencia firme y difluente, homogénea o estratificada, coloreada o hialina. Estas características dependen en muchos casos de las condiciones ambientales tales como la luz, el pH y los nutrientes (Giannuzzi, 2009).

Un aspecto negativo relacionado con los afloramientos de cianobacterias, es la alteración de las características organolépticas del agua (sabor y olor) Esto se debe a la liberación de metabolitos por parte de ciertas especies. Compuestos tales como la geosmina y/o el 2-metilisoborneol, no tóxicos (Falconer *et al*, 1999, Falconer, 1998), pero que suelen generar trastornos respiratorios y/o digestivos a personas sensibles. Otra situación nociva, está relacionada con su potencial capacidad de generar sustancias tóxicas (metabolitos secundarios) hepatotóxicas, neurotóxicas y/o dermatotóxicas, las cuales son liberadas al ambiente produciendo serios efectos negativos al ecosistema y consecuentemente, al hombre.

### *3.2 Eutrofización cultural y cianobacterias*

Naturalmente, en los ecosistemas acuáticos ocurre el proceso de eutrofización (enriquecimiento de las aguas por aporte de nutrientes). Sin embargo, las actividades antropogénicas determinan importantes cambios en la calidad de los cuerpos de agua, lo que acelera este proceso. El reconocimiento de los fenómenos de eutrofización se inició aproximadamente en la década de 1950, no fue hasta alrededor de cuatro décadas atrás que estos comenzaron a asociarse con la proliferación masiva de cianobacterias planctónicas, en muchos casos productoras de sustancias nocivas de diversa naturaleza química (Chorus y Bartram, 1999). Los afloramientos de cianobacterias ocurren muy frecuentemente en sistemas eutróficos.

### *3.3 Primeros registros de cianobacterias*

La aparición en el tiempo de las primeras cianobacterias tóxicas es difícil de precisar, pero existen registros paleontológicos que han llevado a plantear directamente una

relacion entre ciertas mortandades de vertebrados y proliferaciones de cianobacterias tóxicas en el Pleistoceno (Braun y Pfeiffer, 2002)

Segun Francis (1878 En Echenique y Aguilera 2009) la primera referencia mundial relacionada con aspectos de toxicidad de cianobacterias en ambientes acuáticos continentales se remonta al año 1878, cuando en el lago Alexandrina (Australia), se produjo una mortandad de animales, entre ellos vacas, caballos, perros, ovejas y cerdos, luego que estos bebieran agua del mencionado cuerpo de agua donde se desarrollaba un afloramiento de *Nodularia spumigena* (*N spumigena*) Las intoxicaciones en poblaciones humanas por ingesta de agua contaminada con toxinas producidas por especies tóxicas de cianobacterias ya han sido descritas, entre otros, en países como Austria, Inglaterra, Brasil, China, y Sudáfrica (Carmichael y Falconer, 1993)

### *3 4 Contexto mundial, registros de cianobacterias*

#### *3 4 1 Brasil*

El primer registro de muertes humanas causadas por cianotoxinas ocurrió en 1996, en una clínica de la ciudad de Cuaruqu (Brasil) En esa ocasión, 130 pacientes renales crónicos, luego de ser sometidos a sesiones de hemodialisis, presentaron un cuadro clínico compatible con una grave hepato-toxicosis Del total (130), aproximadamente 60 pacientes fallecieron antes de los 10 meses posteriores al inicio de los síntomas Los análisis confirmaron la presencia de microcistinas y cilindrospermopsina en el carbón activado utilizado en el sistema de purificación del agua de la clínica y microcistinas en muestras de sangre e hígado de los pacientes intoxicados (Carmichael, 1996) Así mismo, las observaciones microscópicas en muestras de agua del embalse que proveía de agua a

la clínica, así como al resto de la ciudad, indicaban una significativa dominancia de cianobacterias toxigénica (Figura 1).

Intoxicaciones en humanos debido a toxinas de cianobacterias, han sido reconocidas en Brasil, Estados Unidos y el Reino Unido (Cuadro 1), de estos se destacan los casos ocurridos en Brasil donde se registran muertes en humanos.

Cuadro 1. Ejemplo de intoxicaciones en humanos debido a la cianotoxinas microcistinas, tomados de Chorus y Bartram, 1999. Se destacan los casos registrados en Brasil.

Lugar de registro	Efectos tóxicos	Referencia
Brasil, 1985.	Primer reporte para América Latina: 2000 casos de gastroenteritis por agua potable, con 88 letales.	Teixeira et al., 1993.
Brasil, 1996.	Primer registro mundial de intoxicación por vía sanguínea: 130 pacientes dializados presentaron patologías hepáticas. 60 murieron en 10 meses.	Pouria et al., 1998; Chorus y Bartram, 1999.
EEUU (Río Ohio), 1931,	Primer reporte mundial de gastroenteritis.	Tisdale, 1931.
Reino Unido, 1989.	Intoxicación aguda de 20 deportistas por inhalación de spary durante canotaje.	Turner et al., 1990.

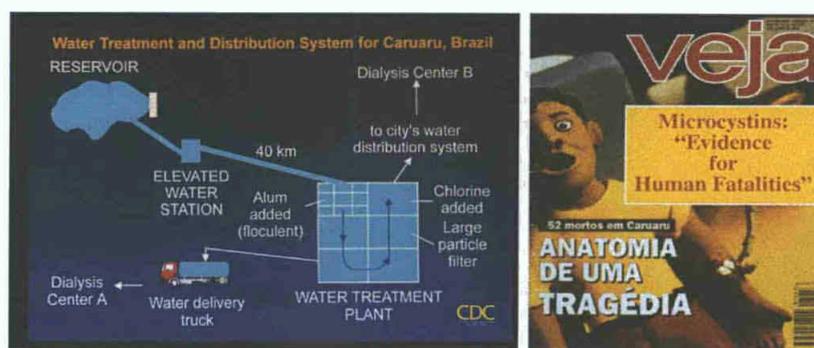


Figura 1. Sistema de tratamiento y distribución de agua en Cuaruru, Brasil (izquierda). Reporte de pacientes fallecidos por intoxicación de toxinas producidas por cianobacterias (derecha). Fuente: Curso de entrenamiento: Ensayos toxicológicos con cianobacterias aplicados a la calidad ambiental, Universidad Federal de Sao Carlos, Brasil 2009.

## 3 4 2 Estados Unidos y Canadá

Exposiciones conocidas en humanos con afloramientos de cianobacterias en aguas de los Estados Unidos y Canadá han sido recopiladas y documentadas (US Environmental Protection Agency, 2007) (Cuadro 2) Los casos presentados están relacionados a gastroenteritis e intoxicaciones en humanos, como tambien, la presencia de toxinas en el agua del proceso durante la potabilización

Cuadro 2 Intoxicaciones agudas en humanos por cianobacterias en Estados Unidos y Canada

<b>Año</b>	<b>EEUU</b>
<b>1931</b>	Un afloramiento masivo de <i>Microcystis sp</i> en los rios Ohio y Potomac enfermo entre 5000 y 8000 personas que consumieron agua potable procesada de esos rios El agua potable en cuestión se obtuvo por precipitacion, filtracion y cloracion que evidentemente no era suficiente para eliminar las toxinas
<b>1968</b>	Schwimmer y Schwimmer, compilaron numerosos casos de enfermedades gastrointestinales despues del consumo de agua potable relacionada con desarrollos masivos de cianobacterias
<b>1975</b>	El choque endotoxico de 23 pacientes en diálisis en Washington DC, se atribuye a afloramientos de cianobacterias en un deposito de agua potable
<b>1975</b>	Una enfermedad gastrointestinal causada por cianobacterias azotó el 62% de la población atendida por el servicio de agua de Sewickley, PA
<b>1980</b>	Enfermedades presentadas en humanos en el noreste de Pennsylvania y su asociacion con sospecha de afloramientos por algas verde-azules
<b>1992</b>	Estudios no publicados por el Dr Carmichael dan cuenta de casos en personas con nauseas, vomitos, diarrea, fiebre e infecciones en los ojos, oidos y garganta despues de la exposición a un desarrollo masivo de cianobacterias en agua potable
	<b>CANADA</b>

<b>1959</b>	A pesar de la muerte del Ganado y las advertencias contra el uso recreativo, la gente nado en un lago infectado con cianobacterias Trece personas se enfermaron manifestando dolor de cabeza, náuseas, dolores musculares, diarrea con dolor En el excremento de un paciente que habia ingerido 300 ml de agua, un medico pudo identificar fácilmente numerosas células de <i>Microcystis spp</i> y algunos tricomas de <i>Anabaena circinalis</i>
-------------	--

El cuadro 3 comprende un listado de articulos publicados cronologicamente sobre brotes de cianobacterias en los Estados Unidos 1883-2003

Cuadro 3 Estudio cronologico de articulos publicados sobre brotes de cianobacterias en los Estados Unidos 1883-2003 (US Environmental Protection Agency, 2007)

<b>Año</b>	<b>Título del Artículo</b>
1883	Some algae of the Minnesota supposed to be poisonous
1887	Some algae of the Minnesota supposed to be poisonous
1887	Second report on some algae of Minnesota supposed to be poisonous
1887	Investigation of supposed poisonous vegetation in waters of some of the lakes in Minnesota
1903	Observations upon some algae which causes water bloom (Fergus Falls, Minnesota)
1925	Farmer tells some news (on stock poisoning Big Stone Lake) (South Dakota)
1925	One hundred twenty seven hogs, 4 cows die after drinking water from (Big Stone) lake, stock, stricken, last Saturday, all die in short time, lake water sent in for analysis (South Dakota)
1927	Plants of Michigan poisonous to livestock
1931	Epidemic of intestinal disorders in Charleston, W Va , occurring simultaneously with unprecedented water supply conditions
1934	Waterblooms as a cause poisoning in domestic animals (Minnesota)
1939	Toxic algae in Colorado
1940	Toxic algae in Colorado
1943	Sheep poisoning by algae (Montana)
1947	Waterbloom as a cause of poisoning in livestock in North Dakota
1948	A heavy mortality of fishes resulting from the decomposition of algae in the Yahara, River, Wisconsin
1952	Illustrations of fresh water algae toxin to animals Cincinnati,

	Ohio
1953	Toxic algae in Iowa lake
1953	Rice fields study report blue-green algae a possible anti-mosquito measure for rice fields
1954	Blue-green algae control at Storm lake (Iowa)
1955	Further studies during 1954 on blue-green algae a possible anti-mosquito measure for rice fields (California)
1955	Domestic animal deaths attributed to algal toxins (Illinois)
1956	Present knowledge concerning the relationship of blue-green algae and mosquitoes in California rice fields
1959	A dermatitis producing alga in Hawaii
1959	Dermatitis eschariata caused by a marine alga (Hawaii)
1960	Water poisoning, a study of poisonous algae blooms in Minnesota
1960	Algae and other interference organisms in the waters of South-Central United States
1961	Klamath Lake, an instance of natural enrichment (Oregon)
1964	Blue-greens Waterfowl Tomorrow (Minnesota)
1966	Toxicity of a Microcystis waterbloom from an Ohio pond
1971	Dermatitis producing alga Lyngbya majuscula Gomont in Hawaii I Isolation and chemical characterization of the toxic factor
1971	Dermatitis producing alga Lyngbya majuscula Gomont in Hawaii II Biological properties of the toxic factor
1975	Pyrogenic reactions during hemodialysis caused by extramural endotoxin (Washington, D C )
1976	Gastrointestinal illness at Sewickley, Pa
1977	Toxic blooms of blue-green algae (New Hampshire)
1977	Are algae toxic to honey bees? (Arizona)
1978	Dermatitis from purified sea algae toxin (Debromoaplysiatoxin) (Hawaii)
1979	Lytic organisms and photooxidative effects influence on blue-green algae (cyanobacteria) in Lake Mendotam Wisconsin
1980	Blue-green algae and selection in rotifer populations (Florida)
1981	A toxic bloom of Anabaena flos-aquae in Hebgen Reservoir Montana in 1977
1981	Studies on aphantoxin from Aphanizomenon flos-aquae in New Hampshire
1981	Water-associated human illness in Northeast Pennsylvania and its suspected association with blue-green algae blooms
1982	Seaweed itch on Windward Ohio
1984	Toxic algae Montana Water Quality
1984	Antineoplastic evaluations of marine algal extracts (Hawaii)

1986	Toxicity of a clonal isolate of cyanobacterium (blue-green) <i>Microcystis aeruginosa</i> from Lake Erie (Ohio)
1987	Blue green algae ( <i>Microcystis aeruginosa</i> ) hepatotoxicosis in cattle (Illinois)
1988	Modeling of blue green algal blooms in the lower Neuse River (North Carolina)
1988	Anticholinesterase poisonings in dogs from a cyanobacterial (blue-green algae) bloom dominated by <i>Anabaena flos-aquae</i> (South Dakota)
1989	Consistent inhibition of peripheral cholinesterases by neurotoxins from the freshwater cyanobacterium <i>Anabaena flos-aquae</i> studies of ducks, swine, mice and steer (EPA Region 5)
1990	Isolation, characterization and detection of cyanobacteria (blue-green algae) toxins from freshwater supplies (Ohio)
1990	Blue-green algae toxicosis in Oklahoma
1992	Identification of 12 hepatoxins from a Homer Lake bloom of the cyanobacteria <i>Microcystis aeruginosa</i> , <i>Microcystis viridis</i> , and <i>Microcystis wesenbergii</i> nine new microcystins (Illinois)
1992	Neurotoxic <i>Lyngbya wollei</i> in Guntersville Reservoir, Alabama
1992	Outbreaks of waterborne disease in the United States 1989-90
1993	Chemical study of the hepatotoxins from <i>Microcystis aeruginosa</i> collected in California
1993	Toxicosis due to microcystin hepatotoxins in three Holstein heifers (Michigan)
1994	Algal toxins in drinking water? Research in Wisconsin
1995	Cascading disturbances in Florida Bay, USA cyanobacteria blooms, sponge mortality and implications for juvenile spiny lobsters, <i>Panulirus argus</i>
1995	Seven more microcystins from Homer Lake cells application of the general method for structure assignment of peptides containing $\alpha$ - $\beta$ -dehydroamino acid unit(s) (Illinois)
1996	Assessment of blue-green algal toxins in Kansas
1996	Aplysiatoxin and debromoaplysiatoxin as the causative agents of a red alga <i>Gracilaria coronopifolia</i> poisoning in Hawaii
1997	Mechanisms of ecosystem change the role of zebra mussels in Saginaw Bay (Michigan)
1997	Evidence of paralytic shellfish poisons in the freshwater cyanobacterium <i>Lyngbya wollei</i> (Farlow ex Gomont) comb Nov (Alabama)
1997	Recent appearances of <i>Cylindrospermopsis</i> (cyanobacteria) in five hypereutrophic Florida Lakes
1997	Occurrence of the black band disease cyanobacterium on healthy coral of the Florida Keys
1998	Blue-green algae toxicosis in cattle (Colorado)

1999	Effect of surface water on desert Bighorn sheep in the Cabeza-Prieta National Wildlife Refuge, Southwestern Arizona
1999	Spread of toxic algae linked to zebra mussels (Ohio)
2000	New malyngamides from the Hawaiian cyanobacterium <i>Lyngbya majuscula</i>
2000	Harvesting of <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> Ralfs ex Born And Flah Var <i>Flosaquae</i> (cyanobacteria) from Klamath Lake for human dietary use (Oregon)
2000	Desert Bighorn sheep mortality due to presumptive type-C botulism in California
2001	<i>Microcystis</i> algal toxins in source and finished drinking water (Wisconsin)
2001	Confirmation of catfish, <i>Ictalurus punctatus</i> (Rafinesque) mortality from <i>microcystis</i> toxins (South Central U S)
2001	Assessment of blue-green algal toxins in Raw and Finished Drinking Water Denver, Colorado
2001	Zebra mussel ( <i>Dreissena Polymorpha</i> ) selective filtration promoted toxic <i>Microcystis</i> blooms n Saginaw Bay (Lake Huron) and Lake Erie
2002	Possible importance of algal toxins in Salton Sea, California
2002	Clinical and necropsy findings associated with increase mortality among American alligators of Lake Griffin, Florida
2002	Removal of pathogens, surrogates, indicators and toxins using riverbank filtration (California)
2002	<i>Dreissenid</i> mussels increae exposure of benthic and pelagic organisms to toxic <i>microcystins</i> (Michigan)
2003	Natural algacides for the control of cyanobacterial-related off-flavor in catfish aquaculture (South Central U S)
2003	Synoptic survey of musty/muddy odor metabolites and <i>microcystin</i> toxin occurrence and concentration in southeastern USA channel catfish ( <i>Ictalurus punctatus</i> Rafinesque) production ponds
2003	Variants of <i>microcystins</i> in south-eastern USA channel catfish ( <i>Ictalurus punctatus</i> (Rafinesque) production ponds
2003	Cyanobacterial toxicity and migration in mesotrophic lake in western Washington

### 3 4 3 México

Afloramientos de cianobacterias en fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano en México, han sido reportados en el Lago de Chapala, en el estado de Jalisco, en el Valle de Bravo y en el Estado de Mexico En el lago de Pátzcuaro a partir del 2009

comenzó a incrementarse en número de células por mililitro de cianobacterias y de microcistinas; principalmente, en la zona norte del lago, en las estaciones Quiroga y Espíritu y en la zona sur la estación Embarcadero (Bravo *et al.*, 2012).

### 3.4.4 Guatemala

En noviembre de 2009, se publicó en el noticiario prensa libre de Guatemala (viernes 20 de noviembre, 2009), una imagen de satélite de la NASA en la cual se podía observar un afloramiento de cianobacterias en el centro del Lago Atitlán (Figura 2 y 3). Las cianobacterias predominantes tenían formas filamentosas, principalmente del género *Lyngbya sp.* (Bacteria es tóxica en centro de lago, 2009). Sin embargo, también se tienen registros de *Microcystis sp.*, siendo ambos géneros potencialmente tóxicos.

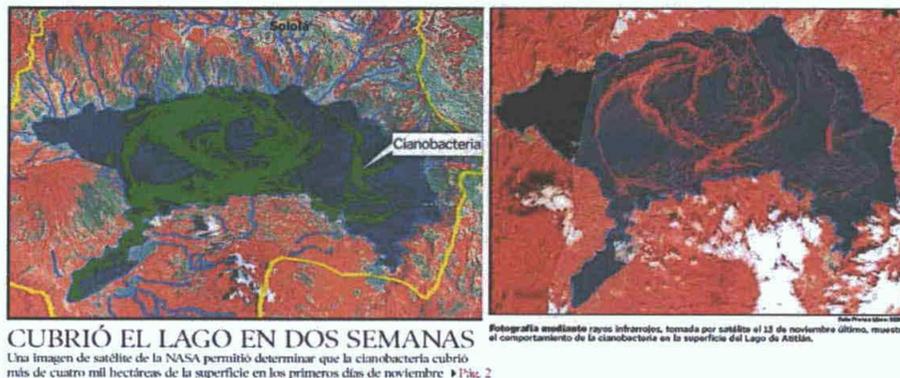


Figura 2. Imagen satelital de un afloramiento de cianobacterias en el lago de Atitlán. Fuente: Noticiario prensa libre de Guatemala, 20 de noviembre de 2009.

## Bacteria es tóxica en centro de lago

Por ALBERTO RAMÍREZ

La cianobacteria en el centro del Lago de Atitlán presenta toxicidad muy elevada, pero no se ha podido identificar el tipo de veneno orgánico, según recientes experimentos de laboratorio dirigidos por el movimiento 'Todos por el Lago'.

La muestra de cianobacteria recolectada en el centro del Lago presenta toxicidad muy alta, según de la muestra de San Pedro, con nivel intermedio, informó 'Todos por el Lago'. En San Buenaventura, Panajachel, la muestra no es tóxica. La posible aplicación, de acuerdo con el mencionado movimiento, es que la biomasa en la orilla es más vieja que la del centro y se encuentra en etapas de descomposición. Al suceder eso, la cianobacteria libera toxinas en el agua y deja de ser tóxica.

Las pruebas fueron efectuadas en el laboratorio de Félix Mayorga, experto en contaminación.

Los exámenes no revelan el tipo de toxina que se encontró, por lo que se realizan otros análisis de toxicidad orgánica en la Universidad Davis, de California. Los resultados podrían conocerse en los próximos días. En el informe se recomienda al público que por ningún motivo beba el agua del Lago ni agar se exponga a la cianobacteria, ya sea por contacto o cuando la misma le caiga o cuando levanta ropa en ese. Todos por el Lago asegura que se previene el suministro de agua a poblaciones.

Fotos satelitales.

Debido a la gravedad de la contaminación en el Lago de Atitlán, Sololá, el Sistema Regional de

Visualización y Monitoreo (Servir) llevó a cabo un análisis de la contaminación en este, mediante fotos tomadas por satélites.

Servir está integrada por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de EE. UU. (NASA), por sus agencias en inglés, la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo y otras entidades. Se procesaron imágenes tomadas por satélites, del 30 de octubre al 10 de noviembre, con lo que se pudo observar el avance acelerado de la cianobacteria.

En el primer día, las fotos satelitales muestran que la contaminación abarcaba solo 144 hectáreas, el 1.18 por ciento del lago. Pasa el 11 de noviembre, la cianobacteria ocupaba cuatro mil 774 hectáreas, el 39 por ciento.

Los resultados preliminares pueden consultarse en el portal en Internet de Servir.

Figura 3. Publicación sobre la presencia de cianobacterias tóxicas en el lago Atitlán. Fuente: Noticiario prensa libre de Guatemala, 20 de noviembre de 2009.

### 3 4 5 Uruguay

Algunos estudios recientes indican gran proliferación de cianobacterias en la Laguna de Rocha y afloramiento de *Cylindrospermopsis raciborskii* (*C raciborskii*) en lagos someros. En un estudio en el embalse de Salto Grande “La diversidad del fitoplancton como herramienta para la gestión de los afloramientos de *Microcystis*”, reportaron un afloramiento de *N. spumigena* en la Laguna de Castillos (Rocha, Uruguay) en el verano de 1990. Los organismos presentaron características morfológicas intermedias entre *N. spumigena* y *N. báltica*. Durante el evento, la temperatura del agua varió entre 21 y 27 °C. Un segundo afloramiento reportado de *N. cf. spumigena*, fue observado desde diciembre de 1996 a febrero de 1997 en la misma laguna y *Pseudanabaena cf. moniliformis* en la Laguna de Rocha (UNESCO, 2009).

### 3 4 6 Argentina

En Argentina, el primer evento cianotóxico se remonta a 1944 en la laguna Bedetti (Santo Tomé, Santa Fe). En esa oportunidad Mullor (1945), dio a conocer un suceso en el cual, tras la ingesta de agua en la que se desarrollaba un afloramiento de *Anabaena*, murieron aproximadamente 1,000 patos de granja y animales silvestres (reptiles, anfibios, aves, etc). Posteriormente, en 1954 se analizó una mortandad de peces en la laguna del Monte (provincia de Buenos Aires), asociada a una proliferación masiva de varias especies de cianobacteria entre las que se encontraban *Polycystis (Microcystis), flosaquae, Anabaena (A. circinalis) circinalis* y *A. inaequalis* (Ringuelet *et al.*, 1955).

Según Odriozola y col. (1984), se evaluaron la mortandad de 72 vacas ocurrida en un campo de la localidad de Goyena (Buenos Aires). Efectuados los ensayos de toxicidad aguda, sobre el contenido rumial y estomacal de las vacas, se determinó que las muertes

habían ocurrido como consecuencia de la ingesta de agua de un charco presente en el potrero. En ese cuerpo de agua, se desarrollaba un afloramiento de *M. aeruginosa*, *A. flos-aquae*, *Aphanizomenon flos-aquae* (*A. flos-aquae*) y *N. spumigena*. A partir de la década de los 90, los estudios relacionados con los aspectos nocivos de las cianobacterias se incrementaron significativamente en la República de Argentina. En cuanto a los fenómenos relacionados con los cambios de características organolépticas, los más destacados en Argentina son los ocurridos en San Luis (Silva *et al.*, 1995), y en la Bahía Blanca (Echenique *et al.*, 2003, 2006). En ambas oportunidades, el estudio estuvo relacionado a los trastornos generados por la presencia de geosmina en el agua de red domiciliar.

### 3.4.7 China

Afloramientos persistentes de cianobacterias, particularmente del género *Microcystis* sp., son muy frecuentes en fuentes de agua en pueblos de la China.



FIGURE 17 Haimen and Qidong Counties in the People's Republic of China associated with a high incidence of human liver cancer

Figura 4 Pueblos de Haimen y Qidong de la República de China asociada con alta incidencia de cáncer hepático en humanos (Yu, Tang, & Wu, 1989)

Yu *et al*, (1989) de la Universidad Medica de Shanghai, realizaron un estudio epidemiológico sobre carcinoma hepático primario en pueblos de la Republica de China. La incidencia de carcinoma hepático primario en Qidong County cuya fuente de agua potable provienen de lagunas y charcas, fue ocho veces más alta que en pueblos donde la fuente de agua eran pozos (Figura 4). Los resultados sugirieron que el agua potable proveniente de las lagunas estaba contaminada con microcistinas y que estas inducían carcinoma hepático primario en humanos. Análisis de microcistinas en muestras de agua potable mostraban concentraciones insignificantes en el agua de pozo y grifos (en promedio 0,14 y 0,11  $\mu\text{g/l}$ ). Mientras que las concentraciones máximas detectadas de microcistina en estanques fueron 1 y 2  $\mu\text{g/l}$ .

### 3.4.8 España

Carrasco (2007), realizó un estudio en el cual seleccionaron siete embalses españoles para analizar las características físico-químicas del agua, entre ellos los nutrientes y la presencia de cianobacterias planctónicas. Sus resultados indican que las cianobacterias potencialmente tóxicas son muy comunes en los embalses de Madrid, siendo los géneros más importantes *Microcystis*, *Aphanizomenon* y *Anabaena*. Las dos especies más comunes de cianobacterias potencialmente tóxicas *A. flos-aquae* y *M. aeruginosa* aparecieron juntas, lo que indicaba que poseían similares características ecológicas. Los registros de clorofila a superiores a 50  $\mu\text{g/l}$  permitieron definir el nivel de afloramiento en estos embalses.

La microcistina fue la toxina más común en todos los embalses analizados, alcanzando concentraciones superiores a 50  $\mu\text{g/l}$ . La principal especie responsable de su producción fue *M. aeruginosa*. Se encontró que septiembre y octubre son los meses donde hay mayor

probabilidad de encontrar microcistinas en los embalses de Madrid Existe una gran variabilidad en cuanto a las concentraciones de microcistinas observadas en los embalses de Madrid, destacando el embalse de Santillana por las elevadas concentraciones de microcistinas En este embalse (Santillana), se encontró un cambio en las especies de *M aeruginosa*, definidas por una variación en el gen *mcyB* Esta variación conduce a un cambio en el patrón de toxinas observadas La variación genotípica puede responder a una variación de las condiciones ecológicas Además, se manifestaron concentraciones muy altas de la toxina cilindrospermopsina

#### 3 4 9 Otros países

Otros países donde se han presentado afloramientos de cianobacterias potencialmente tóxicas son Inglaterra, Escandinavia, Finlandia, entre otros (Cuadro 4), en donde los porcentajes de toxicidad han sido altos destacándose los países bajos y Alemania, con un 90% de toxicidad Sin embargo, en Wisconsin, EEUU, el porcentaje de toxicidad es de 27%, pero con un número de sitios mayor donde han ocurrido afloramientos de cianobacterias, al igual que Finlandia

Cuadro 4 Porcentaje de toxicidad por afloramientos de cianobacterias en diferentes países

País	Número de sitios	Toxicidad	Referencia
Inglaterra	78	70%	Reporte NRA, 1990
Escandinavia	51	59%	Cood y cols, 1989
Finlandia	188	44%	Sivoen y cols, 1990
Mar Báltico	25	72%	Sivoen y cols, 1989
Wisconsin, EUA	102	27%	Rapavich y cols, 1990
Países Bajos	10	90%	Leeuwang h y cols, 1983
Países Bajos	29	79%	RIZA, 1994
Hungría	35	82%	Torokne-Kozma y Gabor, 1988
Alemania (RDA)	6	67%	Henning y Khol, 1981
Alemania 1995-96	80	90%	Fastner y cols, 1998
Dinamarca	96	72%	Henriksen, 1997

### 3 5 Registros de cianobacterias en Panama

Hasta donde se investigo, no parece haber estudios de afloramientos de cianobacterias en Panama Sin embargo, en el embalse Gatun, existen reportes en cortos periodos de tiempo y diferentes épocas del año que evidencian la presencia de ciertos géneros y especies de algas y cianobacterias A continuación se describen estos reportes

#### 3 5 1 Ostenfeld y Nygaard, 1925

Estos investigadores realizaron observaciones de algas durante una expedición oceanográfica danesa (1921-1922), que viajó a través de la zona del canal El informe se basó en cinco (5) muestras de agua colectadas, mientras el barco se encontraba en tránsito por el canal Ellos reportaron la presencia de cianobacterias, entre ellas, *Anabaena unispora* (*A unispora*) como especie frecuente y *M aeruginosa* como especie abundante

#### 3 5 2 Prescott, 1936

Este investigador informó que *M aeruginosa* era la especie más común en muestras examinadas

"Esta especie es sumamente comun en mis colecciones, en contraste con el registro anterior de poco comun en todas las muestras" *A Unispora*, anteriormente descrita en Puerto Rico por Gardner (1927) "*Las plantas en mis colecciones tienen esporas que poseen las dimensiones maximas dadas por Gardner para A unispora "Aparecen constantemente en formas estrecha elíptica a formas de husillo "*

#### 3 5 3 Drouet, 1937

El profesor Francis Drouet (1937), escribió sobre 18 especies de *cyanophytas* en la zona del canal Su examinación se hizo, sobre muestras preservadas que habían sido colectadas

por Prescott en 1936. Entre las especies encontradas, se observó *Oscillatoria rubescens* (*O. rubescens*) y *M. aeruginosa*, siendo esta última dominante. Ambas conocidas actualmente, como especies productoras de cianotoxinas.

3.5.4 Prescott, 1951

A fin de obtener una lista más completa de algas del lago Gatun, el profesor Prescott (1939), realizó gestiones para utilizar el Laboratorio de Biología de la isla de Barro Colorado y así, contar con una sede para realizar trabajos de campo más intensivos, durante agosto y septiembre de 1939. Colectadas las muestras, se realizaron identificaciones taxonómicas en la Universidad del Estado de Ohio y el documento resultante en 1951, fue una lista más completa de especies de algas. De este informe (1951), fue evidente que la especie productora de cianotoxinas *M. aeruginosa*, una vez más, tuvo presencia significativa en las muestras colectadas. En el documento se señala sobre afloramientos significativos de esta especie: “*Las Cyanophytas prevalecían sobre las algas verdes, debido al crecimiento relativamente excesivo de M. aeruginosa, que persistió durante agosto y septiembre*”. Prescott tenía cinco (5) estaciones donde colectaba las muestras. La mayoría de las estaciones estaban próximas a la isla de Barro Colorado, excepto la estación cuatro (4), la cual estaba ubicada en el embalse de Miraflores. En esta estación de muestreo, *M. aeruginosa* no tenía una presencia significativa, pero en el informe se menciona que debido a la turbiedad del agua, muchas de las algas fueron encontradas en la superficie y otras fueron encontradas a una profundidad de 3 a 5 metros. De las cianobacterias que listó Prescott, sólo *M. aeruginosa* era considerada una especie productora de cianotoxinas (en base a lo que se conocía sobre el tema en aquel entonces). Otro género, conocido por contener especies que

producían cianotoxinas era *Oscillatoria*, especialmente la especie *O rubescens*. En la familia *Nostocaceae* se enumeraron los géneros *Cylindrospermopsis* y *Anabaena*. Estos géneros encontrados, no eran considerados como productores de cianotoxina, pero sería probable que con el tiempo y cambios en el estado de nutrientes de los embalses, estos pudieran aparecer como géneros productores de cianotoxinas. *Cylindrospermopsis* presentó diferencias en la taxonomía durante los años transcurridos, lo que ha colocado a la especie, *C raciborskii* como productora de cianotoxinas. Esto fue significativo desde que esta especie se encontró en el plancton del lago Gatun.

3 5 5 Diciembre, 1992

En Jones (1992), se publicó un artículo en la revista *The Panama Canal Spillway* de diciembre, el cual hace referencia a la presencia de algas. El artículo menciona que en muchas áreas del lago Gatun se encuentra una especie de alga que podía irritar la piel humana, envenenar y asfixiar organismos acuáticos y dar un mal sabor al agua potable. Se pensaba que algunas irritaciones que habían aparecido (en esos momentos), en los brazos y manos de los empleados de las esclusas de Pedro Miguel podían haber sido producidas por esas algas. El género en mención, fue *Microcystis sp*. Por tal razón los funcionarios de la Comisión del Canal de Panamá recomendaron a los empleados que utilizaban sogas o que pudiesen tener contacto con el agua, tener las debidas precauciones y utilizar ropas adecuadas: manga larga y cremas protectoras o guantes en los brazos y manos (Figura 5).



## "Atlas" plays vital role in Canal maintenance

How do you move eight elephants from one side of the locks to the other? A tricky question, you ask? Well, sort of.

It is estimated that each locks locomotive weighs about as much as eight of the mammoth graypachyderms, and when the Locks Division must move them (locomotives, that is) for sched-



At the Pedro Miguel Locks, crew members busy about getting everything into locks. Jennings' job is "pulling" the "Atlas" into the locks.



"Year turns, boss?"

Former smoker Melvin Otter John Albertson and Joel J. Tolson of the Panama Canal Commission Locks Office put the pressure on Chief Locks Officer Roberto E. Whiting, the only one in their office who still smokes, to kick the habit. Albertson hasn't smoked for three years, and Tolson quit last July. Otter quit last month during the Great American Smokers' campaign. He says he couldn't have done it without the support of co-worker Camelia L. Clobern.

Photo by Kevin Jordan

## Lake algae can be dangerous

A species of algae that can irritate human skin, poison and suffocate aquatic organisms and make drinking water taste bad is found in many areas of Gatun Lake. Some believe that recent irritations on the arms and hands of workers at Pedro Miguel Locks could have been caused by this algae.

The species in question belongs to the genus *Microcystis*. Its cells, and those of other species found with it, grow in colonies of irregular shapes that resemble a disagreeable dark green pea soup. It collects in quiet waters, but can be quickly dispersed by wind, rain

or water currents. It is constantly on the move in areas where there is a lot of water exchange and is very difficult to control in bodies of water as large as Gatun Lake.

Panama Canal Commission officials recommend that recreational swimmers avoid areas where there is an accumulation of algae. Employees who handle ropes or any otherwise come into contact with untreated water should protect themselves with long sleeves and a barrier cream. If exposure does occur -- in either an industrial or a recreational setting -- wash the affected area with clean water.

Figura 5 Algas en el lago pueden ser peligrosas Revista del canal de Panama, volumen XXX, N°25

### 3 5 6 Registros fotográficos, Gamboa 1998-2000

Unidades operativas del Canal de Panamá, realizaban sobrevuelos en el área de Gamboa con el fin de evaluar las áreas donde la vegetación acuática, que crecía, pudiese interferir con el tráfico de barcos por el canal. La Unidad de Control y Respuesta a Contaminación del Canal de Panamá, cuentan con una serie de imágenes (Figura 6 y 7), del embalse Gatun (área de Gamboa), durante los años 1998 a 2000, en el cual se observan a lo largo del cauce de navegación manchas de color verde de las cuales se desconocía su presencia. Algunos de los trabajadores del canal pensaban que esto era consecuencia de productos químicos que se agregaban al agua para el control de la vegetación acuática, sin embargo, se presume que estos han sido afloramientos esporádicos de cianobacterias del género *Microcystis sp*.

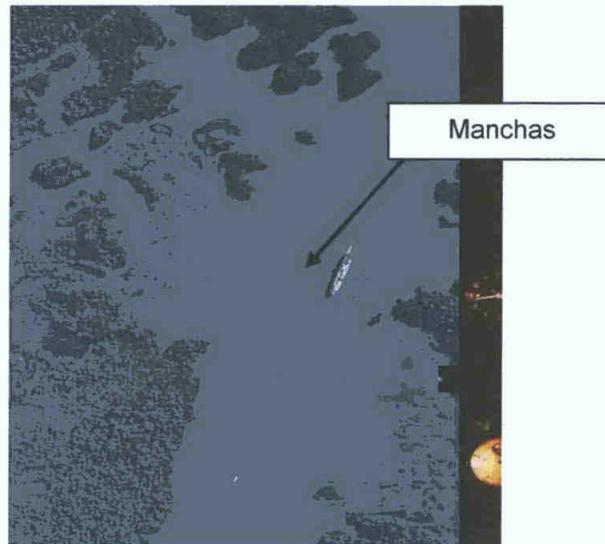


Figura 6. Manchas verdes en el cauce de navegación del embalse Gatún, posible afloramiento de cianobacterias *Microcystis sp.* Fuente: Unidad de Control y Respuesta a Contaminación del Canal de Panamá.

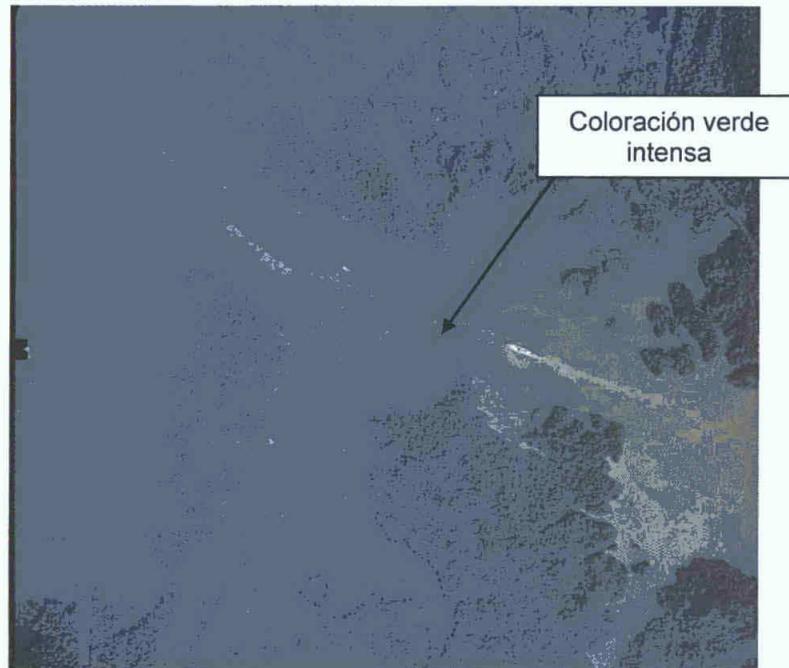


Figura 7. Manchas verdes en el cauce de navegación del embalse Gatún (área de Gamboa), posible afloramiento de cianobacterias *Microcystis sp.* Fuente: Unidad de Control y Respuesta a Contaminación del Canal de Panamá.

3 5 7 Estudios de Abundancia y caracterización cualitativa de las microalgas observadas en seis estaciones del embalse Gatun, como parte del proyecto Profundización del cauce de navegación del canal, 2002-2004

En los estudios de abundancia y caracterización cualitativa de las microalgas observadas en seis estaciones del embalse Gatun, como parte del proyecto Profundización del cauce de navegación del canal, en el tercer análisis temporada lluviosa, julio de 2003, se registra un total de 27 especies pertenecientes a 19 géneros y clasificados en cinco divisiones de microalgas, entre las que se encontraban las *Cyanophytas*. Estos estudios fueron realizados por la Universidad de Panamá en conjunto con la Autoridad del Canal de Panamá. Este estudio cuenta con dos estaciones ACP 21 y 22, las cuales coinciden con el área de Gamboa (desembocadura del Chagres), próxima a la toma de agua de Gamboa y la toma de agua de Paraiso. En estos resultados, se detectó la presencia de *M aeruginosa* siendo muy notoria por sus altas contribuciones a las cuantificaciones en las estaciones ACP 18 (Boya 47), 20 (Boya 82) y ACP 22 (toma de agua de Paraiso), con un 66,66% en esta última.

Según Aguilar (2003), las *Cyanophytas* con reducido número de especies en general, adicionaron valores significativos de células a los conteos y frecuencia de *M aeruginosa* altas, lo que constituye gran parte del material sobrenadante de cada muestra, dada su capacidad de flotabilidad. Tres especies, *Pleodorina californica* (*P californica*), *Aulacoseira ambigua* (*A ambigua*) y *M aeruginosa*, representantes de las divisiones *Chlorophyta*, *Bacillariophyta* y *Cyanophyta*, respectivamente, se constituyeron en las taxa que exhibieron mayores frecuencias de células en las cuantificaciones realizadas.

En el estudio de abundancia y caracterización cualitativa de las microalgas observadas en el embalse Gatun, informe II de diciembre 2002 se observaron tres divisiones de algas

*Bacillariophyta*, *Chlorophyta* y *Cyanophytas* Las especies *M aeruginosa* (cianobacterias), y *A granulata* (diatomea), fueron las especies dominantes en las muestras Segun Aguilar (2003), los porcentajes calculados, para cada especie de las tres divisiones de microalgas por estación permitió determinar que el mayor aporte de células-colonias correspondio a la muestra ACP22 (toma de agua de Paraiso), con un 88.65%, en un segundo lugar de abundancia se ubica a las *Cyanophytas* en la estacion ACP21 (Desembocadura del Chagres), con un 69%

Segun Ostenfeld y Nygaard (1925), consideraron a *M aeruginosa* como rara en todas las muestras, pero presente casi en un numero constante En sus registros incluyeron otras dos especies de *Microcystis* (*M robusta*, y *M pulvereae*), de la cual *M pulvereae* indicaron inseguridad en la identificación Segun Prescott (1936) y Aguilar (2003), *M aeruginosa* se observó como una especie extremadamente comun en ambos estudios Los estudios realizados por Prescott (1951), incluyen muestras colectadas en el embalse Gatun, Miraflores y algunos rios aledaños, incluyendo al rio Chagres Considerando las especies más comunes encontradas en Aguilar (2003), se observo la presencia de *M aeruginosa* formando “afloramientos” en el embalse Miraflores durante los meses de agosto y septiembre

Segun Prescott (1978), considera que en el lugar donde prosperan algunas especies del genero *Microcystis* (por ejemplo *M aeruginosa*), el hábitat es completamente dominado por la cianobacterias, debido a la exclusion de casi todos los otros géneros

Segun Aguilar (2003), para efecto de su estudio, en las seis muestras colectadas en el embalse Gatún, se le atribuye a la cyanophytas *M aeruginosa* la “naturaleza babosa” ya que sus colonias se encuentran rodeadas por una matriz mucilaginosas

Consecuentemente, la suspensión del material algal en las muestras, se debe al mucilago y a las pseudovacúolas presentes en cada célula. Según Prescott (1973), las pseudovacúolas le confieren menor densidad y mayor flotabilidad a las colonias.

En el estudio de abundancia y caracterización cualitativa de las microalgas observadas en el Lago Gatun, informe III (II análisis, temporada seca), de junio 2003, los resultados obtenidos para los mismo sitios de muestreo que en septiembre 2002, fueron similares en virtud de que las diatomeas, algas verdes y algas verde-azules (*cyanophytas*), presentaron igual orden de abundancia. En este último informe se asevera que uno de los principales orígenes del sabor y olor en el agua, se produce como resultado del metabolismo de determinados microorganismos, especialmente fitoplanctónicos, como lo son ciertos taxa de microalgas verde-azules, de algas verdes, de diatomeas y de flagelados. Además de que, *M. aeruginosa* fue la única especie de *cyanophytas* que persistió en las observaciones de las temporadas lluviosa y seca, aunque su frecuencia fue mínima en este estudio, si la comparamos con la alta frecuencia exhibida en el muestreo del 2002.

Atendiendo a las particularidades que algunas microalgas introducen al agua donde se desarrollan, se puede decir que a nivel genérico, entre las diatomeas se encuentran algunas especies de *Synedra*, las cuales producen sabores y olores desagradables. El alga verde-azul *Microcystis*, al igual que otros géneros de este grupo y de las algas verdes como *Staurastrum*, también son responsables de tales fenómenos.

Estudios realizados en el embalse Gatun durante la temporada seca por Aguilar (2002), reflejaron la existencia de tres grupos de microalgas *chlorophyta*, *bacillariophyta* y *cyanophyta*, donde el primero fue el que agrupó la mayoría de las especies. Posteriormente, durante la temporada lluviosa en (Aguilar, 2003a), se observaron cuatro

divisiones, las cuales se presentan ordenadas en forma decreciente de acuerdo a la que apporto el mayor número de taxa *chlorophyta*, *bacillariophyta*, *cyanophyta* y *dinophyta*. En otros análisis de las muestras del embalse Gatun, colectadas dos meses después durante la temporada lluviosa del 2003, se determinaron cinco divisiones de microalgas, con dominancia de las *bacillariophyta*, seguidas por las *chlorophyta*, *cyanophyta*, *dinophyta* y *chromophyta* (Aguilar, 2003b).

En los estudios de colecta y análisis de muestras biológicas de los embalses Gatun y Miraflores, (Nº 1, fitoplancton), durante la temporada lluviosa de agosto 2004, se ha reportado la presencia del grupo de cianobacterias. De los sitios de muestreo, Gamboa y Paraiso-Pedro Miguel son de interés en nuestra revisión. Durante la colecta (día 16 de agosto), el día se encontraba nublado y el agua turbia. En el área de Gamboa había lluvia dispersa. Los resultados encontrados para este trabajo, demostraron que las especies con mayor ocurrencia en términos de frecuencia absoluta en el embalse Gatun corresponden a *Fragilaria crotonensis* (*F. crotonensis*), *A. granulata* y *M. aeruginosa*. En el caso del embalse Miraflores, la *cyanophyta M. aeruginosa* fue el taxón de mayor ocurrencia. Según Aguilar y Pérez (2004), *M. aeruginosa*, fue observada en casi todas las estaciones (Cuadro 5). Al momento de la colecta en la estación Isla Guarapo (embalse Gatun), se observaron flotando en la superficie pequeños paquetes de material filamentoso, de aproximadamente 1,0-2,0 cm de diámetro y de color verde-azul. Los análisis de estas muestras revelaron la presencia y abundancia de *cyanophytas* filamentosas (*Lyngbya*, *Oscillatoria* y *Nostoc*), lo que podría corresponder con lo observado en el campo.

Cuadro 5 Cianobacterias reportadas para el embalse Gatun y Miraflores por diversos autores Fuente Informe de Colecta y Analisis de muestras biologicas de los lagos Gatun y Miraflores N°1 Fitoplancton, 2004

ESPECIES	OSTENFEL D NYGAARD 1925	PRESCOT T 1936	PRESCOT T 1951	PRESCOT T 1955	AGUILA R 2002	AGUILA R 2003 a	AGUILA R 2003 b
CYANOPHYT A							
<i>Chroococcus</i> cf <i>dispersus</i>			X				
<i>Chroococcus</i> <i>limneticus</i>		X	X			X	
<i>Microcystis</i> <i>aeruginosa</i>	X	X	X	X	X	X	X
<i>Nostoc</i> cf <i>planctonicum</i>						X	
<i>Oscillatoria</i> <i>margaritifera</i>					X		X

### 3 5 8 Registros de algas y cianobacterias realizados por el Canal de Panamá, Unidad de Calidad de Agua

El Canal de Panama administra los recursos hídricos de la cuenca para el consumo humano, la operacion del Canal y la generacion de energia. Al brindar el servicio de agua potable cumple con lo establecido por los organismos rectores nacionales (MINSAL y ASEP), en cuanto al aseguramiento de la calidad del agua de consumo. Como parte de su programa cuyo proposito es cumplir con la resolución No 507 del Ministerio de Salud (30 de diciembre de 2003), que regula la calidad del agua potable, evalua parámetros de calidad biológica, entre ellos las algas y cianobacterias.

3 5 8 1 Octubre 2004

Se colectaron muestras de agua de diferentes sitios de muestreos, entre ellos la toma de agua de Paraiso y Gamboa. El muestreo fue realizado el 10 de octubre de 2004. De los resultados encontrados podemos indicar que en la toma de agua de Gamboa hay una mayor variabilidad de especies de cianobacterias, mientras que en la toma de agua de Paraiso solo estuvo presente el género *Microcystis sp* (Cuadro 6)

Cuadro 1 Principales generos y especies de cianobacterias presentes en la toma de agua  
Cuadro 6 Principales géneros y especies de cianobacterias en la toma de agua de Gamboa y Paraiso

	<b>Género</b>	<b>Especie</b>
GRAW	<i>Aphanocapsa</i>	<i>spp &lt;2urn</i>
	<i>Aphanothece</i>	<i>sp</i>
	<i>Aphanizornenon</i>	<i>sp</i>
	<i>Chroococcus</i>	<i>rninutus</i>
	<i>cyanophyte unicell</i>	<i>sp</i>
	<i>cyanophyte filament</i>	<i>sp</i>
	<i>Aphanothece</i>	<i>clathrata</i>
	<i>Merismopedia</i>	<i>punctata</i>
	<i>Microcystis</i>	<i>srnithu</i>
	<i>Radiocystis</i>	<i>sp</i>
	<i>cyanophyte filarnent</i>	<i>sp</i>
	<i>Lyngbya</i>	<i>birgei</i>
	<i>cf Lirnmothrix</i>	<i>sp</i>
	<i>Anabaena</i>	<i>sp</i>
	<i>Cylindrospermopsis</i>	<i>raciborsku</i>
PRAW	<i>cyanophyte unicell</i>	<i>sp</i>
	<i>Microcystis</i>	<i>sp</i>

3 5 8 2 Junio 2006

Se colectaron muestras de agua de diferentes sitios de muestreos. Uno de los sitios corresponde a la toma de agua de Paraiso. El muestreo fue realizado el 19 de junio de 2006. De los resultados, podemos indicar que el principal género encontrado de interés por su potencial para producir toxinas fue *Microcystis sp* (Cuadro 7)

Cuadro 7 Cianobacterias presentes en la toma de agua de Paraiso, junio 2006

	<b>Género</b>	<b>Especie</b>
PRAW	<i>Merismopedia</i>	<i>tenuissima</i>
	<i>cyanophyte unicell</i>	<i>sp</i>
	<i>Pseudanabaena</i>	<i>limnetica</i>
	<i>Microcystis</i>	<i>sp</i>

3 5 8 3 Agosto, 2006

Durante las giras de colecta de muestras para el Programa de Vigilancia y Seguimiento de la Calidad de Agua en la cuenca del canal (PVSCA), personal de la Unidad de Calidad de Agua capturo gráficamente momentos en los cuales se observaba en el área de Gamboa, cerca al muelle de despacho de combustible de embarcaciones, una excesiva biomasa y manchas de coloración verde en el agua, las cuales sugerian un crecimiento excesivo de la cianobacteria *Microcystis sp* (Figura 8)



Figura 8 Afloramiento de cianobacterias en el área de Gamboa (muelle), embalse Gatun, posible afloramiento del género *Microcystis sp* 23 de agosto de 2006 Foto tomada por Iván Domínguez, ACP

3 5 8 4 Enero, 2007

El día 5 de enero de 2007 se publicó en periódicos locales La Prensa y El Siglo (Figura 9), algunas quejas y/o molestias por parte de los consumidores de agua potable de ciertas áreas de la ciudad de Panamá Con el propósito de investigar el episodio inusual de mal

sabor y olor del agua cruda y potable durante la primera semana de enero 2007, se hicieron análisis de algas y cianobacterias

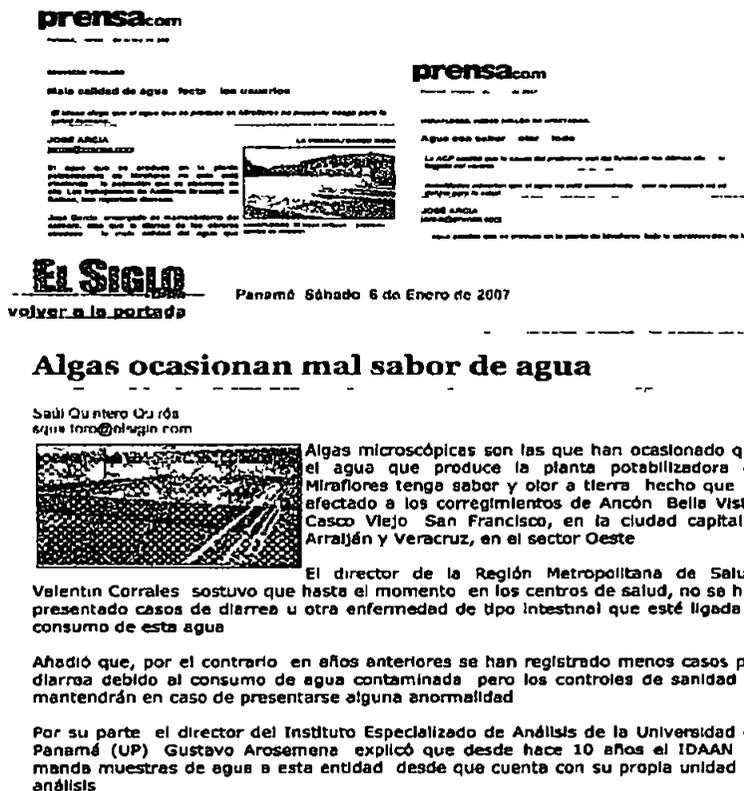


Figura 9 Periódicos locales (La Prensa y El Siglo), informan quejas sobre sabor y olor en el agua debido a la presencia de algas

El Canal de Panamá, a través de la Unidad de Calidad de Agua, efectuó giras de colecta de muestras para realizar análisis de laboratorio y medición de parámetros *in situ* en la toma de agua de Paraiso. Entre los análisis realizados figuraban pruebas para determinar la concentración de nutrientes (nitritos, nitratos y fosfatos), para determinar concentraciones de clorofila *a* y presencia de fitoplancton. Las muestras de fitoplancton fueron revisadas preliminarmente en el laboratorio de la Unidad de Calidad de Agua y posteriormente, enviadas a la Universidad de Panamá para su respectiva clasificación.

El día 5 de enero, se observó gran cantidad de algas en la superficie del agua (Figura 10), Estas algas cubrían gran extensión de la superficie del área. En la siguiente visita a la toma de agua, día 8 de enero; estas, casi no se observaron.



Figura 10. Manchas de color verde en la toma de agua de Paraíso, presencia de algas en la superficie.

Fotografías de diferentes fechas y lugares fueron tomadas por personal de la Unidad de Calidad de Agua del Canal de Panamá. En las fotos, se observa: excesiva biomasa y manchas de coloración verde en el agua, las cuales indicaban un crecimiento excesivo de la cianobacteria *Microcystis sp* (Figura 11 y 12).



Figura 11. Embalse Gatún, área de Gamboa 23 de octubre de 2007 (izquierda), Toma de agua de Paraíso, afloramiento 25 de octubre de 2007 (derecha).

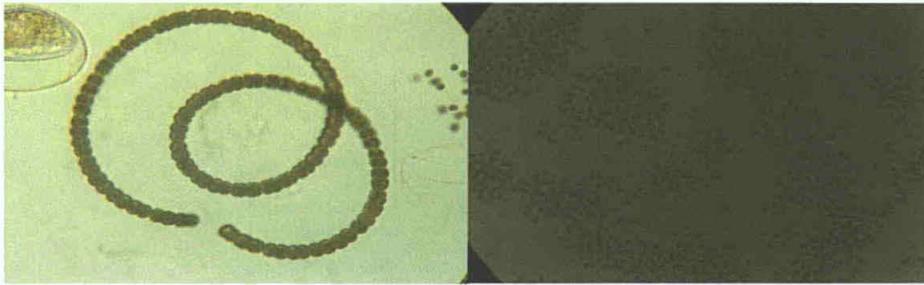


Figura 12. Observación bajo el microscopio de una muestra colectada en la Toma de agua de Paraíso (5 de enero de 2007).

Los resultados de los análisis físico-químicos arrojaron valores dentro de rangos aceptables para agua natural con poca variación con respecto a los datos históricos obtenidos en el PVSCA, del sitio toma de agua de Paraíso. De acuerdo a las observaciones microscópicas preliminares, realizadas en el laboratorio de calidad de agua para detectar la presencia de microalgas, se presumió que las muestras colectadas contenían dominancia de células del género *Microcystis* sp. Las muestras de agua evaluadas en la Universidad de Panamá, confirmaron la presencia de *M. aeruginosa* como alga mayoritaria y una especie asociada denominada *Phormidium muscicola* (*P. muscicola*) como alga minoritaria, ambas pertenecientes a la división cyanophytas. Según los especialistas de la Universidad de Panamá, en las ilustraciones de la literatura consultada es común encontrar esta asociación. En la figura 13, a la izquierda se muestra una colonia de *M. aeruginosa*, a la derecha, la asociación de esta especie con *P. muscicola*.



Figura 13. Colonia de *Microcystis aeruginosa* (izquierda), asociación entre *M. aeruginosa* y *Phormidium muscicola* (derecha), foto de E. Aguilar (UP).

#### 3.5.8.5 Octubre, 2008

Manchas verdes sobre la superficie del agua fueron observadas el 10 de octubre de 2008 (Figura 14), de la cual se colectó muestras para su posterior revisión en el laboratorio de la Unidad de Calidad de Agua del Canal de Panamá; de las observaciones, se puede indicar que fue evidente la presencia de *Microcystis sp* como género dominante en la muestra (Figura 15).



Figura 14. Toma de agua de Paraíso, coloración verde en el agua (10 de octubre de 2008)



Figura 15. Observación al microscopio de una muestra colectada en la toma de agua de Paraíso (10 de octubre de 2008).

Al día siguiente, estas cianobacterias se encontraban ausentes en la toma de agua de Paraíso (Figura 16, izquierda), sin embargo, se observaban espumas sobre la superficie del agua.

Días después (21 de octubre de 2008), se observó pocas manchas dispersas, en el área de Pedro Miguel; frente al edificio 105, Unidad de Hidrología Operativa. Sitio donde se abordan lanchas (Figura 16, derecha).



Figura 16. Toma de agua de Paraíso, nótese la formación de espuma en la superficie del agua (izquierda). Área de Pedro Miguel, frente al edificio 105, 21 de octubre de 2008 (derecha).

### 3.6 Factores ambientales que influyen en la presencia de cianobacterias

Las cianobacterias, bajo ciertas condiciones ambientales, resultan un grupo competitivamente exitoso en relación a otros grupos del fitoplancton. Temperaturas

elevadas, alta carga de nutrientes, baja relación nitrógeno-fosforo (N P), pH alcalino, capacidad para fijar nitrógeno atmosférico, presencia de vesículas de gas, capacidad para crecer y reproducirse bajo distintas condiciones de luz, calma ambiental, bajo caudal son algunas características que dan ventajas a las cianobacterias (Gianuzzi *et al*, 2009)

### 3.6.1 Oxígeno disuelto

La distribución del O<sub>2</sub> en el ecosistema acuático se da mediante la fotosíntesis y por la circulación y movimiento del agua, provocados por diferencia de densidad de las capas de agua o por los vientos. Un exceso de fotosíntesis, sobresaturación en O<sub>2</sub> el sistema acuático, provocando un agotamiento del CO<sub>2</sub> y un aumento del pH en el agua. Una actividad biológica de esta naturaleza, cambia drásticamente la química del agua y es propia de un ecosistema que ha perdido su equilibrio, debido a la eutrofización o enriquecimiento con nutrientes que a su vez promueve la producción de materia orgánica. La eutrofización produce un consumo de oxígeno en el sedimento y en el agua del fondo lo que conduce a la anoxia. Esto puede inferir en los procesos de nitrificación, permitiendo la acumulación de amonio que es rápidamente utilizado por las algas y cianobacterias. A su vez, la anoxia promueve una serie de mecanismos físico-químicos que culminan con la liberación de fosfatos de los flocos de hidróxido de hierro que lo mantenían retenido en el sedimento bajo condiciones de oxigenación. Esta “carga interna” de fosforo contribuye a estimular aún más la producción primaria y fomentar las floraciones de cianobacterias (Roldan, 1992)

### 3.6.2 Transparencia

La transparencia del agua es generalmente un índice importante de la condición y productividad en los ecosistemas acuáticos. Puede ser afectada principalmente, por tres

diferentes factores algas, sedimento y/o el color del agua La transparencia es una medida de la penetración de luz en el cuerpo de agua Esta medida es muy importante para identificar las zonas capaces de sostener la actividad fotosintética y es la región en la columna de agua donde desaparece el 99% de la luz que incide sobre la zona eufótica o fótica Esta zona cambia a través del día y es diferente de un cuerpo de agua a otro Una de las principales razones por las cuales se observa una disminución en las mediciones del disco de Secchi en diferentes estaciones del año, se debe al aumento del plancton (fitoplancton y zooplancton) Sin embargo, otras razones por las cuales se observan cambios en la transparencia del agua son reducción en la entrada de nutrientes al reservorio, sucesión estacional de algas, incremento en la abundancia de algas de vida libre, erosión en la línea litoral o erosión de alguna actividad que se desarrolle cerca del lago o embalse, recirculación del sedimento del fondo por los motores de los barcos, botes, etc , descoloración del agua por escorrentía y/o descomposición de plantas, incremento en la turbiedad, reducción de las poblaciones del zooplancton, etc

### 3.6.3 Radiación solar

La radiación solar provee la energía necesaria para el proceso de fotosíntesis, es la principal fuente de calor en cuerpos de agua naturales y genera el calor que controla los patrones de viento en el planeta En términos generales, la actividad fotosintética aumenta en función de la intensidad lumínica, hasta el punto donde el aparato fotosintético se satura de luz, sin embargo, esto puede variar de un grupo fototrófico a otro Por ejemplo, las cianobacterias llevan a cabo fotosíntesis oxigénica a altas intensidades de luz y cambian a un proceso de fotosíntesis anoxigénica a bajas intensidades de luz La habilidad de los fotótrofos para utilizar la energía lumínica disponible depende

principalmente de su habilidad para absorber las longitudes de onda disponibles lo cual está a su vez determinado por su contenido de pigmentos fotosintéticos. Las algas y las cianobacterias absorben preferentemente la radiación con longitudes de onda cortas (azul). La luz con longitud de onda roja e infrarrojo no es absorbida por el fitoplancton ubicado en la parte superior de la columna. Para los organismos que ocupan o transitan por la superficie del agua, la exposición a la luz ultravioleta (UV) puede ocasionarles la muerte o mutaciones con efectos subletales. Inclusive, la exposición a intensidades altas de luz visible puede ser en detrimento, para los organismos, en la medida que se producen reacciones de fotooxidación que destruyen o afectan la actividad de pigmentos fotosintéticos, enzimas y otras macromoléculas importantes. Entonces, desde este punto de vista, la radiación solar puede convertirse en un factor que genera tensión ambiental. Algunos microorganismos fototrófico exhiben la capacidad de responder a estímulos de luz alejándose o acercándose a una fuente de iluminación (comportamiento fototáctico). Dicho comportamiento conduce a migraciones verticales, orientadas por gradientes de intensidad lumínica. De esta forma, microorganismos móviles y microorganismos que pueden controlar su posición en la columna de agua utilizando vesículas de gas, como es el caso de algunas cianobacterias, se localizan a lo largo del perfil de profundidad en aquellas zonas donde la intensidad lumínica y la concentración de nutrientes limitantes son óptimos para su proceso fotosintético (Anónimo, 2002).

#### 3.6.4 Turbiedad

Se entiende como la falta de transparencia de un líquido, debido a la presencia de partículas en suspensión. La turbiedad registrada para una muestra de agua depende de factores tales como tamaño, forma y propiedades refractivas del material particulado.

La turbiedad del agua es causada específicamente por materiales suspendidos abióticos tales como arcilla, cieno (aluvión), fragmentos finos de materia orgánica e inorgánica, compuestos orgánicos solubles con calor (por ej. taninos, ácidos y sales), y material suspendido biótico como el plancton y otras entidades microscópicas (por ej., polen y debris vegetal). En lagos o embalses, la razón más importante de las variaciones en este parámetro es causado por los cambios estacionales en el crecimiento de algas. Temperaturas altas prolongadas a lo largo del día, liberación de nutrientes debido a la descomposición de materia orgánica (nitrógeno y fósforo), pueden causar afloramientos de algas que pueden incrementar la turbiedad y la concentración de sólidos suspendidos en el agua (Anónimo, 2002)

### 3.6.5 pH

El pH del agua determina la solubilidad y la capacidad biológica de constituyentes químicos tales como nutrientes y metales pesados. Por ejemplo, influye en la forma como se encuentre el fósforo más abundante en el agua. También, el pH determina si la vida acuática puede darse en el ecosistema. La fotosíntesis usa moléculas de hidrógeno, lo cual causa que concentraciones de iones hidrogeniones decrezcan y así, se incremente el pH. Por esta razón, el pH puede ser alto durante horas del día y durante el afloramiento, cuando la fotosíntesis está a su máximo. La respiración y los procesos de descomposición, bajan el pH. El pH puede variar con la profundidad en un lago o embalse, esto es debido a los cambios que se den en el proceso de fotosíntesis y otras reacciones químicas. Aunque pequeños cambios en el pH no tienen ningún impacto en la vida acuática, hay una gran influencia en la disponibilidad y solubilidad de todas las formas químicas (nutrientes), en el lago o embalse. Por ej. un cambio en el pH puede

incrementar la solubilidad del fósforo, haciendo que este este mas disponible para el crecimiento de las plantas, resultando en una demanda de oxígeno disuelto

Segun Olofsson (1980) y Shapiro (1990), En Pizzolon (1996) el pH elevado favorece el desarrollo de cianobacterias, por su capacidad para transformar los iones bicarbonato y carbonato en bioxido de carbono Por otro lado, Fogg *et al*, (1976) y Skulberg *et al*, (1984) En Pizzolon (1996), que de hecho, las cianobacterias son las unicas algas que desarrollan biomasas importantes en ambientes naturalmente alcalinos y salinos

### 3 6 6 Nutrientes

#### 3 6 6 1 Nitratos

De todas las formas de nitrógeno, los nitratos y el ion amonio son los mas importantes para los ecosistemas acuáticos, por cuanto constituyen la fuente principal para los organismos residentes en este medio En medios aerobicos, los nitratos se convierten en la principal fuente de nitrógeno para el fitoplancton Al disociarse el acido nitrico ( $\text{HNO}_3$ ), en el agua produce  $\text{NO}_3^-$  (nitratos), los cuales constituyen la forma quimica bajo la cual las algas y las plantas pueden incorporar el nitrogeno en su citoplasma y utilizarlo para la sintesis de proteinas Los nitratos constituyen el ultimo estado de oxidación del nitrógeno y es la forma como la utilizan directamente las plantas y las algas para sintetizar las proteinas Algunos microorganismos como ciertas bacterias y cianobacterias tienen la propiedad de fijar el nitrógeno atmosférico, es decir, transformar el nitrogeno molecular en nitrógeno orgánico en su citoplasma a través del proceso de la sintesis de proteínas Entre las cianobacterias, se encuentran los generos *Nostoc*, *Anabaena* y *Aphanizomenon* El nitrógeno puede ser tomado por las algas y plantas en tres formas como nitratos ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), como ion amonio ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) y como nitrógeno molecular ( $\text{N}_2\text{-N}$ )

### 3 6 6 2 Nitrógeno total

Es una medida de todas las formas de nitrógeno (orgánico e inorgánico) El metabolismo del nitrógeno en cianobacterias y algas eucariotas es similar La principal diferencia es que el nitrógeno es un elemento esencial para la síntesis de las vesículas de gas y que algunas cianobacterias puedan fijar nitrógeno atmosférico Esta capacidad y la facultad de migrar en la columna de agua para acceder a las fuentes de nitrógeno inorgánico les permite crecer en ambientes con relaciones de N P menores a diez (10) La fijación de nitrógeno atmosférico, se considera una ventaja de las cianobacterias sobre las algas eucariotas para crecer en ambientes pobres en nitrógeno (Schindler, 1977)

### 3 6 6 3 Ortofosfatos

Es una medida de la forma inorgánica oxidada de fósforo soluble Esta forma de fósforo, es la captación más fácilmente disponible para la fotosíntesis Altas concentraciones de ortofosfato, se asocian con afloramientos de cianobacterias El fósforo es el menos abundante y al mismo tiempo, es el factor más limitante en la productividad primaria El fósforo se encuentra en las rocas principalmente como ortofosfato  $(\text{PO}_4)^{-3}$  La principal fuente de este ion son las rocas ígneas, una de las cuales es la "apatita"  $(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)^{-3})$

En la actualidad, el hombre también está agregando fósforo a los ecosistemas acuáticos a través de los fertilizantes y detergentes, utilizados en la agricultura y en la industria El fósforo se encuentra en la naturaleza bajo dos formas principales a saber ortofosfatos y polifosfatos (Roldan, 1992)

### 3 6 6 4 Fósforo total

El fósforo es un elemento frecuentemente limitante para el crecimiento del fitoplancton en lagos y embalses Por lo tanto, los sistemas celulares de incorporación del nutriente se

activan y el ion fosfato ( $\text{PO}_4^{-3}$ ), disponible, es rapidamente utilizado por los organismos (Rigler, 1956) Como consecuencia, la concentracion de  $\text{PO}_4^{-3}$  ambiental decrece hasta un nivel estacionario, llamado valor umbral (Falconer, 1989) La incorporacion y el crecimiento posterior es posible solo si la concentracion ambiental de  $\text{PO}_4^{-3}$  excede el valor umbral, el cual usualmente se encuentra por debajo de los limites de deteccion de los métodos analiticos convencionales (Rigler, 1956, Falconer, 1989, Aubriot, 2000), por lo tanto, la no deteccion de  $\text{PO}_4^{-3}$  mediante espectrofotometria, no implica que el nutriente no este disponible, ya que puede ser incorporado por el fitoplancton hasta dos órdenes de magnitud por debajo del limite analitico (Aubriot, 2008) Investigaciones con cultivos de unas cianobacterias (*Synechococcus leopoliensis*) y otra filamentosa (*A. variabilis*), determinaron que estas se adaptan a las condiciones variables del suministro de  $\text{PO}_4^{-3}$  mediante el aumento de la eficiencia de incorporacion, esta capacidad permite que las poblaciones puedan crecer a expensas de bajos o esporádicos aportes de nutrientes (Aubriot, 2008)

### 3 6 7 Clorofila *a*

Los principales pigmentos presentes en las cianobacterias son clorofilas (*a*, *b*, *c* y *d*), y carotenoides (carotenos y xantofilas) Las variaciones en la concentración de los pigmentos dependerán del metabolismo de las algas y de factores fisico-quimicos como la luz, temperatura, nutrientes, etc Las cianobacterias tienen clorofila *a*, pigmento universal para realizar la fotosíntesis aeróbica y una serie de pigmentos accesorios y protectores Algunas especies pueden tener también clorofila *b* (grupo antiguamente llamado proclorofita) y unas cianobacterias marina presentan clorofila *d* El tipico color verde-azul de las cianobacterias se debe a la presencia de las ficobilinas, pigmentos

accesorios a la clorofila *a*. Estos pigmentos están asociados a proteínas y se componen de tres grupos principales: las aloficocianinas, ficocianina y ficoeritrina. La proporción de estos pigmentos puede ser alterada para aumentar la absorción de la luz en el espectro visible.

Las ficobilinas solo se encuentran en las cianobacterias y dos grupos de algas eucariotas (criptofitas y rodofitas). Asimismo, las cianobacterias poseen carotenoides que se pueden encontrar en las algas eucariotas, pero también poseen otros que son exclusivos de las cianobacterias: carotenoides glicosídicos (Francis *et al.*, 1970). Estos, cumplen principalmente, una función de protección para las altas intensidades lumínicas, actuando como antioxidantes al desviar el flujo de electrones en exceso para evitar que dañen los fotosistemas (Edge *et al.*, 1997). Por otro lado, algunos carotenoides de las cianobacterias pueden cumplir funciones protectoras a bajas temperaturas (Várkonyi *et al.*, 2002), o actuar como pigmentos accesorios de la clorofila *a* (Hischberg y Chamovitz, 1994).

### 3.6.8 Temperatura

El rango de temperatura en el cual se produce la tasa máxima de crecimiento se encuentra entre 25 y 30°C (Bonilla, 2009), según resultados experimentales con cultivos de cianobacterias (Reynolds, 2006). Se considera que las cianobacterias prefieren temperaturas más altas que las algas eucariotas (Dokulil y Teubner, 2000). Sin embargo, los rangos óptimos de temperaturas de las cianobacterias no termofílicas serían similares a los rangos de las algas eucariotas, esto indica que no habría diferencias en cuanto a preferencia de temperatura. Estas son tolerantes a un amplio rango de temperaturas (Vincent, 2000).

Temperaturas altas, no serían la causa como tal de un afloramiento, altas temperaturas estarían asociadas con otros fenómenos, como la estratificación térmica y cambios en la profundidad de las zonas de mezcla, lo que puede favorecer el desarrollo de cianobacterias con vesículas de gas (Oliver y Gant 2000, Huisman *et al* , 2005)

### 3.7 *Microcistinas*

Las microcistinas son metabolitos secundarios hepatotóxicos producidos por ciertas cianobacterias. Se han descrito cerca de un centenar de microcistinas. Importante a destacar es, que no es necesario que se produzca una gran proliferación de cianobacterias para considerar que la población presente es tóxica.

Las microcistinas están constituidas por aminoácidos proteicos y no proteicos, cuya fórmula es D-Ala-X-Masp-Z-Adda-D-Glu-Mdha, donde X y Z son L-aminoácidos que varían en función de los distintos tipos de microcistinas. Se conocen más de 70 variantes de microcistina diferentes, las más estudiadas son MC-LR, MC-RR, MC-YR, de las cuales la más abundante es la microcistina LR (X=Leu, Z=Arg). Las microcistinas no se excretan al medio o si lo hacen es en muy pequeña tasa, únicamente se liberan tras la muerte de las células que las contienen. Se ha sugerido que podría haber exportación de estos péptidos al medio, pero la doctrina general es que permanecen en el interior celular. La microcistina es la toxina más implicada en envenenamiento de animales y humanos, es producida por varios géneros de cianobacterias como *Microcystis*, *Anabaena*, *Planktothrix* y *Oscillatoria*. Una misma cepa productora puede producir más de una variante de microcistina a la vez. Para la prevención de los “*blooms*” tóxicos sería muy importante conocer los factores que regulan la síntesis de las toxinas. Se ha pensado que la variación de la toxicidad pueda deberse a cambios en la composición de las especies de

cianobacterias, así como a diversos factores ambientales y nutricionales. Las microcistinas se han considerado como metabolitos secundarios, aunque, dada la complejidad de su estructura y el sistema de biosíntesis tan complicado que presentan, parece extraño que las cianobacterias productoras sinteticen este compuesto en cantidades tan elevadas si no les aporta ningún beneficio (Young *et al*, 2005). Por eso, se lleva especulando muchos años sobre el posible papel que pueden ejercer estas moléculas en las células productoras así como en el exterior celular. Se han propuesto varias funciones para ellas sin haberse llegado aún a una conclusión clara.

En el año 2000 se dio a conocer por primera vez la organización estructural y la secuencia completa del grupo de genes involucrados en la biosíntesis de microcistinas (genes *mcy*), en la cepa *M. aeruginosa* PCC 7806 (Carrasco, 2007) (Fig. 17).

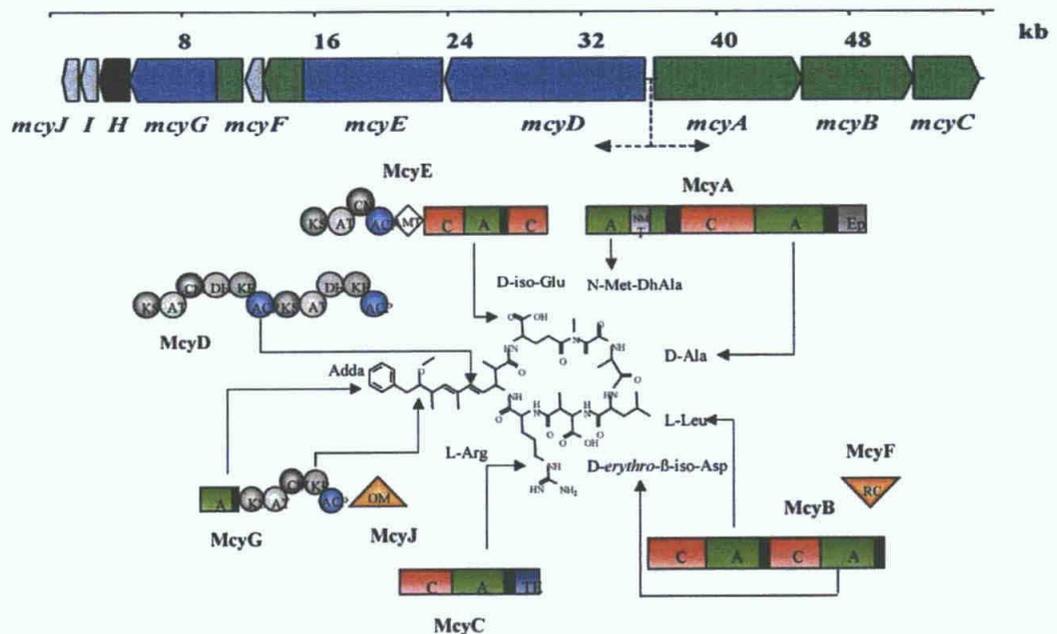


Figura 17. *M. aeruginosa* PCC7806: Operón *mcy* (55 Kb) compuesto por 10 genes dispuestos en dos operones que se transcriben bidireccionalmente (*mcyABC* y *mcyDEFGHIJ*) (Carrasco, 2007).

Las microcistinas no están codificadas en el ADN, son sintetizadas por una ruta alternativa a la vía ribosomal. La síntesis implica dos tipos de enzimas: sintetetas peptídicas no-ribosómicas (NRPS), y las poliketido sintetasas (PKS). Las NRPS son una gran familia de proteínas modulares, en las que cada módulo se encarga de la activación, modificación y condensación de cada uno de los aminoácidos que forman los péptidos no ribosómicos (Figura 18). Por otro lado, las PKS son las enzimas responsables de la síntesis del Adda (3-amino-9-methoxy-2,6,8-trimethyl-10-phenyldeca-4,6-dienoic acid). Esta familia de enzimas, también modulares, son capaces de producir un gran número de compuestos a partir de los siguientes grupos: acetilos, propionilos o butirilos (Figura 18), todos ellos son activados por su unión a la Coenzima-A. Los compuestos que pueden producir las PKS a partir de estos monómeros mínimos son de una enorme diversidad (Cane *et al.*, 1998). Químicamente todos son definidos como compuestos que contienen alternativamente grupos carbonil y grupos metileno. Las PKS son muy comunes en el mundo bacteriano y gracias a ellas se producen un gran número de compuestos bioactivos con importantes funciones farmacológicas; entre ellos algunos son antibióticos como la entromicina A, supresores de la respuesta inmune como la rapamicina o compuestos anticancerígenos como la epotilona B.

**Mcy B: NRPS****Mcy D: PKS**

Figura 18. Ejemplo de modularidad de las NRPS y las PKS. C = dominio de condensación, A = Adenilación, Negro = Tiolación, KS =  $\beta$ - Cetoacil sintasa, AT = Acil tranferasa, CM = C-metiltransferasa, DH = Dehidratasa, KR = Cetoacil reductasa, ACP = Proteína transportadora del grupo acilo. Extraído de Tillett *et al*, 2000. Fuente: <http://linux1.nii.res.in/~pkfdb/polyketide.html>.

Como hemos indicado con anterioridad para sintetizar las microcistinas son necesarias por un lado las NRPS responsables de la unión de los diferentes aminoácidos y de las PKS responsables de la síntesis del compuesto más característico de las microcistinas: el Adda.

Hasta el momento se conoce la estructura génica de la región responsable de la producción de microcistinas en cuatro organismos (3 especies). Dos cepas de *Microcystis*: *M. aeruginosa* PCC 7806 (Tillett *et al*, 2000) y *M. aeruginosa* K-139 (Nishizawa *et al*, 2000), una de *Anabaena*: (Rouhiainen *et al*, 2004) y una de *Planktothrix* (Christiansen *et al*, 2003). En estos organismos todas las enzimas responsables de la síntesis de microcistinas se encuentran agrupadas en un único operón; si bien la estructura del mismo varía en cada caso.

### 3.8 Valores guía de toxinas de cianobacterias (microcistinas en agua potable y natural), según la Organización Mundial de la Salud (OMS) y otros países.

Debido a los posibles efectos adversos de las cianobacterias productoras de toxinas sobre los seres humanos, en 1997 la OMS estableció un valor guía que pudiese ser utilizado como referencia en las legislaciones de los diversos países del mundo. Este valor fue

obtenido utilizando los valores de NOAEL (*No Observed Adverse Effect Level*, “dosis máxima a la cual no se observan efectos adversos”), a partir de un estudio realizado en ratones e incorporando una serie de factores de incertidumbre. Este valor permite calcular una TDI (*Tolerable Daily Intake*, “ingesta diaria tolerable”) sin que aparezcan efectos negativos sobre el organismo. Este valor guía de la OMS corresponde a 1 µg/l (redondeado de 0,96 µg/l).

Los valores fueron calculados utilizando los registros toxicológicos de la microcistina LR, única para la cual existen valores reales de toxicidad, aunque no es la única toxina presente en ambientes acuáticos. A partir de este valor guía, algunos países han puesto en marcha legislaciones con el fin de regular los valores máximos que deben cumplir las aguas de consumo (Chorus, 2005), uno de ellos fue España que en el 2003 presentó una legislación para aguas de consumo en la que estableció un valor máximo para aguas de consumo medidas a la salida de la planta potabilizadora de 1 µg/l de microcistina total (Real Decreto 140/2003).

Otros países han utilizado este valor básico para establecer sus valores de referencia propios de microcistinas en el agua potable (Cuadro 8).

Cuadro 8 Países que han utilizado como referencia el valor básico de la OMS para microcistinas en el agua potable. Fuente: Curso de entrenamiento: a floramiento de algas tóxicas. Manejo, métodos de calidad de agua y salud ambiental y humana, noviembre 2011. Autoridad del Canal de Panamá-Universidad de Panamá, Panamá.

País	Año	Microcistinas
Brasil	2000	1 µg L (All, Reg)
Francia	2001	1 µg L (LR)
Australia	2001	1,3 µg L (LR Tox Eq)
Oregon, EU	-----	1,0 µg /g <sup>5</sup>
Canadá	2002	1,5 µg L (LR Tox Eq) y 0,5 µg /L <sup>3</sup>
Nueva Zelanda	2005	1 µg L (LR Tox Eq) y 0,1 µg /L <sup>4</sup>

### *3.9 Normas de calidad ambiental para aguas naturales y calidad del agua potable de la República de Panamá*

En el anteproyecto del 2007, por el cual se dicta las normas de calidad ambiental para aguas naturales en la República de Panamá, capítulo III, que estuvo disponible durante el 2009, se estableció una clasificación de los cuerpos de agua en las clases 1C, 2C, 3C, 1M, 2M y 3M. Este mismo capítulo, en su artículo 11, indica que la clasificación de los cuerpos de agua se hará en base a los usos preponderantes que se realicen en el correspondiente cuerpo de agua.

La tabla de estándares de control para aquellos cuerpos de agua con la clase 1C y 2C, la cual agrupa usos inmediatos y condiciones de calidad favorables, destinadas a abastecimiento para consumo humano con tratamiento simplificado (clase 1C), o con tratamiento convencional (clase 2C), protección y conservación de comunidades acuáticas, riego de vegetales que se consumen crudos (1C), recreación de bajo riesgo según la normativa específica, desarrollo de acuicultura, pesca artesanal (2C), y abrevamiento de ganado (2C), contempla valores de referencia para la microcistina LR de  $<1,0 \mu\text{g/l}$  y  $<10 \mu\text{g/l}$  respectivamente (Figura 19 y 20).

En la actualidad, en Panamá, no hay regulaciones en cuanto a la concentración y/o monitoreo de afloramientos de algas tóxicas en aguas recreacionales. Sin embargo, en EE. UU. algunos estados han establecido “valores guías” o “niveles de acción” específicos para los afloramientos tóxicos de cianobacterias. Por ejemplo, en California se han establecido niveles de acción de  $0,8 \mu\text{g/l}$  para microcistinas,  $90 \mu\text{g/l}$  para anatoxina y  $4 \mu\text{g/l}$  para cilindrospermopsina en aguas recreacionales (Walker, 2015).

El estado de Indiana ha desarrollado los siguientes niveles de acción para las microcistinas Nivel 1 bajo riesgo  $< 4 \mu\text{g/l}$  para microcistinas LR, Nivel 2 riesgo de bajo-moderado de 4 a  $20 \mu\text{g/l}$  para microcistinas LR y Nivel 3 riesgo serio  $> 20 \mu\text{g/l}$  para microcistinas LR. Otros estados como Carolina del Norte, Rhode Island y Wisconsin dan alertas basados en la descoloración visual del agua y/o con la presencia de nata verde sobre la superficie del agua (Walker, 2015)

En el presente hay una variabilidad significativa en los diferentes tipos de programas, niveles de alerta y valores guía de acción establecidos para diferentes cianotoxinas

La OMS ha establecido valores guías para los afloramientos de cianobacterias tóxicas en aguas recreacionales, los cuales comprenden riesgo bajo cuando la concentración de microcistinas es de  $4 \mu\text{g/l}$  y el conteo de cianobacterias es de 20,000 células/ml, riesgo moderado cuando la concentración de microcistinas es de  $20 \mu\text{g/l}$  y el conteo de cianobacterias es de 100,000 células/ml y riesgo alto cuando la microcistinas es mayor de  $20 \mu\text{g/l}$  y se observa la nata verde sobre la superficie del agua (Walker, 2015)

**ANTEPROYECTO**  
**REPÚBLICA DE PANAMÁ**  
**Ministerio de Economía y Finanzas**

Decreto Ejecutivo No \_\_\_\_\_  
 (De \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2007)

"Por el cual se dicta las normas de calidad ambiental para aguas naturales"

**EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA**  
 En uso de sus facultades constitucionales y legales'

<b>TABLA DE ESTÁNDARES DE REFERENCIA CLASE 1-C</b>		
Parámetro	Unidad	Valor
Atrazina	µg/L	< 2
Benceno	µg/L	< 5
Benzo(a)antraceno	µg/L	< 0,018
Benzo(a)pireno	µg/L	< 0,018
Bromodlorometano	µg/L	< 60
Clordano	µg/L	< 0,04
Clorpirifos	µg/L	< 0,0035
DDT (p p'-DDT + p p'-DDE + p p'-DDD)	µg/L	< 0,002
Dibromoclorometano	µg/L	< 100
Diclorometano	µg/L	< 20
Endosulfan	µg/L	< 0,056
Endrin	µg/L	< 0,004
Estreño	µg/L	< 20
Etilbenzeno	µg/L	< 90
Fenoles totales	µg/L	< 1
Fluoranteno	µg/L	< 0,04
Glifosato	µg/L	< 65
Heptacloro epóxido + heptacloro	µg/L	< 0,01
Hidrocarburos totales	µg/L	< 50
Lindano(γ-HCH)	µg/L	< 0,01
Malation	µg/L	< 0,1
* Microcistina-LR	µg/L	< 1
Mirex	µg/L	< 0,001
Naftaleno	µg/L	< 1,1
Paration	µg/L	< 0,04
PCBs - Bifenilos policlorados	µg/L	< 0,001

Figura 19 Tabla de estándares de referencia para la clase 1C del Anteproyecto de normas de calidad ambiental para aguas naturales de la Republica de Panamá

**ANTEPROYECTO**  
**REPÚBLICA DE PANAMÁ**  
**Ministerio de Economía y Finanzas**

Decreto Ejecutivo No \_\_\_\_\_  
 (De \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2007)

"Por el cual se dicta las normas de calidad ambiental para aguas naturales"

**EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA**  
 En uso de sus facultades constitucionales y legales

<b>TABLA DE ESTÁNDARES DE REFERENCIA CLASE 2-C</b>		
Parámetro	Unidad	Valor
Benceno	µg/L	< 5
Benzo(a)antraceno	µg/L	< 0,05
Benzo(a)pireno	µg/L	< 0,05
Bromodiclorometano	µg/L	< 100
Clordano	µg/L	< 0,04
Cloropirrifos	µg/L	< 0,005
DDT (p p-DDT + p p-DDE + p p-DDD)	µg/L	< 0,002
Dibromoclorometano	µg/L	< 100
Diclorometano	µg/L	< 20
Endosulfan	µg/L	< 0,056
Endrin	µg/L	< 0,004
Estireno	µg/L	< 20
Etilbenzeno	µg/L	< 80
Fenoles totales	µg/L	< 2
Fluoranteno	µg/L	< 0,04
Glifosato	µg/L	< 65
Heptacloro epóxido + heptacloro	µg/L	< 0,03
Hidrocarburos totales	µg/L	< 50
Lindano(γ-HCH)	µg/L	< 0,01
Malation	µg/L	< 0,1
Microcistina-LR	µg/L	< 10
Mirex	µg/L	< 0,001
Naftaleno	µg/L	< 1,1
Paration	µg/L	< 0,04
PCBs - Bifenilos policlorados	µg/L	< 0,001
Pentaclorofenol	µg/L	< 9
Tetracloroetano	µg/L	< 10
Tolueno	µg/L	< 2
Toxafeno	µg/L	< 0,01
Triclorobenzeno (1 2 3-TCB + 1,2,4-TCB)	µg/L	< 20
Tricloroetano	µg/L	< 30
Tricloroetano	µg/L	< 20
Trihalometanos	µg/L	< 100
Xileno	µg/L	< 300

\* SAAM Sustancias activas al azul de metileno

Figura 20 Tabla de estándares de referencia para la clase 2C del Anteproyecto de normas de calidad ambiental para aguas naturales de la Republica de Panama

Por otro lado, la resolución No 507 del Ministerio de Salud (30 de diciembre de 2003), que regula "Del procedimiento para controlar la calidad del agua potable, según las características definidas del reglamento técnico DGNTI-COPANIT 23-395-99 y los plazos correspondientes para su ejecución" contempla parámetros de calidad biológica, y entre ellos, la presencia de algas y una especie de cianobacterias *M aeruginosa* (Figura 21)

REPUBLICA DE PANAMÁ  
ASAMBLEA LEGISLATIVA  
LEGISPAN  
LEGISLACIÓN DE LA REPÚBLICA DE PANAMÁ

Tipo de Norma RESOLUCION

Número 507

Referencia

Año 2003

Fecha (dd-mm-aaaa) 30-12-2003

Título DEL PROCEDIMIENTO PARA CONTROLAR LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE, SEGUN LAS CARACTERISTICAS DEFINIDAS DEL REGLAMENTO TECNICO DGHTI-COPANIT 23-395-99 Y LOS PLAZOS CORRESPONDIENTES PARA SU EJECUCUCION

Dictada por MINISTRO DE SALUD

Gaceta Oficial 24970

Publicada el 20-01-2004

Rama del Derecho DER SANITARIO

Palabras Claves Agua potable, Normas técnicas y especificaciones

Páginas 12

Tamaño en Mb 1 103

Rollo 532

Posición 2119

CARACTERÍSTICAS ORGÁNICAS	Aldicarb	10	Aplicado a Aldicarb en Chile de Azúcar y Sulturo
	Azinphos	1	
	Carbofentio	7	
	FAO (Dichlorophenylacetate) (DDT)	30	Aplicado a ácido en estado libre
	Dinoseb	6	
	Dibutprop	100	
	MCPA	2	
	Molinate	6	
	Permethrina	20	
	Sinexina	2	
Terbufosina	7		
PCB PELIGROSOS POLICLORADOS	0.5		
OTRAS CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS	Enterovirus	No deben estar presentes en el agua de consumo humano	Dracunculus medinensis o Gusano de Guinea
	Helmintos (Parásitos)		Aplicado a Cyanobacterias: Microcystis Aeruginosa
	Organismos de vida libre (Algas, otros)		
	Otros organismos		Aplicado a: Giardia intestinalis y Cryptosporidium parvum
Protozoos (Parásitos)			

Figura 21 Anexo 2 de la Resolución la resolucion No 507 del Ministerio de Salud (30 de diciembre de 2003), la cual indica las características biológicas que se deben analizar y sus correspondientes valores máximos permisibles

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### 4.1 Área de estudio

##### 4.1.1 Embalse Gatún

El embalse Gatun se formó en 1912 al represarse las aguas del río Chagres. La Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá, que alimenta al embalse Gatun, tiene una superficie de drenaje de 3 338 km<sup>2</sup> y se compone de la cuenca del embalse Alhajuela y la cuenca *aguas abajo* (abajo de la presa de Madden). La cuenca *aguas abajo* tiene una superficie de 2 313 km<sup>2</sup> (Cuadro 9). La superficie o espejo de agua del embalse Gatun es de 436 km<sup>2</sup> a una elevación de 26,67 m (87,50 pies). De acuerdo con los procedimientos actuales de operación, el almacenamiento útil del embalse Gatun, entre las elevaciones 24,84 y 26,67 m (81,50 y 87,50 pies), es de 766 MMC (27 billones de pies cúbicos<sup>1</sup>).

Cuadro 9 Detalles relevantes de la Cuenca Hidrográfica

<b>Cuenca del embalse Gatún</b>		
Área total (incluyendo Alhajuela)	3337	Km <sup>2</sup>
Área aguas abajo (sin Alhajuela)	2312	Km <sup>2</sup>
Superficie del embalse Gatun (elevación 26 67 m)	436	Km <sup>2</sup>
Almacenamiento útil (entre niveles del lago 24 84 y 26 67 m)	766	mm <sup>3</sup>

En cuanto a la geología, el embalse Gatun se encuentra rodeado principalmente de areniscas, lutitas, tobas y conglomerados de la formación Gatun (Mioceno). Además, se encuentran calizas, areniscas y lutitas marinas de las formaciones Chagres y Carmito. Los conglomerados y grauvacas pertenecen a la formación Bohío. También se encuentran en el área Basaltos intrusivos y extrusivos. Como resultado del desarrollo geológico del área del Canal, los principales suelos son residuales, derivándose de las rocas presentes.

<sup>1</sup> Billón equivale a 10<sup>9</sup> (mil millones), MMC = Millones de metros cúbicos

en el area por procesos normales de meteorización, se exceptúan la lama del Atlántico que se encuentran en el área del embalse Gatun. La mayoría de los suelos contiene un porcentaje anormalmente alto de coloides, la expansión y contracción de éstos son muy elevadas cuando varía su contenido de humedad.

El embalse Gatun, tiene la principal función de servir como ruta de tránsito para el paso de barcos, además, provee agua cruda para el abastecimiento público en algunas áreas de la capital de Panamá y Colón. En el mismo se han instalado diversas tomas de agua, algunas administradas por el Canal de Panamá y otras por el IDAAN. Estas son toma de agua de Paraiso, Gamboa, Monte Esperanza, Mendoza, Laguna Alta, Sabanitas. También, se encuentran tomas de acueductos rurales tales como la de Barro Colorado, La Represa y Escobal.

El Canal de Panamá, a través de la Unidad de Calidad de Agua, genera de manera sistemática información de calidad de agua en diferentes sitios de la cuenca, a través del Programa de Vigilancia y Seguimiento de la Calidad de Agua en la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá como parte de un mandato constitucional cuya responsabilidad es la administración, uso, mantenimiento y conservación del recurso hídrico de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá, la cual garantiza su disponibilidad en cantidad y calidad para el consumo humano y el tránsito de barcos por el canal.

Para el presente estudio sólo se consideran los sitios correspondientes a la toma de agua de Paraiso y Gamboa (Figura 22)

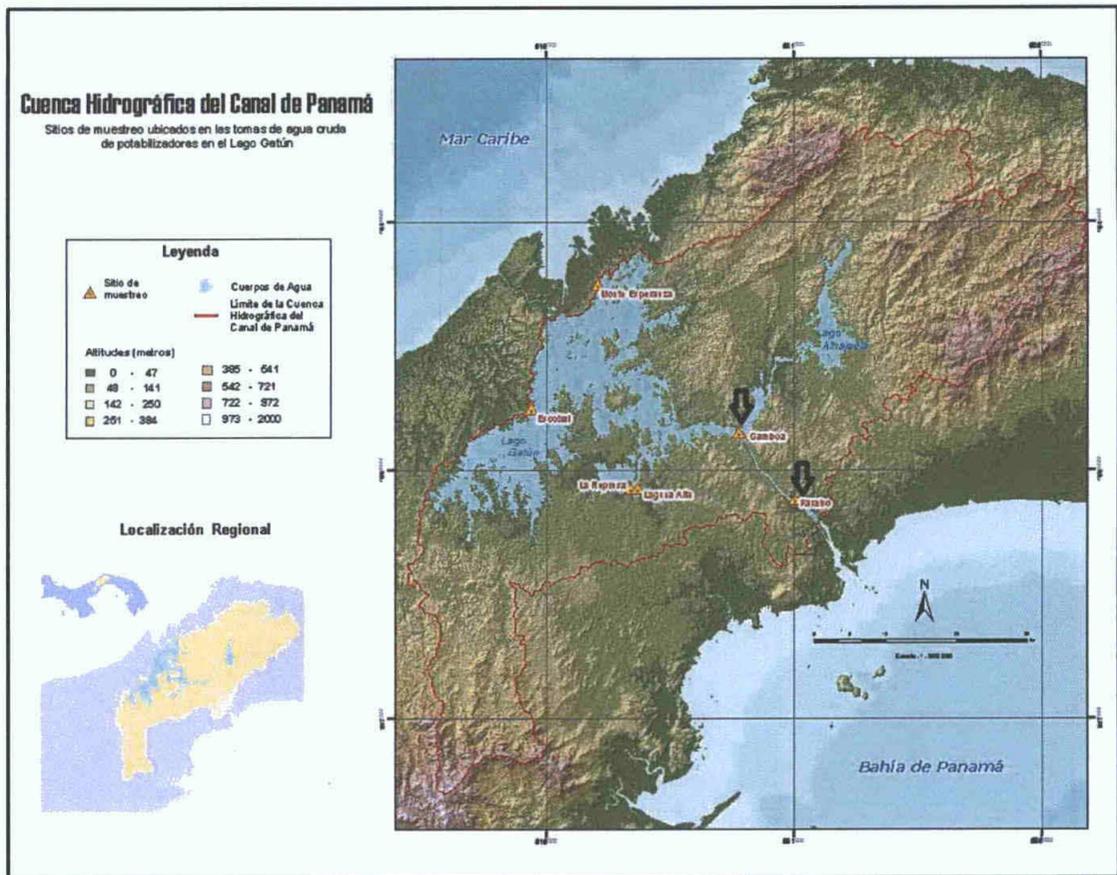


Figura 22. Mapa de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá.

## 4.2 Sitios de muestreo

### 4.2.1 Toma de agua de Paraíso

La toma tiene un área con profundidad moderada (12,4 m aproximadamente), se encuentra en el sector suroriental del embalse Gatún frente al antiguo Cerro Cartagena (el cual ha sido excavado por la construcción del tercer juego de esclusas). Esta toma es influenciada por la operación del Canal de Panamá (durante el paso de barcos), y la comunidad de Paraíso. Se encuentra en la zona Litoral rodeada de árboles con poca altura. En época de verano el agua tiende a estar clara, y durante el invierno el agua se encuentra regularmente turbia (Figura 23).

El agua cruda es bombeada a través de bombas axiales o bombas superficiales, en la estación de bombeo de Paraíso. Las bombas axiales son utilizadas en temporada de verano cuando el nivel del embalse baja. Las bombas superficiales, estas se encuentran

fuera del agua, y se emplean cuando el nivel del embalse es alto. Luego el agua cruda llega a la planta potabilizadora de Miraflores por gravedad.



Figura 23. Toma de agua de Paraíso (PRAW).

#### 4.2.2 Toma de agua de Gamboa:

La toma tiene un área poco profunda (4,9 m), y se encuentra cerca del puente de Gamboa (sector suroriental), es influenciada por el río Chagres y generalmente, por los proyectos de profundización del cauce de navegación, la comunidad de Gamboa y por los trabajos de dragado que realiza la ACP. Su litoral presenta bosque secundario. Alrededor de la toma, se observa vegetación acuática flotante y sumergida que es arrastrada de la parte media del río Chagres (Figura 24).

Al igual que en la toma de agua de Paraíso, el agua cruda es bombeada a través de bombas axiales o bombas superficiales, en la estación de bombeo de Gamboa. El agua cruda llega a la planta potabilizadora por gravedad.



Figura 24. Toma de agua en Gamboa (GRAW).

### 4.3 Técnicas de muestreo y procedimientos de análisis

#### 4.3.1 Muestreo

El muestreo se realizó de manera sistemática cada siete días hasta completar los catorce primeros días del mes, durante los meses de febrero a mayo y julio a diciembre de 2009. Se colectaron tres (3) muestras en cada sitio a (un) 1 m de la superficie. Se estableció un horario de muestreo comprendido entre las 11:00 am a 3:00 pm.

En cada sitio se realizaron mediciones *in situ* y se colectaron muestras para realizar determinaciones analíticas en el laboratorio de la Unidad de Calidad de Agua, División de Agua del Canal de Panamá, así como las muestras para nitrógeno y fósforo total

fueron colectadas, preservadas ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  al 20%), enviadas y analizadas por el laboratorio de la Universidad Tecnológica de Panamá, contratado por la ACP

Los instrumentos de medición utilizados, sistema multiparamétrico (YSI 556 MPS), fueron previamente calibrados en laboratorio. Se utilizaron envases apropiados (vidrio, plástico de polipropileno, etc.) Las muestras colectadas fueron colocadas en neveras con hielo hasta su transporte al laboratorio. El acceso a los sitios se realizó vía terrestre.

Los registros de radiación solar fueron suministrados por la Sección de Recursos Hídricos de la División de Agua del Canal de Panamá, estos se refieren a la estación Balboa (FAA), que se encuentra ubicada en Balboa, encima de la caseta próxima al mercado de abastos.

#### 4.3.2 Procedimiento de análisis físico-químicos

Las metodologías de análisis corresponden a las descritas en el *Standard Method for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA, WEF, 2005) (Cuadro 10)

Un total de doce (12), parámetros o variables de calidad de agua, los cuales incluyen temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), pH, transparencia (m), turbidez (NTU), nitratos (mg/l), ortofosfato (mg/l), fósforo total (mg/l), nitrógeno total (mg/l), clorofila a ( $\mu\text{g/l}$ ), radiación solar (Langley), microcistina ( $\mu\text{g/l}$ ), y oxígeno disuelto (mg/l), fueron los medidos en campo y laboratorio.

Cuadro 10 Métodos analíticos empleados según parámetros de calidad de agua

Parámetro	Método	Unidades de medida	Límite detección
<sup>1</sup> Oxígeno disuelto	SM 4500-O C	mg/l	0,1 mg/l
N-Nitratos	SM 4500-NO <sub>3</sub> - E	mg/l	0,01 mg/l
P-Fosfatos	SM 4500-P E	mg/l	0,02 mg/l
Fósforo total	SM 4500-P D	mg/l	0,03 mg/l
Nitrógeno total	SM 4500-Norg-B	mg/l	0,03 mg/l
<sup>1</sup> pH	SM 4500-H+B	pHunits	0,1 pHunits
<sup>1</sup> Temperatura	SM 2550-A	°C	0,1°C
Turbiedad	SM 2130-B	NTU	0,05 NTU
<sup>1</sup> Transparencia	Profundidad de Secchi	m	0,1m
Clorofila a	SM 10200-H, modificación USEPA 445 0	µg/l	0,05 µg/l

<sup>1</sup> Mediciones *in situ*

La radiación solar es medida en la estación de Balboa, encima de la caseta próxima al mercado de abastos, estación de Balboa FAA. Los registros son capturados cada 15 minutos con el equipo Kipp y Zonen, modelo CMP-10 (Figura 25). Las unidades de medida están dadas en *Langleys*. Para el presente estudio, se utilizó el registro de radiación solar más próximo a la hora del muestreo.



Figura 25 Equipo de medición para la radiación solar, Kipp y Zonen modelo CMP-10, Canada

#### 4.3.3 Análisis de microcistinas

Las muestras para análisis de microcistinas fueron colectadas en envases de vidrio ámbar, sonicadas por tres minutos y las mediciones se realizaron utilizando el método *Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay* (ELISA), con el Quanti tube kit ET039 de Envirologix.

Esta metodología está basada en dos principios técnicos: inmunológico y químico. La toxina microcistina en la muestra de agua compete con una microcistina conjugada con peróxido de rábano, para adherirse a una cantidad limitada de anticuerpos que se encuentran en la superficie interna de los tubos del kit (Figura 26). Esta competencia de unión a los sitios de enlace es visualizada con la adición de un sustrato y de la solución de HCl 1,0 N, los cuales permitirán el desarrollo de color. La lectura fue realizada con espectrofotómetro con fototubo infrarrojo a una longitud de onda ( $\lambda$ ) de 450 nm y paso de luz de 2.5 cm o mayor. Los resultados fueron calculados mediante una curva de calibración con las lecturas de absorbancia contra las concentraciones de microcistina de los estándares. Para ello, se utilizó una hoja de cálculo suministrada por el fabricante: *ELISA Data Reduction Worksheet* ET 039 (Figura 27).

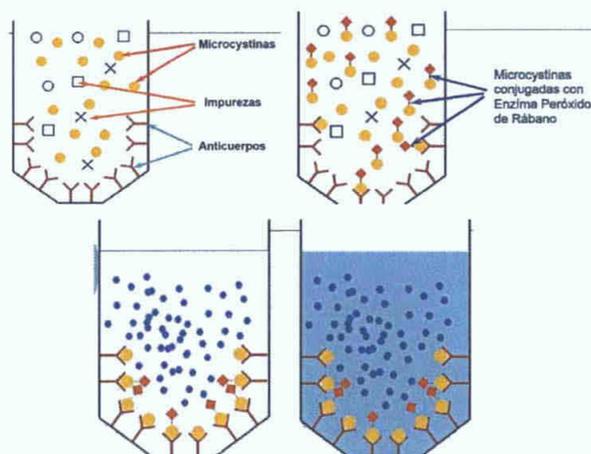


Figura 26. Principio inmunológico y químico del método ELISA para la determinación de microcistinas en muestras de agua.

**ENVIROLOGIX™**

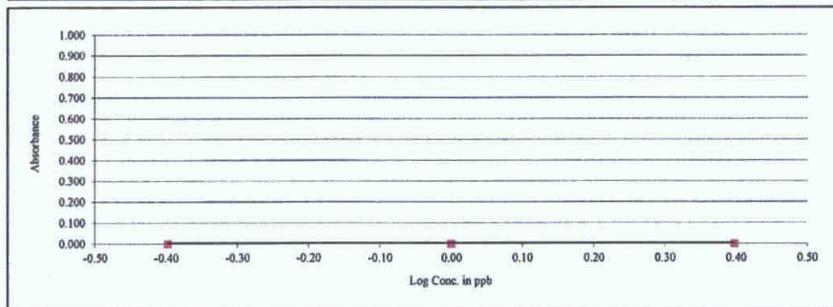
QuantiTube Kit for Microcystin (ET 039)

**Data Reduction Worksheet**

 Operator:  
 Date:  
 Time:  
 Kit Lot#:


**Section I) Calibration Curve**

Calib. Conc.	rep1	rep 2	Abs. Value	%CV	B/B <sub>0</sub>	Log(Conc.)	
Neg. Ctl. Abs. =			#DIV/0!	#DIV/0!			R <sup>2</sup> = #DIV/0! Slope = #DIV/0! Intercept = #DIV/0!
0.4 ppb Abs. =			#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	-0.40	
1.0 ppb Abs. =			#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		
2.5 ppb Abs. =			#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	0.40	


**Section II) Sample Calculations**

Sample	Paste below		SAMPLE		Estimated
	DATE	rep 1	rep 2	ABS	PPB
				%CV	
1				#DIV/0!	#DIV/0!
2				#DIV/0!	#DIV/0!
3				#DIV/0!	#DIV/0!
4				#DIV/0!	#DIV/0!
5				#DIV/0!	#DIV/0!
6				#DIV/0!	#DIV/0!
7				#DIV/0!	#DIV/0!
8				#DIV/0!	#DIV/0!
9				#DIV/0!	#DIV/0!
10				#DIV/0!	#DIV/0!
11				#DIV/0!	#DIV/0!
12				#DIV/0!	#DIV/0!

TOTAL SAMPLES: \_\_\_\_\_

TOTAL REJECTS: \_\_\_\_\_

Analyst Signature: \_\_\_\_\_

Date: \_\_\_\_\_

Figura 27. Hoja de calibración y cálculo para las microcistinas.

#### 4 3 4 Análisis estadístico

##### 4 3 4 1 Tratamiento de los datos

Para efectos estadísticos se ha utilizado los resultados de los parámetros analizados aunque estos se encuentran por debajo del límite de detección del método. Los que son calculados a través de una curva de regresión, como las variables microcistinas, fósforo, nitrógeno total, ortofosfatos y nitratos han sido reemplazados por el valor calculado de la curva de regresión Gillion *et al*, (1988), han recomendado reportar y utilizar la concentración medida cuando estos se encuentren por debajo de los límites de detección de los métodos, cuando son negativos y tienen alta variabilidad.

Para los cálculos, gráficos y manejo de los registros se utilizó Excel y el paquete estadístico SPSS versión 19.

##### 4 3 4 2 Estadística descriptiva

En los resultados se presentan estadísticos descriptivos tales como promedio, mínimo y máximo para cada una de las variables, además se presentan gráficos de pastel y diagramas de caja.

Se ha incluido un resumen de los principales grupos de algas presentes en la toma de agua de Paraiso y Gamboa. Estos resultados corresponden a los resultados de análisis taxonómicos en dichos sitios y que son realizados por la ACP en un laboratorio en el extranjero (BCS Laboratories Inc). También se revisaron específicamente los meses de agosto, septiembre y diciembre del 2009, y se calculó la distribución porcentual de los principales grupos de algas en estos meses.

Se hizo una descripción más detallada de los tres casos de registros con microcistinas que se encontraron en Gamboa y de la concentración más alta de clorofila *a* registrada en agosto

#### 4.3.4.3 Estadística inferencial

Se utilizó el análisis de regresión lineal múltiple como método de análisis multivariante, utilizando como variables dependiente e independiente a los siguientes parámetros (Cuadro 11)

Cuadro 11 Variable independiente y dependiente utilizada para los modelos de regresión lineal múltiple

<b>Dependiente</b>	<b>Independientes</b>
Microcistinas µg/l	oxígeno disuelto (mg/l)
	pH (unidades de pH)
	Clorofila <i>a</i> (µg/l)
	turbiedad (NTU)
	transparencia (m)
	nitratos (mg/l)
	ortofosfatos (mg/l)
	N total (mg/l)
	P total (mg/l)
	temperatura (°C)
	radiación solar (langley)

Se realizaron 5 modelos de regresión lineal múltiple, a continuación se detallan

- 1 Modelo general, incluye todos los registros recopilados durante el 2009 (Gamboa, Paraíso, estación seca y lluviosa)
- 2 Modelo para Gamboa, incluye todos los registros que se colectaron en Gamboa durante el 2009
- 3 Modelo para Paraíso, incluye todos los registros que se colectaron en Paraíso durante el 2009

- 4 Modelo para la estación seca, comprende los registros de Gamboa y Paraiso recolectados en los meses de febrero, marzo, abril y mayo
- 5 Modelo para la estación lluviosa, comprende los registros de Gamboa y Paraiso recolectados en los meses de julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre

Una vez calculados los modelos de regresión, se procedió a revisar la validez y la robustez de los mismos mediante la verificación de los supuestos de toda regresión lineal múltiple, como son normalidad de los residuales, linealidad de las variables independientes con la dependiente, homocedasticidad de los residuales, la autocorrelación de los residuales y la no colinealidad de las variables independientes (Anexos I, II, III, IV, V y VI)

## **RESULTADOS**

### 5.1 Descripción general de las variables físico-químicas en los sitios de estudio

Al evaluar la dispersión de los datos originales, mediante diagramas de caja, se puede apreciar que el pH osciló entre 6 y 8 unidades de pH, la transparencia fue variable y por lo general menos de dos metros de profundidad (2 m), los nitratos, ortofosfatos y el fósforo total presentaron registros variables durante el periodo analizado, el oxígeno del agua vario entre 3,21 mg/l y 7,62 mg/l (Figura 28)

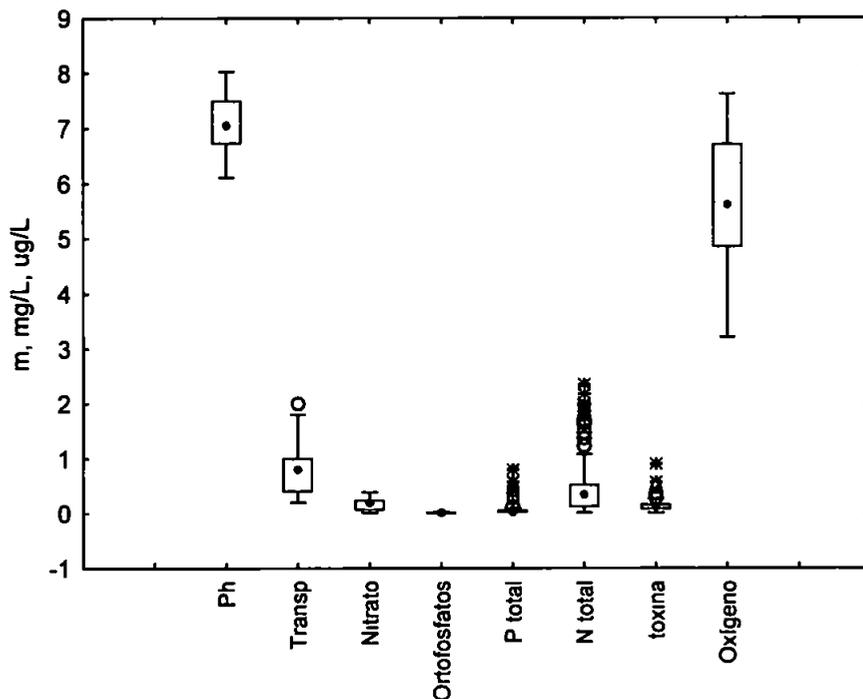


Figura 28 Diagrama de caja del pH, transparencia, nitratos, ortofosfatos, fósforo total, nitrógeno total, toxina (microcistina) y oxígeno disuelto Febrero-mayo y julio-diciembre, 2009

Nótese que las variables fósforo total y nitrógeno total (Figura 28), además de la turbiedad y clorofila *a* (Figura 29), presentan valores atípicos y extremos. La radiación solar (Figura 29), la turbiedad, la clorofila *a* y en menor grado oxígeno disuelto (Figura

28), son las características que presentan mayor variabilidad en los registros La temperatura varió entre 26 y 30 °C (Figura 29)

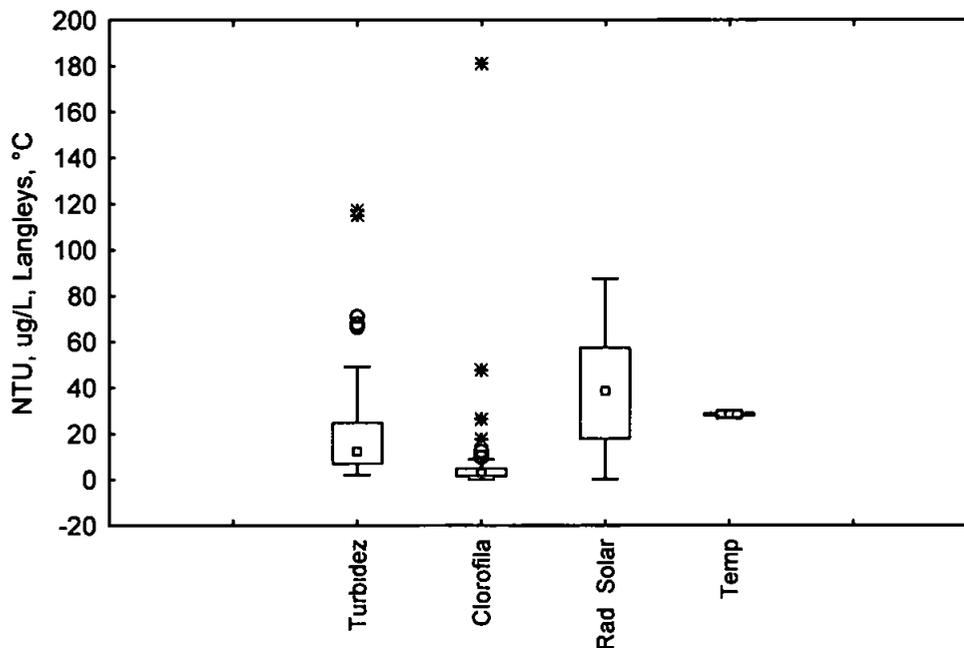


Figura 29 Diagrama de caja de la turbiedad, clorofila a, radiacion solar y temperatura Febrero-mayo y julio-diciembre, 2009

## 5.2 Descripción general de las variables físico-químicas por sitio de estudio

Se presentan varios valores atípicos y extremos en la variable nitrógeno total (Figura 30 color morado), con mayor variabilidad en Paraiso, de igual forma, los nitratos son variables en Paraiso. Los ortofosfatos y la radiación solar presentan registros muy similares en ambos sitios. La temperatura, transparencia, clorofila *a* y el oxígeno disuelto varían más en Gamboa que en Paraiso, mientras que la turbiedad, el pH y el fósforo total tienen más variabilidad en Paraiso comparado con Gamboa (Figura 30 a b y c)

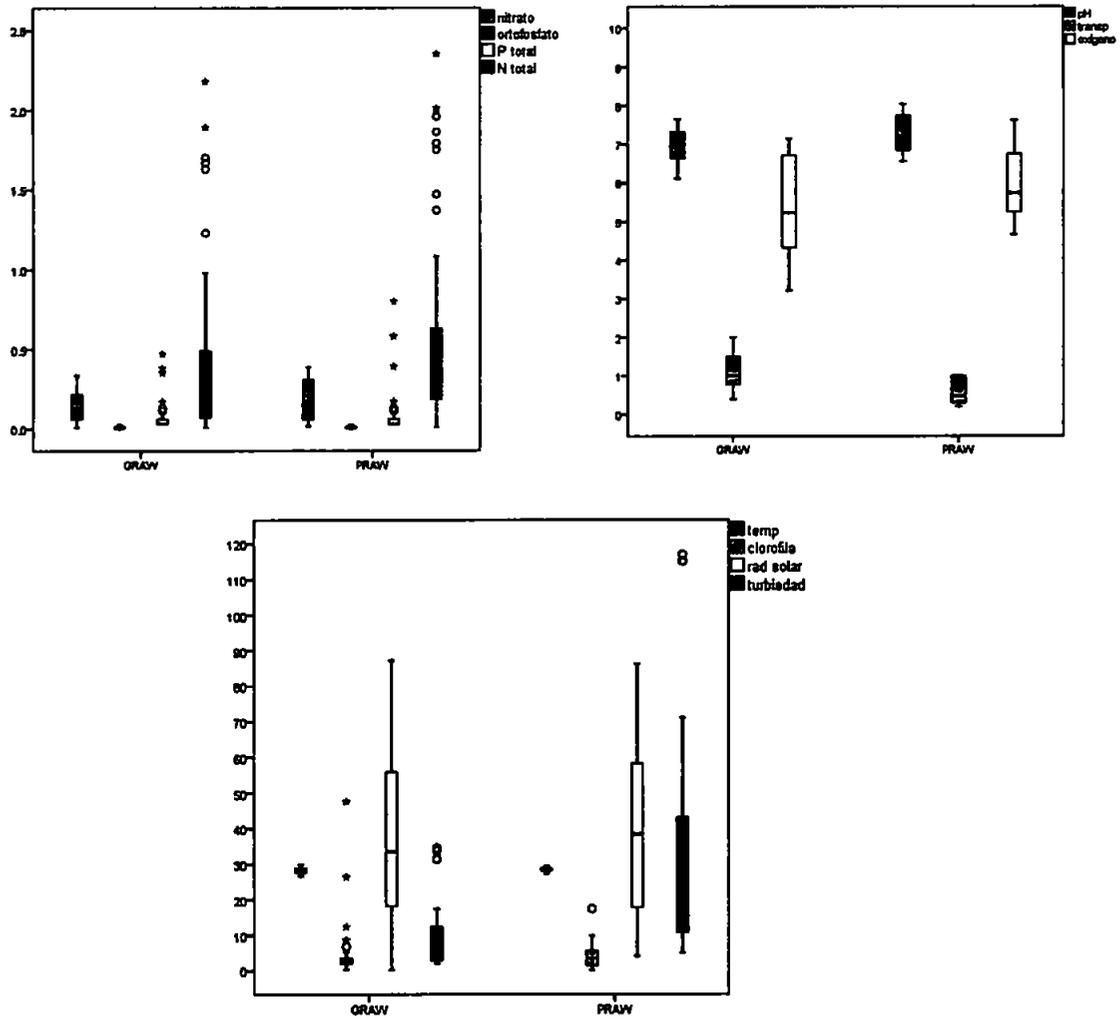


Figura 30 Diagrama de caja de los parámetros de calidad de agua en los sitios de muestreo Gamboa y Paraíso

### 5.3 Distribución porcentual de microcistinas en los sitios de estudio

Del total, 121 registros, el 98% (118), corresponde a microcistinas no detectadas ( $< 0,4 \mu\text{g/l}$ ) Un 2% (3), corresponde a microcistinas detectadas  $> 0,4 \mu\text{g/l}$  (Figura 31)



Figura 31. Distribución porcentual de las microcistinas en las tomas de agua cruda de Gamboa y Paraíso. Febrero-mayo y julio-diciembre, 2009.

El 2% de las microcistinas detectadas corresponden a la toma de agua de Gamboa, estos casos positivos son representados en la figura 32 por encima de la línea roja (límite de detección del método utilizado).

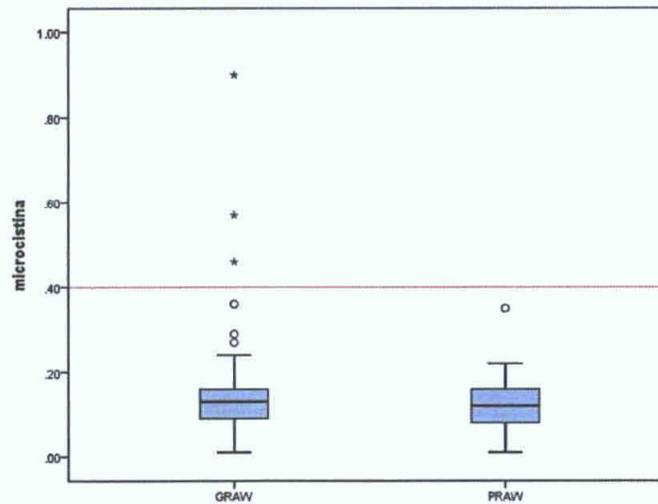


Figura 32. Concentración de microcistinas en los sitios de muestreo: Gamboa (GRAV) y Paraíso (PRAW).

#### 5.4 Aplicación de modelos de regresión lineal múltiple

##### 5.4.1 Modelo general

Las variables que presentan mayor variación en los registros para el modelo general corresponden a la turbiedad y radiación solar (desviación de 21 81 y 25 44 respectivamente) La microcistina presentó un valor mínimo de 0,010 µg/l mientras que el máximo fue de 0,9 µg/l, por su parte y por mencionar algunos de los parámetros, la temperatura mínima registrada fue de 26,64°C mientras que la máxima fue de 30,01°C La clorofila mínima de 0,1 µg/l y la máxima de 47,6 µg/l (Cuadro 12)

Cuadro 12 Estadísticos descriptivos para el modelo general

	N	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar
Temp	120	26.64	30.01	28.2984	68710
Ph	120	6.1	8.0	7.120	4569
Transp	120	2	2.0	814	4811
Turbidez	120	2.0	117.0	19.591	21.8102
Nitrato	120	0.11	386	17297	107920
Ortofosfatos	120	0.00	0.28	0.0985	0.07363
P total	120	0.3	80	0.700	10.780
N total	120	0.1	2.35	4.782	5.3197
Clorofila	120	1	47.6	3.979	5.2259
Rad Solar	120	2	87.3	39.684	25.4416
Oxígeno	120	3.21	7.82	5.6578	1.08564
microcistina	120	0.1	90	1.363	10.805
Valid N (listwise)	120				

En los registros para el modelo general vemos que la variable dependiente microcistina está muy asociada con la variable clorofila *a* (0,62) y en menor grado con el pH (-0,26), esto sugiere las variables a tener en cuenta para el modelo de regresión (Cuadro 13)

Cuadro 13. Matriz de correlación de las variables independientes con la microcistina en el modelo general.

Variables	Temp	Ph	Transp	Turbidez	Nitrato	Ortofosfatos	P total	N total	Clorofila	Rad. Solar	Oxígeno	microcistina
Temp	1.00											
Ph	0.11	1.00										
Transp	-0.06	0.26	1.00									
Turbidez	0.05	-0.24	-0.66	1.00								
Nitrato	0.09	-0.52	-0.68	0.62	1.00							
Ortofosfatos	-0.21	-0.41	-0.50	0.48	0.65	1.00						
P total	0.21	-0.16	-0.17	0.27	0.15	0.19	1.00					
N total	0.02	-0.14	-0.10	-0.13	0.20	0.13	-0.20	1.00				
Clorofila	0.02	0.14	-0.04	-0.14	-0.24	-0.14	-0.05	0.04	1.00			
Rad. Solar	-0.18	-0.11	-0.02	0.34	0.03	0.22	0.24	-0.23	-0.20	1.00		
Oxígeno	0.06	0.61	0.29	-0.22	-0.64	-0.67	-0.23	0.02	0.28	-0.11	1.00	
microcistina	0.05	-0.26	-0.10	-0.08	-0.01	0.07	0.09	0.06	0.62	-0.03	0.00	1.00

Al aplicar la regresión múltiple al modelo general e incluyendo todas las variables, vemos que la constante no es significativa (Cuadro 14). Sólo las variables pH, clorofila  $a$ , turbiedad y oxígeno disuelto, fueron significativos en el análisis.

Cuadro 14. Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo general incluyendo todas las variables.

		Coefficients <sup>a</sup>										
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations			Collinearity Statistics		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF	
1	(Constant)	.111	.337		.330	.742						
	Ph	-.104	.021	-.440	-5.071	.000	-.263	-.439	-.323	.538	1.859	
	Clorofila	.013	.001	.641	8.985	.000	.620	.654	.572	.796	1.256	
	Temp	.020	.012	.125	1.705	.091	.049	.162	.109	.752	1.330	
	Transp	-.019	.023	-.084	-.807	.421	-.105	-.077	-.051	.377	2.651	
	Turbidez	-.002	.001	-.316	-2.706	.008	-.075	-.252	-.172	.298	3.357	
	Nitrato	.082	.143	.082	.574	.567	-.009	.055	.037	.200	4.994	
	Ortofosfatos	2.936	1.637	.200	1.793	.076	.068	.170	.114	.326	3.068	
	P total	.056	.073	.055	.762	.447	.085	.073	.049	.769	1.301	
	N total	-.018	.016	-.089	-1.144	.255	.056	-.109	-.073	.675	1.482	
	Rad. Solar	.001	.000	.128	1.646	.103	-.028	.156	.105	.673	1.487	
	Oxígeno	.025	.012	.254	2.028	.045	.001	.182	.129	.259	3.858	

a. Dependent Variable: toxina

Se realizó un segundo modelo que sólo incluye a las variables pH y clorofila  $a$ .

En este segundo modelo, tanto la intersección de la ecuación (la constante), como las dos variables independientes (Cuadro 15), resultaron significativas con una  $p < 0,000$ .

Este modelo explica una proporción de la varianza en la concentración de microcistinas del 51%.

Cuadro 15 Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo general incluyendo sólo a las variables significativas

Model		Coefficients <sup>a</sup>					Collinearity Statistics	
		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Tolerance	VIF
		B	Std. Error	Beta				
1	(Constant)	682	110		6.212	.000		
	Ph	-.084	.015	-.357	-5.452	.000	.981	1.020
	Clorofila	.014	.001	.670	10.244	.000	.981	1.020

a. Dependent Variable: microcistina

La forma de expresar nuestros resultados sería la siguiente: existe una relación significativa entre la concentración de microcistinas con el pH y la concentración de clorofila *a* ( $r^2 = 0,51$ ,  $F = 60,345$ ,  $p < 0,000$ ), que se describe por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Microcistinas} = 0,682 - 0,084 * \text{pH} + 0,014 * \text{clorofila } a$$

Al revisar el cuadro 16 de los estadísticos de la regresión, se observó que el valor del coeficiente de correlación múltiple presenta un valor de 0,714, lo que significa que existe una alta asociación positiva entre la variable de respuesta microcistina y las variables explicativas (pH y clorofila *a*). Del mismo modo, el valor del  $R^2$  es de 0,509, lo que se traduce en que el modelo permite explicar el 50% de la variabilidad de las microcistinas a partir de las variables explicativas (pH y clorofila *a*). El valor de  $R^2$  ajustado es de 0,501, valor que expresa que hay un buen ajuste (considerando buen ajuste, a partir del 50%), entre los datos reales y los datos modelados de predicción. El error típico que presenta el modelo es de 0,07632, valor que se puede considerar pequeño, dadas las unidades de las variables, lo que se traduce en poca dispersión de los datos.

Cuadro 16 Estadísticos de la regresión para el modelo general

**Model Summary<sup>a</sup>**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics					Durbin-Watson
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change	
1	.714 <sup>a</sup>	.509	.501	.07632	.509	60.748	2	117	.000	1.208

<sup>a</sup> Predictors (Constant), Clorofila, Ph  
<sup>b</sup> Dependent Variable: microcistina

En el cuadro 17, se muestra la significancia del análisis de varianza del modelo general. Con el valor F de 60,746, y  $p(0,000) < \alpha(0,05)$ , por tanto, para una confianza del 95%, se valida el modelo general.

Cuadro 17 Análisis de varianza para el modelo general

**ANOVA<sup>b</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	708	2	354	60.748	.000 <sup>a</sup>
	Residual	682	117	.006		
	Total	1.389	119			

<sup>a</sup> Predictors (Constant), Clorofila, Ph  
<sup>b</sup> Dependent Variable: microcistina

#### 5.4.2 Modelo para Gamboa

La variable que presenta mayor variación en los registros del modelo para Gamboa es la radiación solar (desviación de 25.25). La toxina microcistina presentó un valor mínimo de 0,010  $\mu\text{g/l}$  mientras que el máximo fue de 0,9  $\mu\text{g/l}$ . La temperatura mínima registrada fue de 26,64°C mientras que la máxima fue de 28,20°C. La clorofila *a* mínima de 0,3  $\mu\text{g/l}$  y la máxima de 47,6  $\mu\text{g/l}$  (Cuadro 18).

Cuadro 18 Estadísticos descriptivos para el modelo de Gamboa

	N	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar
Temp	60	26 64	30 01	28 2018	77811
Ph	60	6 11	7 65	6 9713	40685
Transp	60	4	2 0	1 105	4441
Turbidez	60	2 0	34 5	9 354	7 2823
Nitrato	60	011	336	14512	089559
Ortofosfatos	60	000	028	00923	007641
P total	60	03	47	0648	08307
N total	60	01	2 18	4175	49722
Clorofila	60	3	47 6	4 123	6 7453
Rad Solar	60	2	87 3	39 456	25 2555
Oxígeno	60	3 21	7 14	5 3730	1 22501
microcistina	60	01	80	1535	13914
Valid N (listwise)	60				

En los registros para el modelo de Gamboa vemos que la variable dependiente microcistina esta muy asociada con la clorofila *a* (0,73), y en menor grado con las variables pH (-0,22), transparencia (-0,36) y turbiedad (0,21), esto sugiere las variables a tener en cuenta para el modelo de regresion (Cuadro 19)

Cuadro 19 Matriz de correlación de las variables independientes con la microcistina en el modelo para Gamboa

Variables	temp	pH	transp	turbiedad	nitrato	ortofosfato	P total	N total	clorofila	rad solar	oxígeno	microcistina
temp	1 00											
pH	0 17	1 00										
transp	0 13	0 54	1 00									
turbiedad	-0 24	-0 45	-0 75	1 00								
nitrato	-0 02	-0 65	-0 61	0 59	1 00							
ortofosfato	-0 34	-0 41	-0 54	0 58	0 63	1 00						
P total	0 11	-0 08	-0 12	0 28	0 31	0 04	1 00					
N total	-0 08	-0 26	-0 06	-0 18	0 20	0 24	-0 15	1 00				
clorofila	0 11	0 08	-0 25	0 18	-0 12	-0 09	-0 04	-0 05	1 00			
rad solar	-0 32	-0 15	-0 02	0 29	0 04	0 15	0 22	-0 20	-0 27	1 00		
oxígeno	0 17	0 62	0 53	-0 67	-0 82	-0 75	-0 27	0 01	0 24	-0 20	1 00	
microcistina	0 17	-0 22	-0 36	0 21	0 08	0 07	0 05	0 11	0 73	-0 08	0 06	1 00

Al aplicar la regresión múltiple al modelo para Gamboa e incluyendo todas las variables, vemos que la constante no es significativa (Cuadro 20)

Sólo las variables pH y clorofila *a* resultaron significativas en el análisis

Cuadro 20 Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo de Gamboa incluyendo todas las variables

Modelo	Coeficientes <sup>a</sup>						
	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.	Estadísticos de colinealidad	
	B	Error típ	Beta			Tolerancia	FIV
1 (Constante)	381	542		- 703	488		
temp	041	017	227	2 385	021	705	1 419
pH	113	045	331	2 501	018	364	2 750
transp	048	046	158	1 058	288	282	3 425
turbiedad	003	003	173	1 021	313	222	4 498
nitrato	108	273	068	380	898	206	4 848
ortofosfato	4 388	2 859	241	1 483	145	241	4 153
P total	138	157	081	869	388	728	1 373
N total	015	030	053	488	828	537	1 863
clorofila	015	002	748	7 188	000	583	1 718
rad solar	001	001	198	1 904	083	803	1 658
oxígeno	022	027	198	836	407	116	8 620

<sup>a</sup> Variable dependiente microcistina

Se realizó un segundo modelo que sólo incluye a las variables pH y clorofila *a* (Cuadro 21) En este segundo modelo, tanto la intersección de la ecuación (la constante), como las dos variables independientes, resultaron significativas con una  $p < 0,000$  Este modelo explica una proporción de la varianza en la concentración de microcistinas del 61%

Cuadro 21 Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo de Gamboa incluyendo sólo a las variables significativas

Modelo	Coeficientes <sup>a</sup>						
	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.	Estadísticos de colinealidad	
	B	Error típ	Beta			Tolerancia	FIV
1 (Constante)	764	198		3 857	000		
pH	097	028	283	3 402	001	993	1 007
clorofila	015	002	751	9 036	000	993	1 007

<sup>a</sup> Variable dependiente microcistina

La forma de expresar nuestros resultados sería la siguiente existe una relación significativa entre las concentración de microcistinas con el pH y la concentración de clorofila *a* ( $r^2 = 0,60$ ,  $F = 44,393$ ,  $p < 0,000$ ), que se describe por medio de la siguiente ecuación

$$\text{Microcistinas} = 0,764 - 0,097 * \text{pH} + 0,015 * \text{clorofila } a$$

El cuadro 22 de los estadísticos de la regresión, se observa que el valor del coeficiente de correlación múltiple presenta un valor de 0,780, lo que significa que existe una alta asociación positiva entre la variable de respuesta microcistina y las variables explicativas (pH y clorofila *a*). Del mismo modo, el valor del  $R^2$  es de 0,609, lo que se traduce en que el modelo permite explicar el 60% de la variabilidad de las microcistinas a partir de las variables explicativas (pH y clorofila *a*). El valor de  $R^2$  ajustado es de 0,595, valor que expresa que hay un buen ajuste entre los datos reales y los datos modelados de predicción. El error típico que presenta el modelo es de 0,08851, valor que se puede considerar pequeño, dadas las unidades de las variables, lo que se traduce en poca dispersión de los datos.

Cuadro 22 Estadísticos de la regresión para el modelo de Gamboa

**Resumen del modelo<sup>a</sup>**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregido	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F	
1	780 <sup>a</sup>	.609	.595	.08851	.609	44.393	2	57	.000	1.224

a Variables predictoras (Constante), clorofila pH  
b Variable dependiente microcistina

El cuadro 23 muestra la significancia del análisis de varianza del modelo para Gamboa. Con un valor F de 44,393 y de  $p(0,000) < \alpha(0,05)$ , por tanto, para una confianza del 95%, se valida el modelo de Gamboa.

Cuadro 23 Análisis de varianza para el modelo de Gamboa

**ANOVA<sup>b</sup>**

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	696	2	348	44.393	.000 <sup>a</sup>
	Residual	447	57	.008		
	Total	1.142	59			

a Variables predictoras (Constante), clorofila pH  
b Variable dependiente microcistina

### 5 4 3 Modelo para Paraíso

Las variables que presentan mayor variación en los registros para el modelo en Paraíso corresponden a la turbiedad y radiación solar (desviación de 26,32 y 25,83 respectivamente) La toxina microcistina presentó un valor mínimo de 0,010 µg/l mientras que el máximo fue de 0,35 µg/l La temperatura mínima registrada fue de 27,25°C mientras que la máxima fue de 29,40°C La clorofila mínima fue de 0,10 µg/l y la máxima fue de 17,4 µg/l (Cuadro 24)

Cuadro 24 Estadísticos descriptivos para el modelo de Paraíso

	N	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar
temp	60	27.25	29.40	28.3950	57253
pH	60	6.6	8.0	7.266	4591
transp	60	2	10	523	3124
turbiedad	60	5.0	117.0	29.828	26.3287
nitrito	60	0.18	3.86	2.0083	117863
ortofosfato	60	0.00	0.24	0.1047	0.07084
P total	60	0.3	8.0	0.752	12939
N total	60	0.1	2.35	5.388	58220
clorofila	60	1	17.4	3.835	3.0880
rad solar	60	4.0	88.2	39.913	25.8374
oxígeno	60	4.66	7.62	5.9425	84358
microcistina	60	0.1	3.5	1.182	0.5980
N válido (según lista)	60				

En los registros para el modelo de Paraíso vemos que la variable dependiente microcistina está asociada con la variable pH (-0,31), temperatura (-0,22), y P total (0,22) Esto sugiere que estas son las variables a tener en cuenta para el modelo de regresión (Cuadro 25)

Cuadro 25. Matriz de correlaciones entre las variables independientes y la microcistina en el modelo para Paraíso.

Variables	temp	pH	transp	turbiedad	nitrate	ortofosfato	P total	N total	clorofila	rad solar	oxígeno	microcistina
temp	1											
pH	-0.04	1.00										
transp	-0.16	0.74	1.00									
turbiedad	0.05	-0.55	-0.68	1.00								
nitrate	0.15	-0.67	-0.83	0.63	1.00							
ortofosfato	-0.06	-0.52	-0.63	0.58	0.70	1.00						
P total	0.31	-0.25	-0.24	0.31	0.06	0.29	1.00					
N total	0.10	-0.14	-0.02	-0.25	0.17	0.02	-0.24	1.00				
clorofila	-0.21	0.34	0.47	-0.46	-0.54	-0.25	-0.09	0.22	1.00			
rad solar	0.00	-0.10	0.00	0.47	0.01	0.29	0.27	-0.27	-0.10	1.00		
oxígeno	-0.27	0.54	0.72	-0.46	-0.77	-0.69	-0.26	-0.03	0.47	-0.01	1.00	
microcistina	-0.22	-0.31	0.07	-0.13	-0.04	0.14	0.22	0.02	0.10	0.08	0.00	1.00

Al aplicar la regresión múltiple al modelo para Paraíso e incluyendo todas las variables, vemos que la constante es significativa, además, las variables pH, turbiedad y P total resultaron significativas en el análisis (Cuadro 26).

Cuadro 26. Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo de Paraíso incluyendo todas las variables.

		Coeficientes <sup>a</sup>					Estadísticos de colinealidad	
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.	Tolerancia	FIV
		B	Error tip.	Beta				
1	(Constante)	1.383	.428		3.245	.002		
	temp	-.024	.014	-.227	-1.689	.098	.612	1.634
	pH	-.095	.022	-.731	-4.293	.000	.381	2.627
	transp	.094	.048	.490	1.964	.055	.177	5.641
	turbiedad	-.001	.000	-.563	-2.670	.010	.248	4.027
	nitrate	.119	.148	.234	.803	.426	.130	7.677
	ortofosfato	1.438	1.728	.170	.832	.410	.264	3.783
	P total	.140	.066	.300	2.116	.040	.550	1.819
	N total	-.013	.015	-.123	-.900	.372	.589	1.698
	clorofila	4.509E-5	.003	.002	.016	.987	.531	1.882
	rad solar	.000	.000	.106	.700	.487	.479	2.087
	oxígeno	.007	.014	.096	.474	.637	.269	3.714

a. Variable dependiente: microcistina

Se realizó un segundo modelo que sólo incluye a las variables temperatura, pH, transparencia, turbiedad y fósforo total (Cuadro 27). En este segundo modelo, tanto la intersección de la ecuación (la constante), como las variables independientes, resultaron significativas con una  $p < 0,000, 0,018, 0,000, 0,026, 0,024$  y  $0,007$ , respectivamente.

Este modelo explica una proporción de la varianza en la concentración de microcistinas del 38% lo que se considera como un modelo con ajuste bajo (Cuadro 28)

Cuadro 27 Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo en Paraiso incluyendo sólo a las variables significativas

		Coeficientes <sup>a</sup>						Estadísticos de colinealidad	
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig	Tolerancia	FIV	
		B	Error típ	Beta					
1	(Constante)	1 586	342		4 643	000			
	temp	028	012	- 271	2 442	018	859	1 164	
	pH	095	020	730	4 683	000	436	2 294	
	transp	079	034	411	2 289	026	328	3 052	
	turbiedad	001	000	338	2 328	024	503	1 988	
	P total	150	054	321	2 795	007	804	1 243	

a Variable dependiente microcistina

La forma de expresar nuestros resultados sería la siguiente existe una relación significativa entre las concentración de microcistinas con la temperatura, el pH, la transparencia, la turbiedad y la concentración de fosforo total ( $r^2 = 0,429$ ,  $F = 8,102$ ,  $p < 0,000$ ), que se describe por medio de la siguiente ecuación

$$\text{Microcistinas} = 1,586 - 0,028 * \text{temperatura} - 0,095 * \text{pH} + 0,079 * \text{transparencia} - 0,001 * \text{turbiedad} + 0,150 * \text{P total}$$

Al revisar el cuadro 28 de los estadísticos de la regresión, se observa que el valor del coeficiente de correlación múltiple presenta un valor de 0,655, lo que significa que existe una alta asociación positiva entre la variable de respuesta microcistina y las variables explicativas (temperatura, pH, transparencia, turbiedad y P total) Del mismo modo, el valor del  $R^2$  es de 0,429, lo que se traduce en que el modelo permite explicar el 43% de la variabilidad de las microcistinas a partir de las variables explicativas (temperatura, pH, transparencia, turbiedad y P total) El valor de  $R^2$  ajustado es de 0,379, valor que expresa que hay un buen ajuste entre los datos reales y los datos modelados de predicción El

error típico que presenta el modelo es de 0,04732, valor que se puede considerar pequeño, dadas las unidades de las variables, lo que se traduce en poca dispersión de los datos

El cuadro 29 muestra la significancia del análisis de varianza del modelo para Paraiso. Con valor F de 8,102, y  $p(0,000) < \alpha(0,05)$ , por tanto, para una confianza del 95%, se valida el modelo de Paraiso

Cuadro 28 Análisis de varianza para el modelo en Paraiso

**Resumen del modelo<sup>b</sup>**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ de la estimación	Durbin-Watson
1	655 <sup>a</sup>	429	376	04732	1 339

a Variables predictoras (Constante), P total, transp, temp, turbiedad, pH  
b Variable dependiente microcistina

#### 5 4 4 Modelo para la estación seca

La variable que presenta mayor variación en los registros para el modelo en la estación seca es la radiación solar (desviación de 20,91). La toxina microcistina, presentó un valor mínimo de 0,030  $\mu\text{g/l}$  mientras que el máximo fue de 0,16  $\mu\text{g/l}$ . La temperatura mínima registrada fue de 27,54°C mientras que la máxima fue de 29,33°C. La clorofila mínima de 1,70  $\mu\text{g/l}$  y la máxima de 9,8  $\mu\text{g/l}$  (Cuadro 29)

Cuadro 29. Estadísticos descriptivos del modelo para la estación seca.

	N	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar.
temp	48	27.54	29.33	28.4590	.59578
pH	48	6.7	8.0	7.538	.3250
transp	48	.3	2.0	1.157	.4838
turbiedad	48	2.0	23.0	7.102	5.3666
nitrato	48	.011	.268	.07552	.069978
ortofosfato	48	.000	.011	.00346	.002543
P total	48	.03	.47	.0462	.06460
N total	48	.01	2.35	.4165	.41797
clorofila	48	1.7	9.8	4.317	2.0976
rad solar	48	9.4	76.5	37.451	20.9116
oxígeno	48	4.66	7.62	6.5104	.81855
microcistina	48	.03	.16	.0938	.03253
N válido (según lista)	48				

En los registros para el modelo de la estación seca vemos que la variable dependiente: microcistina está asociada con las variables temperatura (-0,63), pH (0,31), transparencia (0,44), turbiedad (-0,41), nitratos (-0,41), ortofosfatos (0,25), radiación solar (0,38 y oxígeno (0,33). Esto sugiere las variables a tener en cuenta para el modelo de regresión (Cuadro 30).

Cuadro 30. Matriz de correlaciones entre las variables independientes y la microcistina en el modelo de la estación seca.

Variables	temp	pH	transp	turbiedad	nitrato	ortofosfato	P total	N total	clorofila	rad solar	oxígeno	microcistina
temp	1.00											
pH	-0.26	1.00										
transp	-0.33	-0.26	1.00									
turbiedad	0.49	0.14	-0.79	1.00								
nitrato	0.52	-0.12	-0.44	0.72	1.00							
ortofosfato	0.02	0.28	0.03	-0.01	0.01	1.00						
P total	0.13	-0.08	0.15	-0.08	0.04	-0.06	1.00					
N total	0.09	0.19	-0.34	0.43	0.31	0.00	-0.12	1.00				
clorofila	-0.22	0.33	-0.44	0.19	-0.18	-0.13	-0.12	0.19	1.00			
rad solar	-0.42	0.26	0.40	-0.40	-0.36	0.41	0.00	-0.07	-0.28	1.00		
oxígeno	-0.65	0.38	0.08	-0.39	-0.71	-0.17	-0.29	0.06	0.45	0.13	1.00	
microcistina	-0.63	0.31	0.44	-0.41	-0.41	0.25	-0.07	-0.18	0.06	0.38	0.33	1.00

Al aplicar la regresión múltiple al modelo para la estación seca e incluyendo todas las variables, vemos que la constante es significativa, además, las variables temperatura, pH, y transparencia resultaron significativas en el análisis (Cuadro 32).

Cuadro 31 Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo de la estación seca incluyendo todas las variables

Modelo		Coeficientes <sup>a</sup>					Estadísticos de colinealidad	
		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig	Tolerancia	FIV
		B	Error típ	Beta				
1	(Constante)	803	319		2 518	016		
	temp	- 032	009	592	3 474	001	372	2 696
	pH	030	015	300	2 069	046	515	1 941
	transp	039	014	580	2 831	008	257	3 885
	turbiedad	002	001	316	1 280	209	178	5 628
	nitrato	- 107	112	231	- 962	343	188	5 333
	ortofosfato	2 477	1 649	194	1 502	142	651	1 536
	P total	- 043	059	084	717	478	781	1 281
	N total	- 008	010	079	611	545	654	1 529
	clorofila	001	002	085	560	579	470	2 128
	rad solar	000	000	185	-1 019	315	413	2 423
	oxígeno	- 010	010	255	999	324	166	6 010

a Variable dependiente microcistina

Se realizó un segundo modelo que sólo incluye a las variables temperatura, pH y transparencia (Cuadro 33). En este segundo modelo, tanto la intersección de la ecuación (la constante), como las tres variables independientes, resultaron significativas con una  $p < 0,045, 0,001, 0,013$  y  $0,002$ , respectivamente. Este modelo, explica una proporción de la varianza en la concentración de microcistinas del 49% (Cuadro 34).

Cuadro 32 Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo de la estación seca incluyendo todas las variables

Modelo		Coeficientes <sup>a</sup>					Estadísticos de colinealidad	
		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig	Tolerancia	FIV
		B	Error típ	Beta				
1	(Constante)	490	238		2 083	045		
	temp	- 023	008	421	3 536	001	762	1 313
	pH	030	012	301	2 583	013	784	1 280
	transp	026	008	383	3 223	002	762	1 312

a Variable dependiente microcistina

Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo en la estación seca incluyendo sólo a las variables significativas

La forma de expresar nuestros resultados sería la siguiente existe una relación significativa entre las concentración de microcistinas con la temperatura, el pH y la transparencia ( $r^2 = 0,526$ ,  $F = 16,269$ ,  $p < 0,000$ ), que se describe por medio de la siguiente ecuación

$$\text{Microcistinas} = 0\,490 - 0,023 * \text{temperatura} + 0,030 * \text{pH} + 0,026 * \text{transparencia}$$

Al revisar el cuadro 34 de los estadísticos de la regresión, se observa que el valor del coeficiente de correlación múltiple presenta un valor de 0,725, lo que significa que existe una alta asociación positiva entre la variable de respuesta microcistina y las variables explicativas (temperatura, pH y transparencia) Del mismo modo, el valor del  $R^2$  es de 0,526, lo que se traduce en que el modelo permite explicar el 53% de la variabilidad de las microcistinas a partir de las variables explicativas (temperatura, pH y transparencia) El valor de  $R^2$  ajustado es de 0,494, valor que expresa que hay un buen ajuste entre los datos reales y los datos modelados de predicción El error típico que presenta el modelo es de 0,02315, valor que se puede considerar pequeño, dadas las unidades de las variables, lo que se traduce en poca dispersión de los datos

Cuadro 33 Estadísticos de la regresión para el modelo en la estación seca

**Resumen del modelo<sup>b</sup>**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error tip de la estimación	Durbin-Watson
1	725 <sup>a</sup>	526	494	02315	1 532

a Variables predictoras (Constante), transp, pH, temp  
b Variable dependiente microcistina

El cuadro 35 muestra la significancia del análisis de varianza del modelo para la estación seca Con el valor F de 16,269 y  $p(0,000) < \alpha(0,05)$ , por tanto, para una confianza del 95%, se valida el modelo de la estación seca

Cuadro 34 Análisis de varianza para el modelo en la estación seca

ANOVA<sup>b</sup>

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig
1	Regresión	026	3	009	18 269	000 <sup>a</sup>
	Residual	024	44	001		
	Total	050	47			

a Variables predictoras (Constante), transp, pH, temp  
b Variable dependiente microcistina

## 5 4 5 Modelo para la estación lluviosa

Las variables que presentaron mayor variación en los registros para el modelo de la estación lluviosa son la turbiedad y la radiación solar (desviación estándar de 24,54 y 28,10) La toxina microcistina presentó un valor mínimo de 0,01  $\mu\text{g/l}$  mientras que el máximo fue de 0,90  $\mu\text{g/l}$  La temperatura mínima registrada fue de 26,64°C, mientras que la máxima fue de 30,01°C La clorofila mínima de 0,10  $\mu\text{g/l}$  y la máxima de 47,6  $\mu\text{g/l}$  (Cuadro 36)

Cuadro 35 Estadísticos descriptivos para el modelo de la estación lluviosa

	N	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar
temp	72	26 64	30 01	28 1914	72614
pH	72	6 11	7 49	6 8404	28711
transp	72	2	1 5	585	3188
turbiedad	72	5 6	117 0	27 917	24 5451
nitrate	72	082	386	23794	074684
ortofosfato	72	000	028	01411	006368
P total	72	03	80	0858	12680
N total	72	01	2 18	5193	59528
clorofila	72	1	47 6	3 754	6 5370
rad solar	72	2	87 3	41 173	28 1028
oxígeno	72	3 21	6 87	5 0893	84420
microcistina	72	01	90	1647	12970
N válido (según lista)	72				

En los registros para el modelo de la estación lluviosa vemos que la variable dependiente microcistina está asociada con las variables temperatura (0,23), turbiedad (-0,27), nitrate

(-0,44), ortofosfatos (-0,28), clorofila (0,71) y oxígeno (0,32). Esto sugiere las variables a tener en cuenta para el modelo de regresión (Cuadro 37).

Cuadro 36. Matriz de correlaciones entre las variables independientes y la microcistina en el modelo para la estación lluviosa.

Variables	temp	pH	transp	turbiedad	nitrato	ortofosfato	P total	N total	clorofila	rad solar	oxígeno	microcistina
temp	1.00											
pH	0.08	1.00										
transp	-0.14	-0.42	1.00									
turbiedad	0.13	0.24	-0.71	1.00								
nitrato	0.27	0.23	-0.49	0.48	1.00							
ortofosfato	-0.14	0.30	-0.27	0.24	0.35	1.00						
P total	0.29	-0.03	-0.21	0.25	0.01	0.10	1.00					
N total	0.02	-0.28	0.14	-0.27	0.15	0.12	-0.25	1.00				
clorofila	0.05	0.13	0.00	-0.14	-0.35	-0.14	-0.04	0.02	1.00			
rad solar	-0.06	-0.29	-0.24	0.45	0.11	0.21	0.30	-0.30	-0.20	1.00		
oxígeno	0.21	0.15	-0.35	0.22	-0.07	-0.48	-0.11	0.13	0.33	-0.18	1.00	
microcistina	0.23	-0.10	0.07	-0.27	-0.44	-0.28	0.04	0.05	0.71	-0.11	0.32	1.00

Al aplicar la regresión múltiple al modelo para la estación lluviosa e incluyendo todas las variables, vemos que la constante no es significativa, sin embargo, las variables temperatura, nitrato, clorofila y turbiedad resultaron significativas en el análisis (Cuadro 38).

Cuadro 37. Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo de la estación lluviosa incluyendo todas las variables.

		Coeficientes <sup>a</sup>						Estadísticos de colinealidad	
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coefficientes tipificados	t	Sig.	Tolerancia	FIV	
		B	Error típ.	Beta					
1	(Constante)	-.643	.544		-1.181	.242			
	temp	.051	.016	.287	3.268	.002	.699	1.432	
	nitrato	-.454	.205	-.262	-2.217	.030	.388	2.580	
	clorofila	.011	.002	.575	6.633	.000	.719	1.390	
	pH	-.081	.056	-.179	-1.445	.154	.353	2.834	
	transp	-.102	.054	-.249	-1.900	.062	.314	3.183	
	turbiedad	-.002	.001	-.286	-2.212	.031	.324	3.088	
	ortofosfato	.394	2.692	.019	.146	.884	.309	3.237	
	P total	-.028	.090	-.027	-.308	.759	.700	1.428	
	N total	-.003	.026	-.012	-.100	.920	.383	2.610	
	rad solar	.000	.001	.081	.725	.471	.435	2.297	
	oxígeno	.012	.021	.081	.591	.557	.287	3.479	

a. Variable dependiente: microcistina

Se realizó un segundo modelo que sólo incluye a las variables temperatura, nitrato y clorofila *a* (Cuadro 39). En este segundo modelo, tanto la intersección de la ecuación (la

constante), como las tres variables independientes, resultaron significativas con una  $p < 0,004$ ,  $0,001$ ,  $0,001$  y  $0,000$ , respectivamente Este modelo explica una proporción de la varianza en la concentración de microcistinas del 60% (Cuadro 40)

Cuadro 38 Modelo de regresión lineal múltiple para el modelo en la estación lluviosa incluyendo sólo a las variables significativas

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig	Estadísticos de colinealidad	
		B	Error típ	Beta			Tolerancia	FIV
1	(Constante)	-1 180	390		3 025	004		
	temp	051	014	284	3 568	001	900	1 111
	nitrate	534	147	308	3 624	001	789	1 267
	clorofila	012	002	584	7 135	000	850	1 177

a Variable dependiente microcistina

La forma de expresar nuestros resultados sería la siguiente existe una relación significativa entre las concentración de microcistinas con la temperatura, los nitratos y la clorofila  $a$  ( $r^2 = 0,614$ ,  $F = 35,986$ ,  $p < 0,000$ ), que se describe por medio de la siguiente ecuación

$$\text{Microcistinas} = -1,180 + 0,051 * \text{temperatura} - 0,534 * \text{nitratos} + 0,012 * \text{clorofila } a$$

Al revisar el cuadro 40 de los estadísticos de la regresión, se observa que el valor del coeficiente de correlación múltiple presenta un valor de 0,783, lo que significa que existe una alta asociación positiva entre la variable de respuesta microcistina y las variables explicativas (temperatura, nitratos y clorofila  $a$ ) Del mismo modo, el valor del  $R^2$  es de 0,614, lo que se traduce en que el modelo permite explicar el 60% de la variabilidad de las microcistinas a partir de las variables explicativas (temperatura, nitratos y clorofila  $a$ ) El valor de  $R^2$  ajustado es de 0,596, valor que expresa que hay un buen ajuste entre los datos reales y los datos modelados de predicción El error típico que presenta el modelo

es de 0,08239, valor que se puede considerar pequeño, dadas las unidades de las variables, lo que se traduce en poca dispersión de los datos

Cuadro 39 Estadísticos de la regresión para el modelo en la estación lluviosa

**Resumen del modelo<sup>b</sup>**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ de la estimación	Durbin-Watson
1	783 <sup>a</sup>	614	598	08239	1 553

a Variables predictoras (Constante), clorofila, temp, nitrato  
b Variable dependiente microcistina

El cuadro 41 muestra la significancia del análisis de varianza del modelo para la estación lluviosa. Con valor F de 35,986, y  $p(0,000) < \alpha(0,05)$ , por tanto, para una confianza del 95%, se valida el modelo de la estación lluviosa

Cuadro 40 Análisis de varianza para el modelo en la estación lluviosa

**ANOVA<sup>b</sup>**

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig
1	Regresión	733	3	244	35 986	000 <sup>a</sup>
	Residual	462	68	007		
	Total	1 194	71			

a Variables predictoras (Constante), clorofila, temp, nitrato  
b Variable dependiente microcistina

### 5.5 Registros de microcistinas detectadas en Gamboa durante 2009

Concentraciones de microcistinas mayores a 0,40 µg/l se observaron en la estación de Gamboa durante los meses septiembre y diciembre (Cuadro 42)

Cuadro 41 Concentraciones altas de microcistinas y clorofila a en la estación de Gamboa, 2009

Casos de interés	fecha	sitio	mes	temp	pH	Transp	turbiedad	nitrato	ortofosfato	P total	N total	clorofila	Rad Solar	oxígeno	toxina
MICROCISTINAS	09/24/2009	GRAW	sep	30 01	6 74	0 5	14 0	0 189	0 016	0 04	0 55	8 7	40 7	4 92	0 46
	09/24/2009	GRAW	sep	29 74	6 82	0 7	12 1	0 182	0 014	0 06	0 87	2 8	40 7	4 80	0 57
	12/17/2009	GRAW	dic	28 38	6 96	0 5	17 1	0 082	0 005	0 05	0 25	47 6	17 8	6 62	0 90
CLOROFILA	08/24/2009	GRAW	ago	29 00	6 99	0 7	18 3	0 227	0 016	0 03	0 55	181 2	48 4	4 85	0 03
	12/17/2009	GRAW	dic	28 38	6 96	0 5	17 1	0 082	0 005	0 05	0 25	47 6	17 8	6 62	0 90
	12/17/2009	GRAW	dic	28 40	7 10	0 7	17 1	0 102	0 006	0 06	0 31	26 4	17 8	6 83	0 27

La mayor concentración de microcistinas fue de 0,90  $\mu\text{g/l}$  el día 17 de diciembre de 2009, observaciones de campo indicaron día nublado, viento suave, oleaje escaso, poco tránsito de barcos y lanchas en el momento de la colecta. Además, de partículas verdes en suspensión. Los otros dos registros positivos de microcistinas fueron del 24 de septiembre del 2009, día en que se presentó la mayor temperatura en Gamboa (30,01°C), con una concentración de microcistinas de 0,46  $\mu\text{g/l}$  y 0,57  $\mu\text{g/l}$ . Durante la colecta se podía observar el afloramiento hacia la orilla de la toma de agua, el día estaba muy caluroso, con vegetación acuática flotante, poco movimiento del agua, basura en el área y agua con coloración verdosa.

#### 5.5.1 Alta concentración de clorofila *a*, 24 de agosto de 2009

La mayor concentración de clorofila *a* registrada durante el 2009 fue de 181,2  $\mu\text{g/l}$ , el 24 de agosto del mismo año (Cuadro 42). La colecta de muestras, fue realizada a las 12:00 mediodía. Esta elevada concentración de clorofila *a* fue considerada como un afloramiento espontáneo en la toma de agua de Gamboa.

Vale la pena destacar que personal de la Unidad de calidad de agua, quienes colectan muestras a diario en las tomas de agua de Gamboa y Paraiso, nos comunicaron que en horas de la mañana, en el mismo sitio, no se observaron partículas en suspensión ni manchas verdes sobre la superficie del agua, pero al llegar al mediodía, se pudo observar una gran cantidad de películas verdes sobre la superficie (Figura 47). Observaciones bajo el microscopio revelaron la presencia del género *Microcystis sp* en la muestra de agua (Figura 48). Algunos datos de campo sugieren gran cantidad de macrófitas, coloración verde en el agua, viento moderado y un día muy soleado.



Figura 33. Afloramiento de cianobacteria, 24 de agosto de 2009.

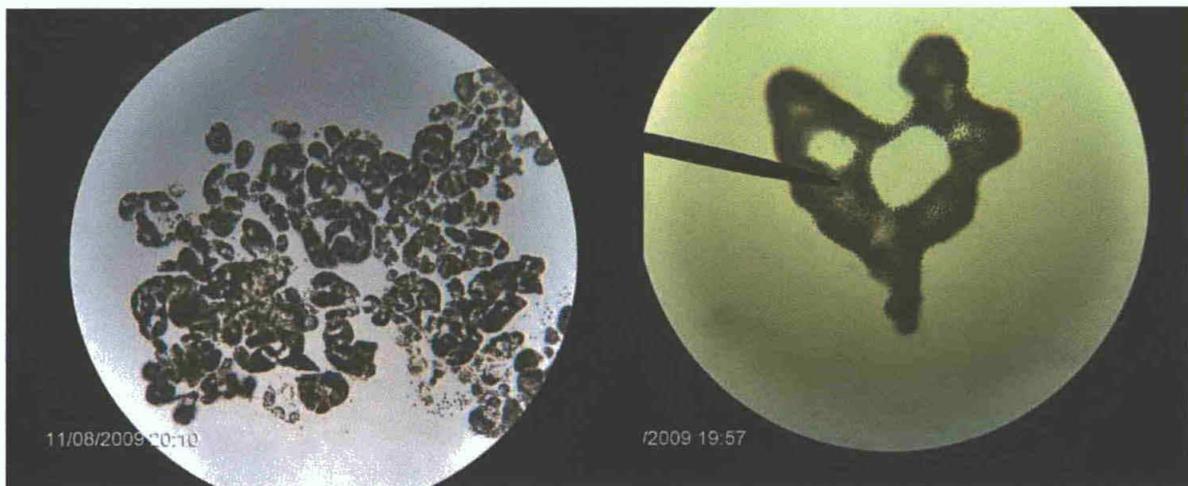


Figura 34. Observación bajo el microscopio de la muestra del 24 de agosto de 2009, afloramiento de *Microcystis* sp.

Nótese que ese día (24 de agosto), la temperatura (29 °C), los nitratos, el nitrógeno total y la radiación solar fueron altos; el oxígeno fue bajo y la microcistina no fue detectada (Cuadro 42).

Durante el 2009, muestras para análisis de algas, cianobacterias, microcistinas y otros parámetros biológicos, fueron colectados y enviados por el Canal de Panamá a un laboratorio en los Estados Unidos (EEUU) (BCS Laboratories, Inc.), como parte de su programa de monitoreo de la calidad de agua en la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá. Con la finalidad de evaluar los principales grupos de algas y cianobacterias

presentes en los sitios de muestreo, se revisaron los resultados obtenidos de las muestras colectadas con especial interés y más detalladamente para los meses de agosto, septiembre y diciembre, meses para los cuales se dieron las mayores concentraciones de microcistinas (septiembre y diciembre) y clorofila *a* (agosto), en este estudio. Vale la pena destacar que aunque estos resultados no pueden ser contrastados porque las fechas no coinciden, consideramos importante revisarlos para complementar nuestro estudio y tener una idea de los grupos fitoplanctónicos predominantes en fechas próximas a nuestros muestreos.

#### 5.6 Principales géneros y especies de cianobacterias en la toma de agua cruda de Gamboa durante el 2009

Durante el 2009, en Gamboa, predominaron las *cyanophyte unicell, sphere 2,5-5um spp, oval/rod 2,5-5um* y *cyanophyte cell pair sp* (Cuadro XLIII). “*cyanophyte*” significa que el organismo contado es una cianobacteria (alga verde-azul), pero que la identificación más detallada no fue posible. A nivel de un microscopio óptico es difícil o imposible identificar con precisión cianobacterias pequeñas y unicelulares para poderlas igualar a un nivel de género, por tanto se han identificado como *cyanophyte unicell*. Para hacer algunas distinciones, se les coloca la forma (unicelulares, esféricas, de varillas, etc), también por tamaño (2,5 – 5,0  $\mu\text{m}$ ).

Para junio (29 de junio de 2009), hubo una concentración de 1,452 cell/mL de *cyanophyte colony sp (Cells)*.

La identificación a nivel de colonias también es difícil cuando sólo se observan pocas células o no se observan colonias suficientes para entender la variación morfológica. Por tanto, a veces “*cyanophyte colony*” es la mejor forma de representarlos. Otra especie

presente en marzo fue *Cyanogranis ferruginea* (*C ferruginea*) (871 cell/ml) y el género *Pseudoanabaena* sp (680 cell/ml), durante septiembre

El cuadro 43 presenta un resumen de las principales cianobacterias observadas durante el 2009 en las muestras que tuvieron una concentración mayor de 500 celulas/ml

Cuadro 42 Listado de formas, géneros y especies de cianobacterias presentes en muestras de agua de la toma de Gamboa durante el 2009

Nombre de la especie	Sitio de colecta	fecha	resultado	Unidades
<i>cyanophyte unicell, oval/rod 2 5-5um (Cells)</i>	GRAW	01/29/2009	726	cell/mL
<i>cyanophyte unicell, oval/rod 2 5-5um (Units)</i>	GRAW	01/29/2009	726	Units
<i>Cyanogranis ferruginea (Cells)</i>	GRAW	03/25/2009	871	cell/mL
<i>cyanophyte unicell, oval/rod 2 5-5um (Cells)</i>	GRAW	03/25/2009	744	cell/mL
<i>cyanophyte unicell, oval/rod 2 5-5um (Units)</i>	GRAW	03/25/2009	744	Units
<i>cyanophyte unicell, oval/rod 2 5-5um (Cells)</i>	GRAW	04/27/2009	744	cell/mL
<i>cyanophyte unicell, oval/rod 2 5-5um (Units)</i>	GRAW	04/27/2009	744	Units
<i>cyanophyte colony sp (Cells)</i>	GRAW	06/29/2009	1452	cell/mL
<i>cyanophyte colony sp (Cells)</i>	GRAW	06/29/2009	1452	cell/mL
<i>Pseudanabaena sp (Cells)</i>	GRAW	09/09/2009	680	cell/mL
<i>cyanophyte cell pair sp (Cells)</i>	GRAW	10/28/2009	544	cell/mL
<i>cyanophyte cell pair sp (Cells)</i>	GRAW	10/28/2009	544	cell/mL
<i>cyanophyte unicell, oval/rod 2 5-5um (Cells)</i>	GRAW	10/28/2009	680	cell/mL
<i>cyanophyte unicell, oval/rod 2 5-5um (Cells)</i>	GRAW	10/28/2009	680	cell/mL
<i>cyanophyte unicell, oval/rod 2 5-5um (Units)</i>	GRAW	10/28/2009	680	Units
<i>cyanophyte unicell, oval/rod 2 5-5um (Units)</i>	GRAW	10/28/2009	680	Units
<i>cyanophyte unicell, sphere 2 5-5um spp (Cells)</i>	GRAW	10/28/2009	544	cell/mL
<i>cyanophyte unicell, sphere 2 5-5um spp (Cells)</i>	GRAW	10/28/2009	544	cell/mL
<i>cyanophyte unicell sphere 2 5-5um spp (Units)</i>	GRAW	10/28/2009	544	Units
<i>cyanophyte unicell, sphere 2 5-5um spp (Units)</i>	GRAW	10/28/2009	544	Units
<i>Aphanothece sp (Cells)</i>	GRAW	11/30/2009	544	cell/mL

#### 5.7 Principales generos y especies de cianobacterias en la toma de agua cruda de Paraíso durante el 2009

Durante el 2009, en Paraíso, predominaron las *cyanophyte unicell, sphere 2,5-5um spp, oval/rod 2,5-5um* y *cyanophyte cell pair sp* Para noviembre (30 de noviembre de 2009), hubo una concentración de 2,041 cell/ml del género *Aphanothece sp* Otra especie presente en este periodo fue *Aphanocapsa delicatissima* (*A delicatissima*) y el género

*Pseudoanabaena* sp (726 cell/ml), durante febrero De este ultimo género, se conoce a la especie *Pseudoanabaena catenata* Lauterborn (*P catenata*) como toxigena Una característica de este género es que pueden o no tener células con aerotopos o vesículas gaseosas, las cuales les permite moverse en la columna de agua Las toxinas más conocidas producidas por estas cianobacterias son las neurotoxinas El Cuadro 44 presenta un resumen de las principales cianobacterias observadas durante el 2009 en las muestras que tuvieron una concentración mayor de 500 células/ml

Cuadro 43 Listado de formas, generos y especies de cianobacterias presentes en muestras de agua de la toma de Paraíso durante el 2009

Nombre de la especie	Sitio de colecta	fecha	resultado	Unidades
<i>Aphanocapsa delicatissima</i> (Cells)	PRAW	02/17/2009	544	cell/mL
<i>Aphanothece</i> sp (Cells)	PRAW	02/17/2009	953	cell/mL
<i>cyanophyte unicell, sphere 2 5-5um spp</i> (Cells)	PRAW	02/17/2009	544	cell/mL
<i>cyanophyte unicell, sphere 2 5-5um spp</i> (Units)	PRAW	02/17/2009	544	Units
<i>Pseudanabaena</i> sp (Cells)	PRAW	02/17/2009	726	cell/mL
<i>cyanophyte unicell, oval/rod 2 5-5um</i> (Cells)	PRAW	04/27/2009	817	cell/mL
<i>cyanophyte unicell, oval/rod 2 5-5um</i> (Units)	PRAW	04/27/2009	817	Units
<i>cyanophyte unicell, sphere 2 5-5um spp</i> (Cells)	PRAW	04/27/2009	544	cell/mL
<i>cyanophyte unicell, sphere 2 5-5um spp</i> (Units)	PRAW	04/27/2009	544	Units
<i>cyanophyte</i> sp (Cells)	PRAW	06/29/2009	1089	cell/mL
<i>cyanophyte</i> sp (Units)	PRAW	06/29/2009	544	Units
<i>cyanophyte cell pair</i> sp (Cells)	PRAW	06/29/2009	1089	cell/mL
<i>cyanophyte cell pair</i> sp (Units)	PRAW	06/29/2009	544	Units
<i>cyanophyte unicell</i> sp (Cells)	PRAW	06/29/2009	817	cell/mL
<i>cyanophyte unicell</i> sp (Cells)	PRAW	06/29/2009	817	cell/mL
<i>cyanophyte unicell</i> sp (Units)	PRAW	06/29/2009	817	Units
<i>cyanophyte unicell</i> sp (Units)	PRAW	06/29/2009	817	Units
<i>Aphanothece</i> sp (Cells)	PRAW	11/30/2009	2041	cell/mL

#### 5 8 Revisión de registros taxonómicos de algas y cianobacterias para agosto, septiembre y diciembre de 2009

##### 5 8 1 Agosto de 2009

Las muestras fueron colectadas el 25 de agosto de 2009 (un día después del afloramiento del 24 de agosto para nuestro estudio) De los resultados taxonómicos de algas y

cianobacterias podemos indicar que el 85,25% de la muestra estuvo dominado por las cianobacterias, seguidos de las algas verdes (13,19%) y de las diatomeas (1,51%), se encontro una cantidad minima (0,01 y 0,03%), de los grupos Euglenophyta y Pyrrhophyta (Cuadro 45) Las especies mas frecuentes del grupo de las cianobacterias fueron formas unicelulares, coloniales y las especies *M aeruginosa*, *Pseudoanabaena muscicola* (*P muscicola*) y *M wesenbergii* Estas especies son consideradas como especies potencialmente productoras de toxinas De las algas verdes estuvo presente la especie *Monoraphidium circinale* (*M circinale*), que es característica de embalses en estado mesotrófico

Cuadro 44 Grupo de algas y cianobacterias presentes en la muestra del 25 de agosto de 2009

GRAW			Especies más frecuentes
25 DE AGOSTO DE 2009			
Grupo	Cells/mL	%	
Bacillariophyta	101	1,51	<i>Eunotia sp</i> , centric diatom, <i>Navicula sp</i> y <i>Nitzschia sp</i>
Chlorophyta	884	13,19	Chlorophyte unicell, oval 2,5 µm, Chlorophyte unicell sphere 2,5 µm, <i>Monoraphidium circinale</i>
Cyanobacteria	5712	85,25	<i>Cyanophyte colony sp</i> , <i>cyanophyte unicell sp</i> , <i>cyanophyte cell pair sp</i> , <i>Microcystis aeruginosa</i> , <i>Pseudoanabaena muscicola</i> , <i>Pseudoanabaena sp</i> , <i>Aphanocapsa sp</i> , <i>Microcystis wesenbergii</i>
Euglenophyta	1	0,01	<i>Trachelomonas sp</i>
Pyrrhophyta	2	0,03	<i>Dinoflagellate sp</i>
total	6700	100,00	

5 8 2 Septiembre de 2009

Las muestras fueron colectadas el 9 de septiembre de 2009 (quince días antes de los dos registros de microcistinas de 0,46 y 0,57 µg/l en este estudio) Los resultados taxonomicos de algas y cianobacterias sugieren cinco (5) grupos de algas y las cianobacterias El 61,58% estuvo representado por las cianobacterias, el 29,54% por las

algas verdes, el 7,36% por diatomeas y el 0,65%, 0,04% y 0,83% corresponde a los grupos *Chrysophyta*, *Euglenophyta* y *Pyrrhophyta*, respectivamente (cuadro 46)

Las especies de cianobacterias más frecuentes en la muestra analizada fueron el género *Pseudoanabaena sp*, formas coloniales, unicelulares, ovaladas, células pares, tétradas y esféricas, como también, las especies *M aeruginosa* (especie potencialmente productora de toxinas), y *C ferruginea* (especie no toxica)

Cuadro 45 Grupo de algas y cianobacterias presentes en la muestra del 09 de septiembre de 2009

GRAW			Especies más frecuentes
09 DE SEPTIEMBRE DE 2009			
Grupo	Cells/mL	%	
Bacillariophyta	397	7,36	<i>Pennate diatom, Gomphonema sp, Nitzschia sp, Amphora/Cymbella sp, Navicula sp, Cocconeis sp</i>
Chlorophyta	1594	29,54	<i>Chlorophyte unicell, oval 2,5 – 5 µm, Chlorophyte unicell, sphere 2,5 – 5 µm, Monoraphidium circinale, Chlorophyte unicell, sphere 5 – 7,5 µm, Monoraphidium sp, chlorophyte unicell sp, Didymocystis fina y chlorophyte sp</i>
Chrysophyta	35	0,65	<i>Chrysophyte flagellate sp y Chrysosphaerella sp</i>
Cyanobacteria	3323	61,58	<i>Pseudoanabaena sp, cyanophyte colony, cyanophyte unicell, cyanophyte unicell, oval/rod 2,5-5 µm spp, cyanophyte cell pair spp, cyanophyte tetrad spp, cyanophyte unicell, sphere 2,5-5 µm, Microcystis aeruginosa y Cyanogranis ferruginea</i>
Euglenophyta	2	0,04	<i>Trachelomonas sp</i>
Pyrrhophyta	45	0,83	<i>Dinoflagellate sp</i>
total	5396	100,00	

### 5 8 3 Diciembre de 2009

Las muestras fueron colectadas el 15 de diciembre de 2009 (dos días antes de la mayor concentración de microcistinas, 0,90 µg/l, en nuestro estudio) Los resultados taxonomicos de algas y cianobacterias sugieren seis (6) grupos de algas y las cianobacterias De estos, el 42,40% estuvo representado por las cianobacterias, 30,85% por las algas verdes, 19,47% por diatomeas y 1,25%, 0,04%, 5,86% y 0,13% corresponde

a los grupos *Chrysophyta*, *Bacillariophyta*, *Euglenophyta*, *Miscellaneous* y *Pyrrhophyta*, respectivamente (Cuadro 47)

Las especies de cianobacterias más frecuentes en la muestra analizada fueron formas unicelulares, ovaladas y esféricas, como también, las especies *Pseudoanabaena cf limnetica*, *Planktolyngbya f limnetica* y *Aphanocapsa cf koordersii*

Cuadro 46 Grupo de algas y cianobacterias presentes en la muestra del 15 de diciembre 2009

GRAW			Especies más frecuentes
15 DE DICIEMBRE DE 2009			
Grupo	Cells/mL	%	
Bacillariophyta	452	19,47	<i>Centric diatom, Cocconeis sp</i>
Chlorophyta	716	30,85	<i>Chlorophyte unicell, oval 2,5 – 5,0 µm spp , Scenedesmus sp .Chlorophyte colony sp</i>
Chrysophyta	29	1,25	<i>Chrysophyte flagellate sp y Mallomonas sp</i>
Cyanobacteria	984	42,40	<i>Cyanophyte unicell, oval/rod 2,5 – 5 µm spp, cyanophyte unicell, sphere 2,5-5 µm spp Pseudoanabaena cf limnetica, Planktolyngbya f limnetica y Aphanocapsa cf koordersii</i>
Euglenophyta	1	0,04	<i>Trachelomonas sp</i>
Miscellaneous	136	5,86	<i>Unknown flagellate sp y unknown unicell sp</i>
Pyrrhophyta	3	0,13	<i>Dinoflagellate sp</i>
total	2321	100,00	

## **DISCUSIÓN**

### *6.1 Análisis general de las variables físico-químicas en los sitios de estudio*

A simple vista, las características ambientales de las tomas de Gamboa y Paraiso presentan contrastes. En Gamboa, a diferencia de Paraiso hay menos profundidad en la columna de agua, mayor vegetación acuática que podría poner disponible los nutrientes (en especial los fosfatos), al fitoplancton. Además, la toma de Gamboa recibe agua del río Chilibre y del tramo medio del río Chagres. En general, en los sitios de estudio hay poca transparencia en la columna de agua (< 2,0 m de profundidad), principalmente, en Paraiso donde el continuo paso de embarcaciones y las actividades de dragado pueden favorecer el incremento de las partículas en suspensión y como consecuencia el aumento en la turbiedad.

Los nutrientes son factores limitantes en los ecosistemas. Para el crecimiento del fitoplancton se requiere de una cantidad de nutrientes del medio en similar proporción a la que contiene la célula. En nuestros registros los nutrientes (nitratos, nitrógeno y fósforo total), presentaron variabilidad. Los ortofosfatos son limitantes en el agua, en consecuencia, los sistemas celulares que incorporan el nutriente se activan y el ortofosfato disponible del medio es rápidamente utilizado por los organismos (UNESCO, 2009). Los ortofosfatos presentaron un comportamiento similar, con pocas variaciones en los sitios de estudio.

En Gamboa, puede haber mayor variación en los parámetros de temperatura y oxígeno disuelto debido al continuo aporte de aguas frescas del tramo medio del río Chagres y del río Chilibre. Variaciones en la transparencia y la clorofila *a* se pueden dar por haber menor profundidad en este sitio (Gamboa).

Se encontró poca variación en la radiación solar entre Gamboa y Paraiso, tal vez porque la distancia no determina cambios significativos entre estos dos sitios (aproximadamente 13 km)

La toma de agua en Paraiso, se encuentra cerca al cauce de navegación por lo que se ve mayormente influenciada por el tránsito de embarcaciones (lanchas, remolcadores, barcos, etc), lo que sugiere una mayor turbulencia en la masa de agua. Esta turbulencia a su vez, genera cambios en la calidad de agua debido a la mezcla en la columna de agua.

Según De León (2002), “se estima que más del 50% de las floraciones de cianobacterias de aguas continentales, registradas o no, son tóxicas. A pesar del creciente aumento en los estudios sobre este fenómeno, se desconoce con precisión cuál es el factor que desencadena la formación de toxinas durante una floración. Se atribuye importancia a la temperatura, la luz, la estabilidad de la columna de agua y el pH, sin descartar otros factores ambientales y biológicos (Shapiro, 1990)”. Por otro lado, Luengo (2010), dice que “se sabe que entre el 50% y el 75% de las proliferaciones de cianobacterias son tóxicas”.

De acuerdo a la distribución porcentual de microcistinas encontradas en las tomas de agua de Gamboa y Paraiso, vemos que el 98% de las muestras analizadas no presentaron toxicidad ( $<0,4 \mu\text{g/l}$ ), esto es bueno y a su vez, podría sugerir entre otras cosas, varios escenarios:

- 1 Que las cianobacterias presentes en el fitoplancton del agua (durante la colecta de muestras), no eran géneros potencialmente productores de microcistinas
- 2 Que las cianobacterias presentes en las muestras de agua no han expresado toxicidad

- 3 Que el numero de células se mantenía vivo en la columna de agua, generalmente, cuando las células mueren es que se liberan las toxinas
- 4 Que la cantidad de cianobacterias presentes en el fitoplancton no determina una población significativa para la producción de microcistinas, etc
- 5 Otra razón podría ser, la no liberación al medio, de las endotoxinas o que el afloramiento estaba reciente. Una de las formas por las cuales las toxinas son liberadas al medio está asociada al envejecimiento de la floración o por la acción de algún tratamiento físico o químico que cause la ruptura de las células (Chorus y Bartram, 1999)

El 2% de las muestras que resultaron  $>0,4 \mu\text{g/l}$  para la microcistina (3 casos, dos de ellos en una misma fecha), serán abordado más adelante

Gamboa fue el sitio que presentó estos valores, considerados como positivos, sin embargo, vale la pena destacar que ninguno de ellos sobrepasó el valor de  $1 \mu\text{g/l}$ , valor de referencia establecido por la OMS para microcistinas en aguas de consumo

Existen ciertas condiciones ambientales que hacen vulnerable al área de Gamboa. Por ejemplo la vegetación acuática presente, la baja profundidad, el aporte de nutrientes u otros elementos que pueden descender del tramo medio del Chagres y del río Chilibre, entre otras cosas

En áreas poco profundas las macrófitas (sobre todo las enraizadas), juegan un papel en el ciclo del fósforo, esto es porque la vegetación enraizada tiene una mayor y permanente disponibilidad del fósforo en relación al fitoplancton. Las macrofitas pueden agotar el fósforo de la zona trofogenica durante épocas de intenso desarrollo (Figura 35), por tanto,

actúan como especies de bombas que extraen el fósforo del sedimento y lo ponen a disposición del fitoplancton en la columna del agua (Roldan, 2008)

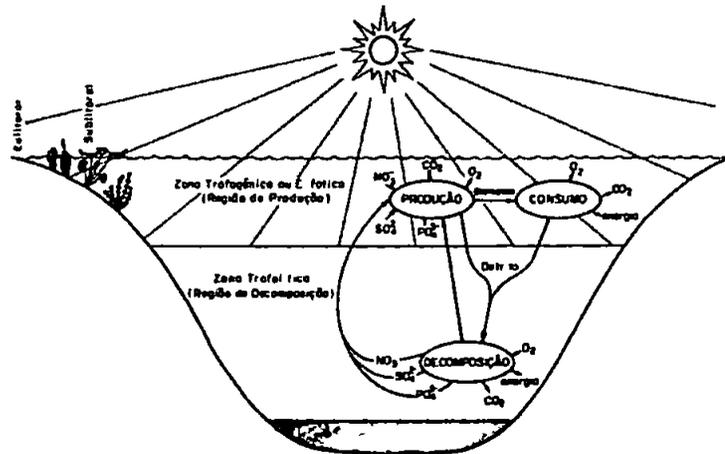


Figura 35 División de la columna de agua en zona trofogenica y trofolitica (Segundo Esteves, 1988)

En Gamboa, se registró la mayor concentración de clorofila *a*, lo que sugiere mayor productividad en esta area, se piensa que puede deberse a una mejor disponibilidad de algunos nutrientes y condiciones más favorables para las algas y cianobacterias. Recordemos que las cianobacterias tienen más ventajas competitivas sobre otros grupos de algas (Roldan, 2008)

Según Oliver y Ganf (2000 En Carrasco 2007) estaríamos hablando de un afloramiento cuando la concentración de clorofila *a* sea superior de  $10 \mu\text{g/l}$ , concentración que equivale aproximadamente a 20,000 células/ml

En Paraiso, se encontraron mayores concentraciones de nitratos, fósforo y nitrógeno total, mientras que en promedio no hubo diferencias en cuanto a las concentraciones de ortofosfatos en ambos sitios. En Paraiso no se presenta vegetación acuática ni sumergida, ni flotante ni emergente

Segun Roldan (2008), el ortofosfatos es la forma soluble y asimilable, es la manera cómo las plantas acuáticas y el fitoplancton pueden absorberlo La disponibilidad de los ortofosfatos en el agua aumenta en pH basicos y disminuye en pH ácidos, se puede decir en parte, que esto explica porque los lagos de pH basicos son más productivos que los ácidos Altas temperaturas aumentan el metabolismo de las plantas y el fitoplancton por lo que el ortofosfatos se consume más rápidamente

Estudios realizados por Zaiss (1976), demostraron que la cianobacterias *O redekei* podia almacenar fosforo como polifosfatos y metafosfatos, y utilizarlo para su crecimiento en epocas de deficiencia de fosforo en el agua

#### *6.2 Factores ambientales que influyen en la presencia de microcistinas en los sitios de muestreo del embalse Gatun 2009*

Ventajosamente, los conjuntos de variables de calidad de agua a menudo “se mueven juntas”, es decir, comparten información desde dimensiones diferentes Por ejemplo, la turbiedad, la transparencia del agua y los sólidos en suspensión son variables disímiles con unidades diferentes, que sugieren acerca de la “claridad del agua” El color y la turbiedad son dos conceptos que difieren entre sí, se tratan conjuntamente, ya que interfieren en la transmisión de la luz en las aguas naturales y, por consiguiente, regulan los procesos biológicos que en ella se realizan (Roldan, 2008)

La disponibilidad de equipos de instrumentacion sofisticados para medición y análisis de calidad de agua, permite medir decenas de variables, en ocasiones de forma simultánea Cuando esto sucede, se puede tomar ventaja de esta redundancia de informacion para estudiar fenomenos o procesos ambientales mediante la aplicación de análisis estadísticos

multivariantes que permitan explicar el evento a investigar en función de una variable o un grupo de variables

Segun Chorus y Bartram (1999), las grandes variaciones en las concentraciones de cianotoxinas regionales, estacionales, espaciales y temporales indican que la predicción o modelación de la ocurrencia de ciertas concentraciones de toxinas requiere un conocimiento comprensivo del desarrollo de la población (cepa), en diferentes tipos de ecosistemas acuaticos, así como de la variabilidad de sus “aportes de toxina” Las bases de datos para tales modelos predictivos todavía deben ser compilados

### *6 3 Análisis de los modelos de regresion lineal múltiple, embalse de Gatún, 2009*

#### 6 3 1 Modelo General

La regresión lineal multiple del modelo general presentó ajuste regular-bueno, explicando el 50% de la variabilidad de las microcistina en función del pH y la clorofila *a* La variable que mayor correlación presento con la microcistina, en este modelo, es la clorofila *a* con un 62% seguido por el pH con un 26%

Un efecto de los afloramientos de cianobacterias se relaciona con la alta productividad primaria de la comunidad planctonica Esto determina, por un lado, un incremento en el consumo de oxigeno disuelto debido a la respiracion de las algas y especialmente de los microorganismos degradadores de esa biomasa Por otra parte, se produce una alteración de las propiedades quimicas del agua, especialmente el pH, debido al consumo del carbono que puede volverse limitante para el desarrollo de otras microalgas Esto favorece la disminución de la diversidad de la biota del ecosistema

Van der Westhuizen *et al.*, (1983), publicaron que a pesar de que el crecimiento de las cianobacterias en cultivo era óptimo a pH 9, la toxicidad se veía que era mayor a pH más extremos, mayores o menores que este

### 6.3.2 Modelo para Gamboa

La regresión lineal múltiple para el modelo en Gamboa presentó buen ajuste, explicando el 60% de la variabilidad de las microcistina en función del pH y la clorofila *a*. La variable que mayor correlación presentó con la microcistina, en este modelo, es la clorofila *a* con un 73%, mientras que, el pH se correlacionó con un 22%. Vale la pena destacar que la segunda variable más correlacionada con la microcistinas, en los registros para este modelo, fue la transparencia con un 36%, sin embargo, el modelo elegido no la considero significativa.

### 6.3.3 Modelo para Paraiso

La regresión lineal múltiple para el modelo en Paraiso presentó ajuste regular-bajo, explicando el 38% de la variabilidad de las microcistina en función de la temperatura, el pH, la transparencia, la turbiedad y el fósforo total. La variable que mayor correlación presentó con la microcistina, en este modelo, es el pH con un 31%, seguido por la temperatura y el fósforo total con un 22%, y la turbiedad y transparencia con 13 y 7%, respectivamente.

Según Shapiro (1990 En De Leon, 2002) “A pesar del creciente aumento en los estudios sobre este fenómeno, se desconoce con precisión cuál es el factor que desencadena la formación de toxinas durante un afloramiento. Se atribuye importancia a la temperatura, la luz, la estabilidad de la columna de agua y el pH, sin descartar otros factores ambientales y biológico”

Para crear las condiciones favorables al desarrollo de un afloramiento basta con que estén presentes algunos y no todos los factores mencionados, dependiendo de las características naturales de los sistemas acuáticos

En condiciones de poca luz (debido a la gran densidad de población en aguas eutroficas que lleva a la turbiedad de estas), las cianobacterias pueden mantener una tasa de crecimiento relativamente mayor que el resto de organismos fitoplanctónicos presentes (Chorus *et al*, 1999) Por otro lado, las cianobacterias pueden regular su flotabilidad mediante vesículas de gas para colocarse en la columna de agua a aquellas profundidades donde la disponibilidad de nutrientes y luz es la adecuada (Walsby *et al*, 1989)

Algunos estudios indican que el fósforo no influye en la producción de microcistinas por *M aeruginosa* (Utkilen *et al*, 1995), pero otras publicaciones anteriores y posteriores muestran que en condiciones limitantes de fosfato, aumenta la síntesis de la toxina (Wicks *et al*, 1990, Oh *et al*, 2000) Sin embargo, informes del contenido de microcistina-LR en “*blooms*” de lagos canadienses del año 2002, revelan que una alta cantidad de fósforo disuelto se corresponde con una mayor concentración de dicha toxina (Vezie *et al*, 2002)

#### 6 3 4 Modelo para la estación seca

La regresión lineal múltiple para el modelo en la estación seca presentó un ajuste regular-bueno, explicando el 49% de la variabilidad de las microcistinas en función de la temperatura, el pH y la transparencia. La variable que mayor correlación presentó con la microcistina, en este modelo, es la temperatura con 63%, seguido de la transparencia con

44% y el pH con un 31%. Otras variables presentaron correlaciones con la microcistina (radiación solar, turbiedad, nitratos y oxígeno), pero el modelo elegido no las consideró significativas.

Según De León (2002) "El aumento de la temperatura del agua sobre los 20°C favorece el desarrollo de las cianobacterias, ya que incrementa las tasas de crecimiento y de reproducción celular. Otro efecto del aumento de la temperatura está relacionado con la estratificación de la columna de agua. Al incrementarse la temperatura de las capas superficiales, se forma un gradiente vertical de densidad que resulta en la estratificación de la columna de agua. En ausencia de viento o con baja turbulencia (velocidad del viento menor a 3 m/seg), se acelera el proceso de sedimentación de las partículas, incluidas otras especies de algas, el agotamiento de los nutrientes y la acumulación superficial de las cianobacterias".

Vela (2007) indica que "influye también la temperatura de las aguas así como el pH en la formación de las proliferaciones, siendo más propicias temperaturas de entre 20 y 30°C y pH neutros o básicos. Por esta razón, el verano es la época de más incidencia, por darse condiciones de más temperatura y calma de las aguas".

El efecto de la luz ha sido el único estudiado hasta el momento a nivel molecular (Kaebernick *et al.*, 2000). Se investigaron los niveles de transcritos de los genes *mcyB* (péptido sintetasa) y *mcyD* (polipéptido sintetasa) a diferentes intensidades de luz observándose un aumento de la transcripción en condiciones de alta luz. A pesar de esto, los autores no han encontrado una correlación con la cantidad de microcistina, que es constante o incluso disminuye al aumentar la intensidad de luz.

En condiciones de intensa radiación solar, las microcistinas pueden sufrir degradación fotoquímica lenta y procesos de isomerización, con una velocidad de reacción que aumenta por la presencia de pigmentos celulares solubles en agua. Una degradación más rápida bajo condiciones de radiación solar, se ha reportado en presencia de sustancias húmicas que podrían actuar como fotosensibilizantes en concentraciones de 2-16 mg/l de carbono orgánico disuelto.

### 6.3.5 Modelo para la estación lluviosa

La regresión lineal múltiple para el modelo en la estación lluviosa, presentó un buen ajuste, explicando el 60% de la variabilidad de las microcistinas en función de la temperatura, los nitratos y la clorofila *a*. La variable que mayor correlación presentó con la microcistina, en este modelo, es la clorofila *a* con un 71%, seguido de los nitratos con un 44% y la temperatura con un 23%. Otras variables fueron significativas (oxígeno disuelto, turbiedad y ortofosfatos), sin embargo, el modelo no las consideró significativas.

Los desarrollos de las cianobacterias están asociados con altas concentraciones de nutrientes. El fósforo usualmente es el nutriente clave que controla la proliferación, aunque la disponibilidad de nitrógeno puede ser una variable importante a evaluar debido a que puede influenciar en la dominancia de especies que fijan o no nitrógeno.

Especies no fijadoras de nitrógeno, tales como *Microcystis*, producen más toxinas bajo condiciones ricas en nitrógeno. Las especies fijadoras de nitrógeno son no-dependientes del nitrógeno en el medio para su producción de toxinas.

#### *6.4 Resumen y comparación entre los modelos de regresión lineal múltiple*

En general se puede decir que los cinco modelos son buenos y cada uno explica una situación distinta, tanto si lo vemos de manera global, por sitio o por estacionalidad. El factor estacionalidad juega un papel muy importante en este tipo de investigaciones, toda vez, que las condiciones en cada sitio varían de acuerdo a la estación. Si vemos las variables significativas (pH y clorofila *a*), en el modelo general y para Gamboa son las mismas. El modelo general contiene toda la información del estudio, sin embargo, es en Gamboa donde se presentaron resultados con concentraciones más altas de microcistina (valor máximo de 0,90 µg/l). Estos resultados, a su vez, se evidenciaron en meses de la estación lluviosa (septiembre y diciembre).

En Paraiso, la concentración máxima de microcistina fue de 0,35 µg/l, menos del límite de detección del método, por tanto, podríamos decir que no se presentó el objeto de estudio en este sitio, sin embargo, el modelo incluye cinco variables que explican a las microcistinas, siendo más representativas el pH, la temperatura y el fósforo total, pero vemos que el modelo considera también a la transparencia y la turbiedad, recordemos que este sitio está influenciado por el tráfico de embarcaciones y actividades de dragado, lo que tiene un impacto en la turbiedad del agua y esta a su vez en la transparencia de la misma. También, debemos recordar que la turbiedad tiene un impacto negativo para el fitoplancton, pero en ocasiones, para las cianobacterias esta puede ser una ventaja ya que las cianobacterias regulan su movimiento en la columna de agua, mientras que las algas no lo pueden hacer. Favoreciendo así su crecimiento y desarrollo sin competencia.

Durante los meses de la estación seca tampoco se presentaron registros de microcistina con concentraciones altas (valor máximo de 0,16 µg/l). Las variables significativas en

este modelo son la temperatura, el pH y la transparencia siendo el más significativo la temperatura

En cualquier año o estación, los cuerpos de agua individuales pueden tener sus propias poblaciones de cianobacterias, y su dominancia dependerá no solo del clima sino también de condiciones geoquímicas específicas del propio cuerpo de agua. Si no hubiera grandes cambios en dichas condiciones, los afloramientos tóxicos probablemente se repetirían anualmente en aquellos cuerpos de agua que tienen historia de afloramientos tóxicos.

#### *6.5 Evaluación estadística de los modelos de regresión lineal múltiple*

Desde el punto de vista estadístico y para considerar la robustez de los modelos de regresión lineal múltiple usados para predecir la concentración de microcistina en los sitios de estudio, se evaluó el nivel de adecuación de la técnica a partir de la verificación de los supuestos que debe tener un modelo de regresión lineal múltiple. Estos son linealidad, independencia, homocedasticidad, normalidad de los residuos tipificados y no-colinealidad.

De los cinco modelos de regresión, el de la estación seca y lluviosa son los que cumplen con todos los supuestos que exige la regresión, sin embargo, dado que en el modelo de la estación seca no se encontraron concentraciones de microcistina importantes y el  $r^2$  del modelo es más bajo (0,494) comparado al modelo de la estación lluviosa ( $r^2$  de 0,596), este último se convierte en el mejor modelo de predicción para las microcistinas en este estudio. Los otros tres modelos, no son malos pero no cumplen con el supuesto de autocorrelación de los residuales lo que podría tratarse mediante corrección de observaciones o eliminación de datos, pero esto debería tratarse más en detalle. Vale la pena destacar que el modelo general tampoco cumple con el supuesto de normalidad de los residuales,

estableciéndose como el modelo menos robusto. Tres de los modelos explican el 50% o más de la variabilidad de las microcistina, excepto el de Paraiso y la estación seca donde no hubo registros importantes de microcistina. Las variables más importantes en todos los modelos son el pH, la clorofila, la temperatura, la transparencia, la turbiedad, el fósforo total y los nitratos.

#### *6.6 Comentarios generales de los resultados encontrados*

A diferencia de otras sustancias químicas tóxicas, las cianotoxinas se encuentran usualmente contenidas dentro de las células cianobacterianas o unidas a ellas, y sólo un pequeño porcentaje del total se encuentra disuelto en el agua, a menos que las toxinas se hayan liberado por el envejecimiento de la floración o el tratamiento con alguicidas que causen la ruptura celular.

La liberación de toxinas al agua circundante para formar toxina disuelta parece ocurrir más frecuentemente durante la senescencia de la célula, muerte o lisis y no por excreción continua. Por lo tanto, las poblaciones de cianobacterias en las floraciones sanas producen escasa toxina extracelular y se han medido en un rango de 0,1-10 µg/l, en tanto que las concentraciones de toxina unida a las células son superiores en varios órdenes de magnitud.

En lagos o ríos, las toxinas liberadas desde las células son rápidamente diluidas por la gran masa de agua, especialmente si se produce por agitación vigorosa por acción de los vientos o las corrientes. Sin embargo, las concentraciones de toxinas disueltas pueden ser mucho mayores en floraciones envejecidas en declinación.

Las microcistinas se localizan en un 90% en el interior de las cianobacterias que las producen. Mediante estudios de inmunolocalización con partículas de oro (“*immunogold*”) realizados por Young *et al.*, (2005), se detectó la presencia de microcistina preferentemente asociada al área de los tilacoides (69%), incluyendo la membrana externa de estos, en el nucleoplasma (19%) y en la periferia de los granulos de polifosfatos (3%)

Las cianobacterias pueden producir varias toxinas simultáneamente y se ha caracterizado más de una microcistina a partir de una única cepa, aunque usualmente solo una o dos toxinas son dominantes para una cepa específica. *Microcystis sp.*, comúnmente *M. aeruginosa*, se relaciona más frecuentemente con florecimientos algales hepatotóxicos en todo el mundo.

La sedimentación de células vivas, no lisadas, por ejemplo en contacto con zooplancton o partículas fecales, podría llevar a la acumulación y persistencia del material tóxico en los sedimentos. Estas células sedimentadas fácilmente pueden sufrir lisis por acción de las bacterias y protozoos del sedimento, liberando rápidamente las toxinas. Debe tenerse presente que las microcistinas retenidas en las células intactas en el sedimento pueden persistir por varios meses.

Los estudios en cultivos, indican que las microcistinas se degradan sólo muy lentamente (en el orden de semanas), cuando están dentro de las células vivas. Del mismo modo, las películas de *M. aeruginosa* que se secan en las orillas de los lagos pueden contener altas concentraciones de microcistinas por varios meses. Estas toxinas son liberadas nuevamente al cuerpo de agua cuando se resurgen. Por tanto, existe un potencial para

la concentración localizada de microcistinas disueltas en ausencia de células vivas o de floraciones recientemente colapsadas

Estudios de laboratorio con cepas aisladas de diferentes especies revelan que la producción de toxinas (microcistinas) y el contenido de cianobacterias pueden ser afectados por una amplia variedad de factores ambientales, entre los que incluye la temperatura, el pH, la luz, el nitrógeno, el fósforo y el hierro (Huisman *et al* , 2005)

En un estudio similar *Environmental factors influencing microcystin distribution and concentration in the Midwestern United States*, (Graham *et al* , 2004), cuyo objetivo era determinar la asociación de variables ambientales con las altas concentraciones de la (hepatotóxica cianobacteriana) microcistina, se utilizó la *interval máxima regresión* (IMR) El resultado fue que las variables ambientales explicaron menos del 50% de la variación en los valores de microcistinas. Por tanto, se concluyó que las concentraciones de microcistinas estaban relacionadas con las variables físicoquímicas, pero que las relaciones no siempre siguen un comportamiento lineal

Si comparamos este estudio con el nuestro, vemos que en el mismo se utilizó un modelo no lineal y las variables ambientales explicaron menos del 50% la concentración de microcistinas, sin embargo, nuestros modelos explican en su mayoría más del 45% la concentración de microcistinas, excepto en el modelo de Paraiso, donde se explica el 38%. Sin embargo, vale la pena destacar que en este estudio los valores de microcistinas fueron bajos

### 6.7 Análisis de los registros de microcistinas detectadas en Gamboa durante 2009

En estudios de los embalses españoles, los meses en que probablemente se presentan cianotoxinas son septiembre y octubre, en menor proporción, noviembre. Un análisis especial merece el mes de Julio Carrasco (2007), indica que esto podría indicar que en general existe la potencialidad tóxica en la población.

En este estudio, se considera que el potencial para producir la toxina está presente en ambos sitios (Gamboa y Paraiso), sobre la base de los resultados encontrados (Cuadro 48). Sin embargo, el 98% que fue menor de 0,4 µg/l, también sugieren afloramientos sanos.

Vale la pena destacar que cuando hayan resultados positivos estos deben ser confirmados mediante técnicas más sofisticadas y robustas.

Cuadro 47 Cuadro de resumen que contrasta entre los análisis de microcistinas realizados en este estudio y resultados de la ACP de muestras enviadas a un laboratorio en el extranjero.

Fecha	Resultados de Microcistinas	
	Resultados del presente estudio	Resultados (ACP) enviados al lab en el extranjero
24 de agosto de 2009	< 0,4 (0,03) µg/l	
25 de agosto de 2009		0,3 µg/l
9 de septiembre de 2009		<0,15 µg/l
24 de septiembre de 2009	0,46/0,57 µg/l	
15 de diciembre de 2009		<0,15 µg/l
17 de diciembre de 2009	0,90 µg/l	

A pesar de que los casos mayores de 0,4 µg/l se presentaban en Gamboa, no se descarta que Paraiso este exento de la producción de microcistinas. La referencia histórica indica

que para el 2007 hubo afloramientos en Paraiso (EAA-CA, 2007) No se conoce a ciencia cierta que hace que las toxinas sean liberadas al medio

Las microcistinas se han considerado como metabolitos secundarios, aunque, dada la complejidad de su estructura y el sistema de biosíntesis tan complicado que presentan, parece extraño que las cianobacterias productoras sintetizen este compuesto en cantidades tan elevadas si no les aporta ningun beneficio (Young *et al*, 2005) Por eso, se lleva especulando muchos años sobre el posible papel que pueden ejercer estas moléculas en las células productoras así como en el exterior celular Se han propuesto varias funciones para ellas sin haberse llegado a una conclusión clara

#### *6 8 Análisis de los registros taxonómicos de algas y cianobacterias durante el 2009*

Los datos taxonómicos de las algas y cianobacterias recopilados por la ACP y que son realizados en un laboratorio en el exterior (BCS Laboratories Inc EEUU) fueron revisados A pesar de que estos no se corresponden a las fechas de muestreo de nuestra investigación, han sido considerados porque se quiere conocer la estructura fitoplanctónica en Gamboa y Paraiso (durante el 2009) y en particular, en los meses de agosto, septiembre y diciembre, donde se encontraron concentraciones de microcistina y clorofila *a*, significativos Los registros corresponden a la toma de agua de Gamboa

##### *6 8 1 Análisis de los principales géneros y especies de cianobacterias en la toma de agua de Gamboa durante el 2009*

Al evaluar los principales géneros y especies de cianobacterias en la toma de agua cruda de Gamboa y Paraiso (Cuadro 43 y 44), vemos que es frecuente la presencia de cianofitas unicelulares, ovaladas, coloniales, etc y algunas especies no tóxicas como *C. ferruginea* y

*Aphanothece* durante el periodo analizado, esto podría dar respuesta a ese 98% de las muestras negativas para la toxina microcistina. Sin embargo, no dejamos mencionar la presencia de algunos generos como *Pseudoanabaena* y *Aphanocapsa*, que tienen el potencial para producir toxinas y que en minoría estuvieron presentes.

Como se registra en el Cuadro 43, hay dominancia de cianobacterias unicelulares, ovaladas, coloniales de 2,5-5  $\mu\text{m}$ , además de dominancia de dos especies no tóxicas como lo son *C. ferruginea* y *Aphanothece*, y de la especie *Pseudoanabaena*, la cual es considerada como un genero potencialmente tóxico. Entre las toxinas que produce se conocen las microcistinas, saxitoxinas como neosaxitoxinas y goniautoxinas (Azevedo, 2002). Algunas *Pseudoanabaena* son endogleicas, es decir, que pueden vivir en el mucilago de otras cianobacterias como *Microcystis sp*.

#### 6.8.2 Análisis de los principales generos y especies de cianobacterias en la toma de agua de Paraíso

En Paraíso, igualmente, hay dominancia de cianofitas unicelulares, ovaladas, redondas, en pares, además del genero *Aphanothece sp* (no tóxica) y del genero *Pseudoanabaena*, y la especie *A. delicatissima*. En el Cuadro 44 se observa, sólo dos generos potencialmente tóxicos en Paraíso, lo que pudiera explicar la ausencia de microcistinas para este periodo.

#### 6.9 Análisis de los registros taxonomicos de algas y cianobacterias para agosto, septiembre y diciembre de 2009

##### 6.9.1 Agosto de 2009

El 24 de agosto hubo una concentración de clorofila *a* de 181,2  $\mu\text{g/l}$ . Vemos que al día siguiente hubo predominancia de cianobacterias (85,25%), seguidos de las algas verdes.

(13,19%) Las cianobacterias de importancia que estuvieron presentes fueron *M aeruginosa*, *P muscicola*, *Pseudoanabaena*, *Aphanocapsa* y *M wesenbergii* (Cuadro 45) Consideramos que las cianobacterias presentes en la fecha del afloramiento tienen el potencial de producir toxina, sin embargo, estas no habían sido liberadas al medio. Es posible que cuando el afloramiento envejezca y las células mueran se liberen toxinas al medio (Gianuzzi, 2009)

La presencia del alga *M circinale* es indicadora del estado trófico de los embalses (Roldan, 2008). En este caso del estado mesotrófico, lo que coincide con lo descrito en el informe de calidad de agua 2008-2009 de la cuenca del canal de Panamá para estos sitios (Gamboa y Paraiso) (ACP, 2008-2009)

#### 6 9 2 Septiembre de 2009

El 24 de septiembre se presentaron concentraciones de microcistinas de 0,46 y 0,57 µg/l. Al revisar los registros taxonómicos de algas y cianobacterias encontrados para el 9 de septiembre de 2009, vemos la predominancia de las cianobacterias (61,58%), sobre el resto del fitoplancton (algas verdes = 29,54%, y diatomeas = 7,36%, etc). Para esta misma fecha (9 de septiembre de 2009), los resultados de microcistinas (provenientes del laboratorio de Estados Unidos), fueron negativos (<0,15 µg/l). En la taxonomía del 9 de septiembre las especies de importancia presentes fueron *Pseudoanabaena sp* y *M aeruginosa*.

#### 6 9 3 Diciembre de 2009

El 17 de diciembre de 2009 se presentó una concentración de microcistinas de 0,90 µg/l y una concentración de clorofila *a* igual a 47 µg/l. Lo que pudiese sugerir un afloramiento con presencia de cianobacterias toxigénicas.

Los resultados de la taxonomía de algas y cianobacterias para el 15 de diciembre sugieren predominancia de las cianobacterias (42,40%), seguidos de las algas verdes (30,85%), y de las diatomeas (19,47%), etc Para esta última fecha, las microcistinas no fueron detectadas por el laboratorio en el extranjero ( $<0,15 \mu\text{g/l}$ )

Las especies de importancia toxicológica que estuvieron presente en la muestra del 15 de diciembre fueron *Pseudoanabaena cf limnetica*, *Planktolyngbya f limnetica* y *Aphanocapsa koordersii*

## **CONCLUSIONES**

- En cuanto a la calidad de agua, existen contrastes entre Gamboa y Paraiso. Principalmente, en parámetros como la turbiedad, transparencia y nutrientes, entre otros.
- Durante el 2009, el 98% de las muestras analizadas presentaron valores de microcistinas por debajo de los límites de detección del método.
- El 2% de las microcistinas detectadas se presentó en Gamboa, en los meses de septiembre y diciembre.
- De la revisión en los registros taxonómicos existentes, en Paraiso hubo presencia de las cianobacterias *Pseudoanabaena sp* y *Microcystis sp*, sin embargo, durante 2009 no se presentó toxicidad en las muestras de este sitio.
- La mayor concentración de microcistinas fue de 0,9 µg/l el 17 de diciembre de 2009 con una concentración de clorofila de 47,6 µg/l. Esto sugiere estar ante la presencia de un afloramiento de cianobacterias. Sin embargo, este valor de microcistina no sobrepasa el valor de 1 µg/l establecido por la OMS como referencia en agua de bebida.
- La mayor concentración de clorofila *a* fue de 181,2 µg/l, el 24 de agosto de 2009, sin embargo, no se reportó toxicidad en la muestra colectada ese día.
- Hay mayor representación (porcentaje) del grupo de cianobacterias, con respecto a otros grupos en los sitios de estudio. Los principales géneros de cianobacterias

encontrados no son considerados como tóxicos. Ejemplo *C. ferruginea*. Sin embargo, algunas especies tóxicas estuvieron presentes en las muestras *M. aeruginosa*, *M. wesenbergii* y *Pseudoanabaena* sp.

- El mejor modelo de regresión lineal múltiple se representó en la estación lluviosa y las variables de importancia fueron la temperatura, los nitratos y la clorofila *a*. Estas explican en un 60% la variabilidad en la concentración de microcistinas.
- El principal género de cianobacterias en Gamboa y Paraiso durante el 2009 fueron las cianófitas unicelulares, esféricas, cilíndricas, etc.
- De la revisión taxonómica de algas y cianobacterias para los meses de agosto, septiembre y diciembre hubo mayor representación del grupo de las cianobacterias (85, 62 y 42%, respectivamente).
- Lo encontrado en este trabajo, sugiere un monitoreo de manera regular en los sitios o cuerpos de agua que se usen para el abastecimiento de agua para consumo humano. Esto debido a que, si estos presentan cianobacterias potencialmente productoras de toxinas en algún momento del año.
- En el modelo de regresión lineal múltiple realizado en Paraiso y para la estación seca, no se presentó concentraciones de microcistinas superiores al límite de detección del método.
- Los modelos de regresión lineal múltiple en la estación seca y lluviosa, fueron los que cumplieron con todos los supuestos que exige un modelo de regresión.

Pareciera que el efecto de estacionalidad juega un papel importante en el fenómeno que se quiere estudiar y este debe ser considerado para futuras modelaciones

- El modelo general de regresión lineal múltiple (el cual comprende todos los registros), fue el menos robusto, dado al incumplimiento de varios de los supuestos de la regresión
- Hubo variables que presentaron correlación baja-regular con las microcistinas en algunos de los modelos, sin embargo, no fueron significativas en los mismos. Por ejemplo, la transparencia en el modelo para Gamboa, la turbiedad, los nitratos, el oxígeno disuelto y la radiación solar, en el modelo para la estación seca y el oxígeno disuelto, los ortofosfatos y la turbiedad, en el modelo para la estación lluviosa
- De los cinco modelos, cuatro explican 50% de la variabilidad de las microcistinas. De los cuatro, dos explican el 60% (modelo de Gamboa y para la estación lluviosa). El modelo en Paraiso tuvo la menor explicación de la variabilidad en las microcistinas (38%)
- No se puede decir a ciencia cierta cuáles son las variables ambientales que pueden influir en la presencia de las microcistinas en un sitio determinado, dependerá mucho de las condiciones ambientales de tal sitio, de su geomorfología, de los procesos físico-químicos en la calidad de agua que allí se den y entre otras cosas. Sin embargo, hay variables que son comunes en este tipo de estudios. Por

ejemplo el pH, la concentración de clorofila *a*, los nutrientes (nitratos, ortofosfatos) y la temperatura

- En algunos lugares del mundo, es común los afloramientos de cianobacterias en el verano (estación seca) En este estudio, hemos visto que los afloramientos pequeños se han presentado en meses de la estación lluviosa. Esto lleva a pensar, que las cianobacterias son un grupo altamente competitivo, dominante y con muchas ventajas fisiológicas, lo que les permite ser un grupo altamente exitoso en cualquier época del año, aunque hay meses que son más frecuentes
- Sin subestimar el área de Paraiso, pareciera que Gamboa es más vulnerable a la presencia de cianobacterias, donde hay mayor riesgo si se presentan cianobacterias potencialmente peligrosas

## **RECOMENDACIONES**

- Para la aplicación de otros modelos u otros tipos de regresión sería interesante considerar otras variables de interés, como por ejemplo el viento, concentraciones de hierro y amonio
- A pesar de que los métodos de ELISA son métodos de *screening* permiten detectar microcistinas en muestras de agua Sin embargo, es recomendable confirmar mediante metodologías más sofisticadas, por ejemplo, la cromatografía líquida con detectores de masa que permiten distinguir entre tipos o géneros de microcistinas u otras toxinas
- Considerar tecnología moderna para la detección de afloramientos de algas y cianobacterias con la finalidad de establecer programas de vigilancia en función del número de células de algas y cianobacterias
- Revisar las normas de calidad de agua en nuestro país e incorporar nuevos parámetros, como la presencia de cianobacterias y sus toxinas Consideramos que en la actualidad las normas deben ajustarse a las situaciones de calidad de agua que se presentan a nivel mundial
- Realizar ensayos de eco-toxicología con organismos indicadores (*Daphnia sp*, *Ceriodaphnia sp*, etc), para encontrar concentraciones de microcistinas (u otra toxina de cianobacteria), en donde hay cambios significativos en los organismos acuáticos ocasionados por las concentraciones de toxinas de cianobacterias en el ambiente
- Realizar análisis de tendencia para algunos parámetros como la temperatura del agua, el pH, la clorofila y las concentraciones de nutrientes El objetivo sería evaluar si estos parámetros se han mantenido, han disminuido o se han incrementado De esta manera, se pueden establecer programas de monitoreo más frecuente, y sobre todo, si se trata de sitios que son utilizados para el abastecimiento de agua a la población humana

- Evaluar medidas de mitigación (preventivas o correctivas), en caso de afloramiento de cianobacterias, señalizaciones, inspecciones visuales, entre otras, etc
- Capacitarnos más en el tema, buscar experiencias de países vecinos que han afrontado problemas con las cianobacterias Brasil, Uruguay, Guatemala, etc
- Incorporar en las plantas potabilizadoras de agua, la medición de compuesto como la Geosmina y 2-Metil-Isoborneol implicados en problemas de olor y sabor en el agua Estos son compuestos cuya fuente pueden ser cianobacterias o actinomicetes
- Continuar con el monitoreo de las microcistinas y evaluar la presencia de otros grupos de cianotoxinas (cilindrospermopsinas, saxitoxinas, etc), que pudiesen estar presentes en el agua, dada la diversidad de especies potencialmente peligrosas que existen en el agua y que pudiesen dominar durante un afloramiento
- Implementar en nuestros laboratorios (Universidad de Panamá u otros), métodos para la detección de toxinas de cianobacterias mediante técnicas como la cromatografía líquida con detectores de masa (LC/MS)
- Utilizar otros modelos de tipo lineal y no lineal para la evaluación en este tipo de estudios Considerando además, la cantidad de registros que se encuentren por debajo de los límites de detección de los métodos
- Realizar estudios similares a este, considerando, concentraciones de microcistinas altas, esto podría tener la finalidad de evaluar si los factores que rigen la presencia de las mismas en este estudio, se mantienen cuando las concentraciones son superiores

## **BIBLIOGRAFÍA**

- ACP (2004) *Resultados de algas y cianobacterias* Panamá
- ACP (2008-2009) *Informe de Calidad de Agua de la Cuenca del Canal Panama* Division de Agua, Unidad de Calidad de Agua
- Aguilar, E (2002) *Informe tecnico Abundancia y caracterizacion cualitativa de las microalgas observadas en el Lago Gatun* Panamá Universidad de Panamá-Autoridad del Canal de Panamá
- Aguilar, E (2002) *Informe tecnico Abundancia y caracterización cualitativa de las microalgas observadas en el Lago Gatun Proyecto de profundizacion del Canal de Panama* Panamá Universidad de Panamá-Autoridad del Canal de Panamá
- Aguilar, E (2003a) *Informe técnico Abundancia y caracterizacion cualitativa de las microalgas observadas en el Lago Gatun (segundo análisis) Proyecto de profundizacion del Canal de Panama* Panamá Universidad de Panamá-Autoridad del Canal de Panama
- Aguilar, E (2003b) *Informe tecnico Abundancia y caracterización cualitativa de las microalgas observadas en seis estaciones del Lago Gatún (tercer análisis) Proyecto de profundizacion del Canal de Panama* Panamá Universidad de Panamá-Autoridad del Canal de Panamá
- Aguilar, E , & Pérez, M (2004) *Informe técnico Colecta y analisis de muestras biológicas de los Lagoa Gatún y Miraflores N°1 Fitoplancton* Panamá Universidad de Panamá-Autoridad del Canal de Panamá
- Anónimo (2002) *Parametros fisico-químicos Luz* En Anonimo, *Parametros fisico-químicos* (págs 1-16) Mayagües Universidad de Puerto Rico
- Arcia, J (5 de Enero de 2007) *Mala calidad del agua afecta a los usuarios* *La Prensa*, págs 2-4
- Aubriot, L (2008) *Flexibilidad de la cinetica de incorporacion de fosfato por fitoplancton a las fluctuaciones en el suministro del nutriente* Montevideo Tesis de Doctorado PEDECIBA-UDELAR
- Aubriot, L , Wagner, F , & Falkner, G (2000) *The phosphate behavior of phytoplankton communities in eutrophic lakes reflects alterations in the phosphate supply* *European Journal of Physiology*, 255-262
- Autoridad Nacional del Ambiente, A (2006) *Manual de curso de capacitación Elaboracion de las normas de calidad ambiental para aguas naturales* *Calidad*

*de aguas naturales características principales, su gestión y control* (pág 15)  
Panamá Contrato BID N° PAN61-2005, CSI Ingenieros

- Azevedo, S , Carmichael, W , Jochimsen, E , Rinehart, K , Lau, S , Shaw, G , & Eaglesham, G (2002) Human intoxication by microcystins during renal dialysis treatment in Cuaruaru-Brazil *Toxicology*, 441-446
- Baker, J , Entsch, B , Neilan, B , & McKay, D (2002) Monitoring changing toxigenicity of a cyanobacterial bloom by molecular methods *Apply Environmental Microbiology*, 6070-6076
- Bonilla, S (2009) *Cianobacterias planctónicas del Uruguay, Manual para la identificación y medidas de gestión* Montevideo Documento técnico PHI-LAC, N°16 UNESCO
- Braum, A , & Pfeiffer, T (2002) Cyanobacterial bloom as the cause of a Pleistocene large mammal assemblage *Paleobiology*, 139-154
- Bravo, L , Tomasini, A , Sánchez, J , & Moeller, G (2012) Estudio de eutroficación del lago de Pátzcuaro, Mich , y su relación con los florecimientos de cianobacterias *XXII Congreso Nacional de Hidráulica* (pags 1-7) México UNAM-Campus Morelos IMTA
- Cane, D , Walsh, C , & Khosla, C (1998) Harnessing the biosynthetic code combinations, permutations and mutations *Science*, 63-68
- Carmichael, W (1996) Liver failure and human deaths at a hemodialysis centre in Brazil microcystins as a major contributing factor *Harmful Algae News*, 15 11
- Carmichael, W (2011) Curso de entrenamiento Afloramiento de las algas nocivas - metodos de gestión de la calidad del agua, la salud humana y ambiental Panama Unidad de Calidad de Agua, Autoridad del Canal de Panamá
- Carmichael, W , & Falconer, I (1993) Diseases related to freshwater blue-green algal toxins and control measures En I R Falconer, *Algal toxins in seafood and drinking water* (págs 187-209) San Diego, CA 92101 Academic Press, Inc
- Carrasco, D (2007) *Cianobacterias planctónicas y cianotoxinas en embalses españoles* España Tesis Doctoral Universidad Autonoma de Madrid
- Chorus, I (2005) *Risk Management and Regulation in Different Countries* Berlin Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt)
- Christiansen, G , Fastner, J , Erhard, M , Borner, T , & Dittmann, E (2003) Microcystin Biosynthesis in Planktothrix Genes, Evolution, and Manipulation *Journal of Bacteriology*, 564-572

- Clesceri, L , Greenberg, A , & Eaton, A (2005) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* Washington, DC 20005-2605 American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation
- Codd, G , Bell, S , & Brooks, W (1989) Cyanobacterial Toxins in Water *Water Science & Technology*, 1-13
- Decreto, R (2003) *140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen criterios sanitarios de la calidad de agua de consumo humano y desarrollo* España Artículo 27 7
- Dokulil, M , & Teubner, K (2000) Cyanobacterial dominance in lakes *Hydrobiologia*, 1-12
- Drouet, F (1937) Some Myxophyceae from the Canal Zone *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 599-604
- EAA-CA (2007) *Informe en la toma de agua de Paraiso* Panamá Autoridad del Canal de Panamá
- Echenique, R , & Aguilera, A (2009) Floraciones de cianobacterias toxígenas en la Republica de Argentina antecedentes En L Gianuzzi, *Cianobacterias y cianotoxinas Identificación, toxicología, monitoreo y evaluacion de riesgo* (págs 53-65) Corrientes, Argentina Instituto Correntino del Agua y Administración de Obras Sanitarias de Corrientes
- Echenique, R , Giannuzzi, L , & Ferrari, L (2003) Estudio sobre la calidad del agua de red de la ciudad Bahia Blanca, Argentina *Anales 13° Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente*, (pags 1-18) Argentina
- Echenique, R , Giannuzzi, L , & Ferrari, L (2006) Drinking water problems related to water supply in Bahia Blanca, Argentina *Acta Toxicologica Argentina*, 23-30
- Edge, R , McGarvey, D , & Truscott, T (1997) The carotenoids as anti-oxidants — a review *Photochemistry and Photobiology B Biology*, 189-200
- Esteves, S (1988) *Fundamentos de Limnologia* Rio de Janeiro Interciencia Ltda
- Falconer, I (1989) Effects on human health of some toxic cyanobacteria (blue-green algae) in reservoirs, lakes and rivers *Toxicity assessment*, 175-184
- Falconer, I (1998) *Algal toxins and human health* Australia The handbook of Environmental Chemistry
- Falconer, I , Batram, J , Chorus, I , Kuisper-Goodman, T , Utkilen, H , Burch, M , & Codd, G (1999) Safe level and safe practices En I Chorus, & J Bartram, *Toxic*

*cyanobacteria in water A guide to their public health consequences, monitoring and management* (pags 113-153) London E&FN Spon

- Fastner, J , Neumann, U , Wirsing, B , Weckesser, J , Wiedner, C , & Chorus, I (1998) Microcystins (hepatotoxic heptapeptides) in German fresh waters *Environmental toxicology* , 13-22
- Fogg, G (1976) Release of glycollate from tropical marine plants *Australian Journal Of Plant Physiology*, 57-61
- Francis, G (1878) Poisonous Australian Lake *Nature*, 11-12
- Francis, G , Hertzberg, S , Andersen, K , & Liaaen-Jensen, S (1970) New carotenoid glycosides from *oscillatoria limosa* *Phytochemistry*, 629-635
- Gianuzzi, L (2009) *Cianobacterias y cianotoxinas identificacion, toxicología, monitoreo y evaluacion de riesgo* Corrientes Moglia impresiones
- Grahama, J , Jonesa, J , Jonesb, S , Downingc, J , & Clevengerd, T (2004) Environmental factors influencing microcystin distribution and concentration in the Midwestern United States *Water Research*, Pages 4395–4404
- H Kenneth Hudnell, Q D (2005) *A Synopsis of Research Needs Identified at the Interagency, International Symposium on Cyanobacterial Harmful Algal Blooms (ISOC-HAB)* United States, Environmental Protection Agency Springer New York
- Health, O W (1999) Toxic Cyanobacteria in Water A guide to their public health consequences, monitoring and management En I R Falconer, *Cyanobacteria-Toxins in Drinking Water* (págs 15-40) London WHO by E&FN Spon
- Heinriksen, R (1997) A biotest using primary rat hepatocytes *International congress on toxic cyanobacteria* (pags 20-24) Denmark Phycologia
- Henning, M , & Kohl, G (1981) Toxic blue-green algae water blooms found in some lakes in the German Democratic Republic *Hydrobiology*, 553-561
- Hirschberg, J , & Chamovitz, D (1994) Carotenoids in cyanobacteria, the molecular biology of cyanobacteria *Dordrecht Kluwer Academic Publishers*, 559-579
- Huisman, J , Matthijs, J , & Visser, P (2005) *Harmful Cyanobacteria* Dordrecht Springer Acuatic ecology series
- Jones, J (1992) *Lake algae can be dangerous* Panamá The Panama Canal Spillway

- Kaebernick, M , Neilan, B , Borner, T , & Dittmann, E (2000) Light and the transcriptional response of the microcystin biosynthesis gene cluster *Applied and Environmental Microbiology*, 3387-3392
- Komárek, J , & Komárkova, J (2002) Review of the European Microcystis morphospecies (Cyanoprokaryotes) from nature *Czech Phycology*, 1-24
- Leewangh, P , Kappers, F , & Koerselmann, W (1983) Toxicity of cyanobacteria in Dutch lakes and reservoirs *Aquatic Toxicology*, 63-72
- León, L D (2002) *Floraciones de cianobacterias en aguas continentales del Uruguay causas y consecuencias* Montevideo Perfil Ambiental del Uruguay
- Luengo, A (2010) *Cianobacterias tóxicas y mortandad de aves en las Marismas de Txingudi Informe de situación junio* Txingudi Gobierno Vasco Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca
- Minillo, A (2009) Ensayos toxicológicos con cianobacterias aplicadas a la calidad ambiental *Centro de Ciencias biológicas de la Salud* (pág 70) Brasil Universidad Federal de Sao Carlos
- MINSA (30 de Diciembre de 2003) Resolución N° 507 Panamá, Ciudad de Panamá, Panama
- Mullor, J (1945) *Algas tóxicas Su estudio Año 1-nº2* Rosario Revista del colegio de doctores en bioquímica y farmacia
- Nishizawa, T , Ueda, A , Asayama, M , Fujii, M , Harada, K , Ochi, I , & Shirai, M (2000) Polyketide synthase gene coupled to the peptide synthetase module involved in the biosynthesis of the cyclic heptapeptide microcystin *Biochemistry*, 779-789
- Odrizola, E , Ballabene, N , & Salamanca, A (1984) Intoxicación en ganado bovino por algas verdeazuladas *Revista Argentina de Microbiología*, 219-224
- Oh, H , June, S , Jang, H , & Yoon, B (2000) Microcystin production by *Microcystis aeruginosa* in a phosphorous-limited chemostat *Applied and Environmental Microbiology*, 176-179
- Oliver, R , & Ganf, G (2000) Freshwater Blooms En B Whitton, & M Potts, *The Ecology of Cyanobacteria, their diversity in time and space* (págs 149-194) Dordrecht, The Netherlands Kluwer Academic
- Olofsson, J (1980) The role of microlayers in controlling phytoplankton productivity En J Barica, & L Mur, *Hypertrophic ecosystems* (pags 83-93) La Haya W Junk Public

- Ostenfeld, C , & Nigaard, G (1925) On the phytoplankton of the Gatun lake Panama Canal *Botanical results of the Dana Expedition 1921-1922, N° 2*, 1-16
- Pérez, G R (2008) *Fundamentos de limnología neotropical* Colombia
- Pizzolon, L (1996) Importancia de las cianobacterias como factor de toxicidad en las aguas continentales Laboratorio de Ecología Acuática *Interciencia Nov-Dic Vol 21 Facultad de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Patagonia*, 6
- Pouria, S , Andrade, A , Barbosa, J , Cavalcanti, R , Barreto, V , Ward, C , Codd, G (1998) Fatal microcystin intoxication in hemodialysis unit in Cuaruaru, Brazil *Lancet*, 21-26
- Prescott, G (1936) Notes on the algae of Gatun lake, Panamá Canal *Transactions of the American Microscopical Society* , 501-509
- Prescott, G (1951) Ecology of Panamá Canal Algae *Transactions of the American Microscopical Society*, 1-24
- Prescott, G (1973) Algae of the Western Great Lakes Area *WM, C, Brow Company publishers*, 292-294
- Prescott, G (1978) How to know the freshwater algae With an illustrated key to the genera of desmids and freshwater diatoms *Wm, C, Brow Company publishers*, 975-978
- Quintero, S (6 de Enero de 2007) Algas ocasionan mal sabor del agua *El Siglo*, pags 2-4
- Ramirez, A (20 de noviembre de 2009) Bacteria es toxica en el centro del Lago *Prensa libre de Guatemala*, pág 2
- Repavich, W , Sonzogni, M , Standridge, J , Wedepohl, R , & Meisner, R (1990) Cyanobacteria (blue-green algae) in Wisconsin waters acute and chronic toxicity *Wat Res* , 225-231
- Reynolds, C (2006) *Ecology of phytoplankton* EStados Unidos Cambridge University Press
- Rigler, F (1956) A tracer study of the phosphorus cycle in lakewater *Ecology*, 550-562
- Ringuelet, R , Olivier, S , Guarrera, S , & Aramburu, R (1955) *Observaciones sobre antoplancton y mortandad de peces en la Laguna del Monte La Plata* 18 Zoology 159
- Rıza, A (1994) Toxic Cyanobacteria in Nederland *ISBN*, 1138

- Roldan, G (1992) *Fundamentos de Limnología Neotropical* Medellín Universidad de Antioquia
- Roldan, G (2008) *Fundamentos de Limnología Neotropical* Medellín Editorial Universidad de Antioquia
- Rouhiainen, L , Vakkilainen, T , Siemer, B , Buikema, W , Haselkorn, R , & Sivonen, K (2004) Genes coding for hepatotoxic heptapeptides (microcystins) in the cyanobacterium *Anabaena* strain *Applied Environmental Microbiology*, 686-692
- Schindler, D , Carpenter, R , Cole, J , Kitchell, F , & Pace, M (1977) Evolution of phosphorus limitation in lakes Natural mechanisms compensate for deficiencies of nitrogen and carbon in eutrophied lakes *Science*, 260-262
- Shapiro, J (1990) Current beliefs regarding dominance by blue-green The case for the importance of CO<sub>2</sub> and pH *Int Vereinigung theor Verh* , 38-54
- Silva, J , Luco, J , Gonzáles, D , & Baudino, O (1995) *Detección de compuestos biogénicos volátiles en un lago eutrófico de San Luis-Argentina* Argentina Acta toxicologica
- Sivonen, K , Kononen, K , Carmichael, W , Dahlem, A , Rinehard, K , Kiviranta, J , & Niemela, J (1989) Occurrence of the hepatotoxic cyanobacterium *Nodularia spumigena* in the Baltic Sea and structure of the toxin *Applied and Environmental Microbiology*, 1990-1995
- Sivonen, K , Niemela, S , Niemi, R , Lepisto, R , Luoma, T , & Räsänen, T (1990) Toxic cyanobacteria (blue-green) in Finnish fresh and coastal waters *Hidrobiologia*, 267-275
- Skulberg, O , Codd, G , & Carmichael, W (1984) Toxic blue-green algal blooms in Europe a growing problem *Ambio*, 244-247
- Spooner, J (6 de Octubre de 2015) *Censored Data Values Description and Effect of Censoring on Statistical Trend Analyses* Obtenido de NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY COLLEGE OF AGRICULTURE & LIFE SCIENCES <http://www.bae.ncsu.edu/programs/extension/wqg/issues/48.html>
- Tanabe, Y , Kaya, K , & Watanabe, M (2003) Evidence for recombination in the microcystin synthetase (mcy) genes of toxic cyanobacteria *Microcystis* spp *Journal of Molecular Evolution*, 633-641
- Teixeira, M , Costa, M , Carvalho, V , Pereira, M , & Hage, E (1993) Gastroenteritis epidemic in the area of the Itaparica dam, Bahia Brazil *Bulletin of the Pan American Health Organization*, 244-253

- Tillett, D , Dittmann, E , Erhard, M , Dohren, H V , Borner, T , & Neilan, B (2000) Structural organization of microcystin biosynthesis in *Microcystis aeruginosa* PCC7806 An integrated peptide-polyketide synthetase system *Chem Biology*, 753-764
- Tisdale, E (1931) Epidemic of intestinal disorders in Charleston, W Va , occurring simultaneously with unprecedented water supply conditions *American Journal of Public Health*, 198-200
- Turner, P , Gammie, A , Hollinrake, K , & Cood, G (1990) Pneumonia associated with cyanobacteria *British Medical Journal*, 1440-1441
- UNESCO (2009) *Cianobacterias planctónicas del Uruguay Manual para la identificación y medidas de gestión* Uruguay Documento técnico N°16 Programa hidrológico internacional
- Utkilen, H , & Gjølme, N (1995) Iron-stimulated toxin production in *Microcystis aeruginosa* *Apply Environmental Microbiology*, 797-800
- Varkonyi, Z , Masamoto, K , Debreczeny, M , Zsiros, O , Ughy, B , Gombos, Z , Szalontai, H (2002) Low temperature induced accumulation of xanthophylls and its structural consequences in the photosynthetic membranes of the cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii* *National Academy Society*, 2410-2415
- Vela, L (2007) *Las microcistinas* España Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza
- Vezie, C , Rapala, J , Vaitomaa, J , Seitsonen, J , & Sivonen, K (2002) Effect of nitrogen and phosphorus on growth of toxic and nontoxic *Microcystis* strains and on intracellular microcystins concentrations *Microbial Ecology*, 443-454
- Vincent, W (2000) Cyanobacterial dominance in the Polar Regions En B Whitton, & M Potts, *The ecology of cyanobacteria Their diversity in time and space* (págs 321-340) Dordrecht Kluwer Academic Publishers
- Walker, H (2015) *Harmful Algae Blooms in Drinking Water Removal of Cyanobacterial cells and toxins* New York CRC Press Taylor and Francis Group
- Walsby, A , Reynolds, C , Oliver, R , & Kromkamp, J (1989) The role of gas vacuoles and carbohydrate content in the buoyancy and vertical distribution of *Anabaena minutissima* in lake Rotongaio *Hidrobiologia*, 1-25

- Westhuizen, A V , & Eloff, J (1983) Effect of culture medium on the growth and toxicity of the blue-green algae *Microcystis aeruginosa* *Pflanzenphysiol*, 157-163
- Wicks, R , & Thiel, P (1990) Environmental factors affecting the production of peptide toxins in floating scums of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* in a hypertrophic African reservoir *Environmental Science & Technology*, 1413-1418
- Young, J, Geisen, M , & Probert, I (2005) A review of selected aspects of coccolithophore biology with implications for paleobiodiversity estimation *Micropaleontology* , 267-288
- Yu, S , Tang, Z , & Wu, Y (1989) *Drinking water and primary liver cancer in primary liver cancer* Beijing, China China Academic Publishers
- Zaiss, U (1976) *Physiologische* Germany PhD thesis, Christian-Albrechts University

## ANEXOS

## I. Supuestos del modelo de regresión múltiple para el modelo general

## Distribución normal de los residuos

Al aplicar el estadístico Kolmogorov-Smirnov, se observa que  $p = 0,023$ ; por tanto se rechaza la hipótesis nula de que los residuos presentan una distribución normal. Esto puede ser representado, además, en los gráficos P-P plot e histograma (Figura 36).

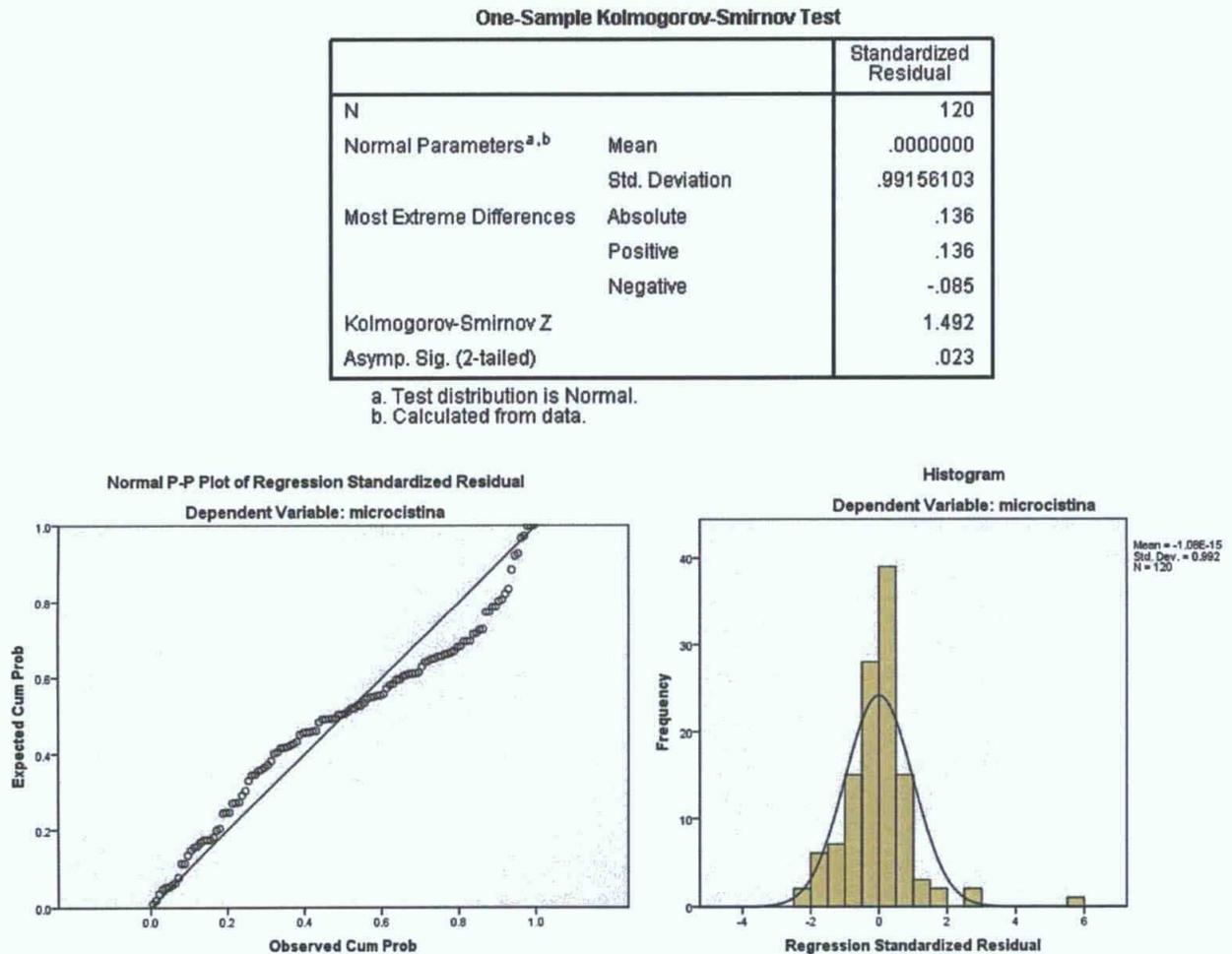


Figura 36. Gráfico P-P plot e histograma para la verificación de la normalidad de los residuos en el modelo general.

### Homocedasticidad de los residuos

En el gráfico de dispersión (Figura 37) podemos observar la variabilidad de los residuos que se concentran entre -2 y 2 a lo largo de todo el rango de valores pronosticados tipificados. Podríamos aceptar que existe homocedasticidad de los residuos. Se observan valores atípicos.

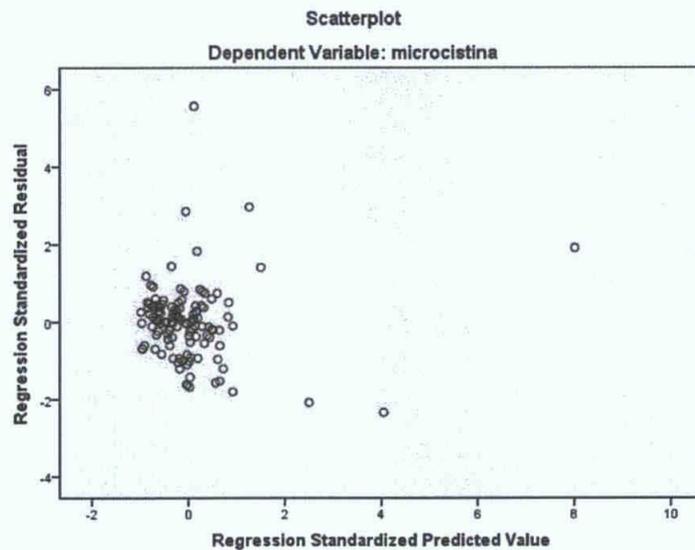


Figura 37. Diagrama de dispersión para evaluar la homocedasticidad de los residuos en el modelo general.

### Auto-correlación de los residuos

Para evaluar la auto-correlación de los residuos, se utiliza el estadístico Durbin-Watson y los gráficos residuales. En el modelo general, el estadístico DW es de: 1,2 (Cuadro 16), lo que sugiere que el modelo no es concluyente.

### Colinealidad de las variables

En la tabla de los coeficientes presentada se muestran dos estadísticos denominados tolerancia y FIV (factor de influencia de la varianza, el inverso de la tolerancia). En

nuestro modelo general la tolerancia en cada una de las variables son altas (0.981) y los FIV son bajos (1.020), por lo que se concluye que no existe problema de colinealidad.

### Linealidad

En los gráficos de regresión parcial (Figura 38) se puede observar una tendencia lineal entre el pH y la microcistina, a diferencia de la clorofila *a* en donde hay un agrupamiento de los registros.

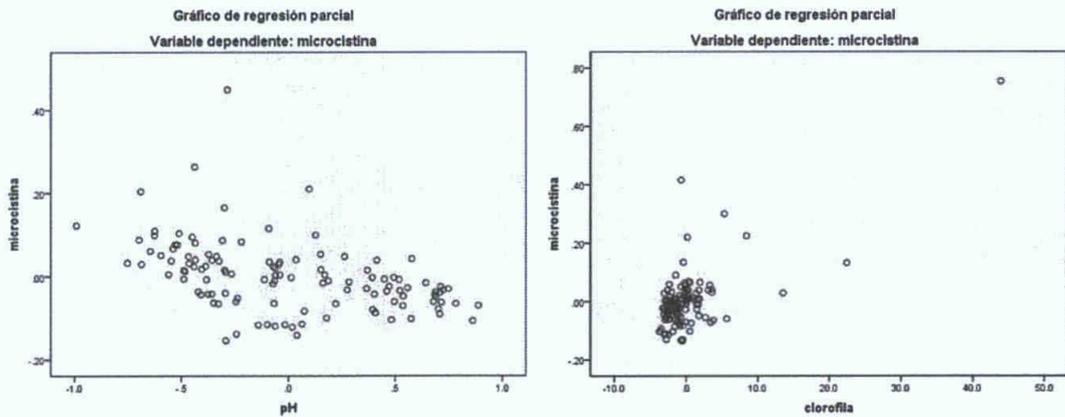


Figura 38. Gráfico de regresión parcial de la microcistina con las variable pH y clorofila *a* en el modelo general.

## II. Supuestos del modelo de regresión múltiple para el modelo de Gamboa

### Distribución normal de los residuos

Al aplicar el estadístico Kolmogorov-Smirnov, se observa que  $p = 0,097$ ; por tanto se acepta la hipótesis nula de que los residuos presentan una distribución normal. Esto puede ser representado, además, en los gráficos P-P plot e histograma (Figura 39).

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		Unstandardiz ed Residual
N		60
Parámetros normales <sup>a,b</sup>	Media	.0000000
	Desviación típica	.08699992
Diferencias más extremas	Absoluta	.159
	Positiva	.159
	Negativa	-.095
Z de Kolmogorov-Smirnov		1.229
Sig. asintót. (bilateral)		.097

a. La distribución de contraste es la Normal.  
b. Se han calculado a partir de los datos.

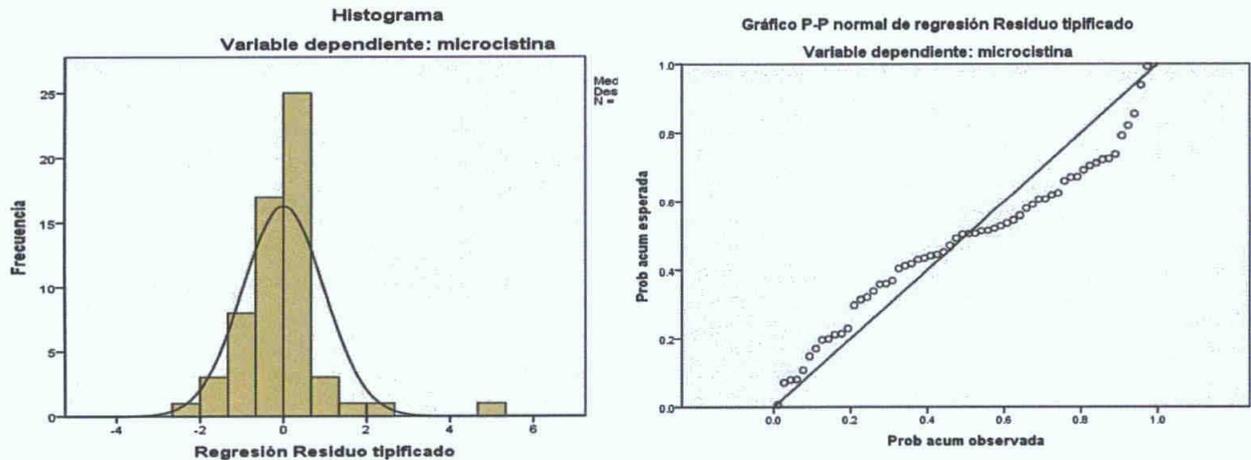


Figura 39. Gráfico P-P plot e histograma para la verificación de la normalidad de los residuos en el modelo de Gamboa.

### Homocedasticidad de los residuos

En el gráfico de dispersión (Figura 40) podemos observar la variabilidad de los residuos que se mantienen más o menos constantes a lo largo de todo el rango de valores pronosticados tipificados. Por tanto, aceptamos que existe homocedasticidad de los residuos. Se observan algunos valores atípicos.

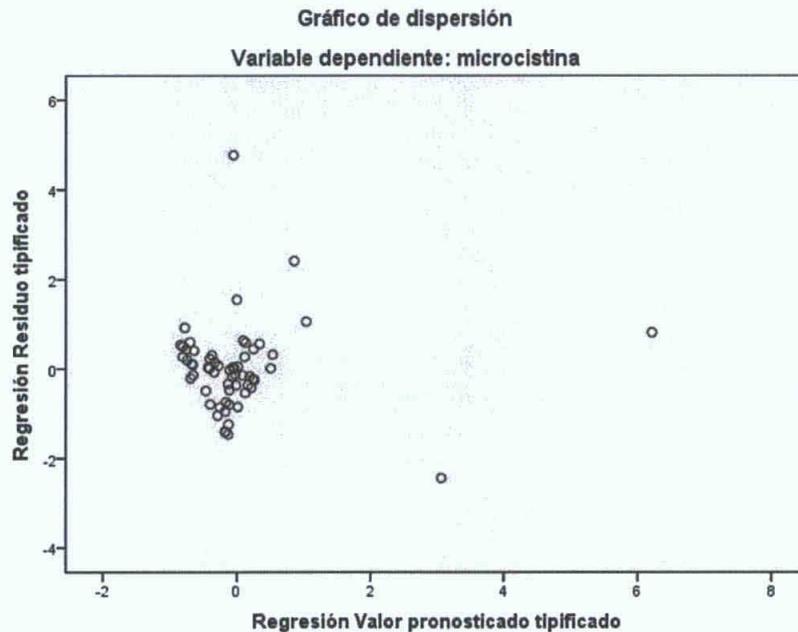


Figura 40. Diagrama de dispersión para evaluar la homocedasticidad de los residuos en el modelo de Gamboa

### Auto-correlación de los residuos

Para evaluar la auto-correlación de los residuos, se utiliza el estadístico Durbin-Watson y los gráficos residuales. En el modelo general, el estadístico DW es de: 1,22 (Cuadro 22), lo que sugiere que el modelo no es concluyente.

### Colinealidad de las variables

En la tabla de los coeficientes presentada se muestran dos estadísticos denominados tolerancia y FIV. En nuestro modelo para Gamboa la tolerancia en cada una de las variables son altas (0,993) y los FIV son bajos (1,007), por lo que se concluye que no existe problema de colinealidad.

### Linealidad

En los gráficos de regresión parcial (Figura 41) se puede observar una tendencia lineal entre el pH y la microcistina, a diferencia de la clorofila a donde hay un agrupamiento de los registros. También se observan algunos valores atípicos.

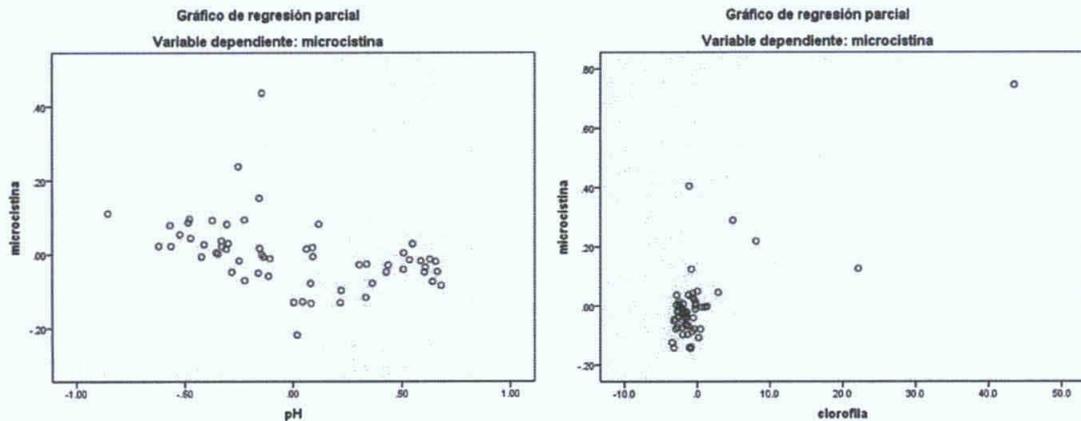


Figura 41. Gráfico de regresión parcial de la microcistina con las variable pH y clorofila a en el modelo de Gamboa.

### III. Supuestos del modelo de regresión múltiple para el modelo de Paraíso

#### Distribución normal de los residuos

Al aplicar el estadístico Kolmogorov-Smirnov, se observa que  $p = 0,353$ ; por tanto se acepta la hipótesis nula de que los residuos presentan una distribución normal. Esto puede ser representado además en los gráficos P-P plot e histograma (Figura 42).

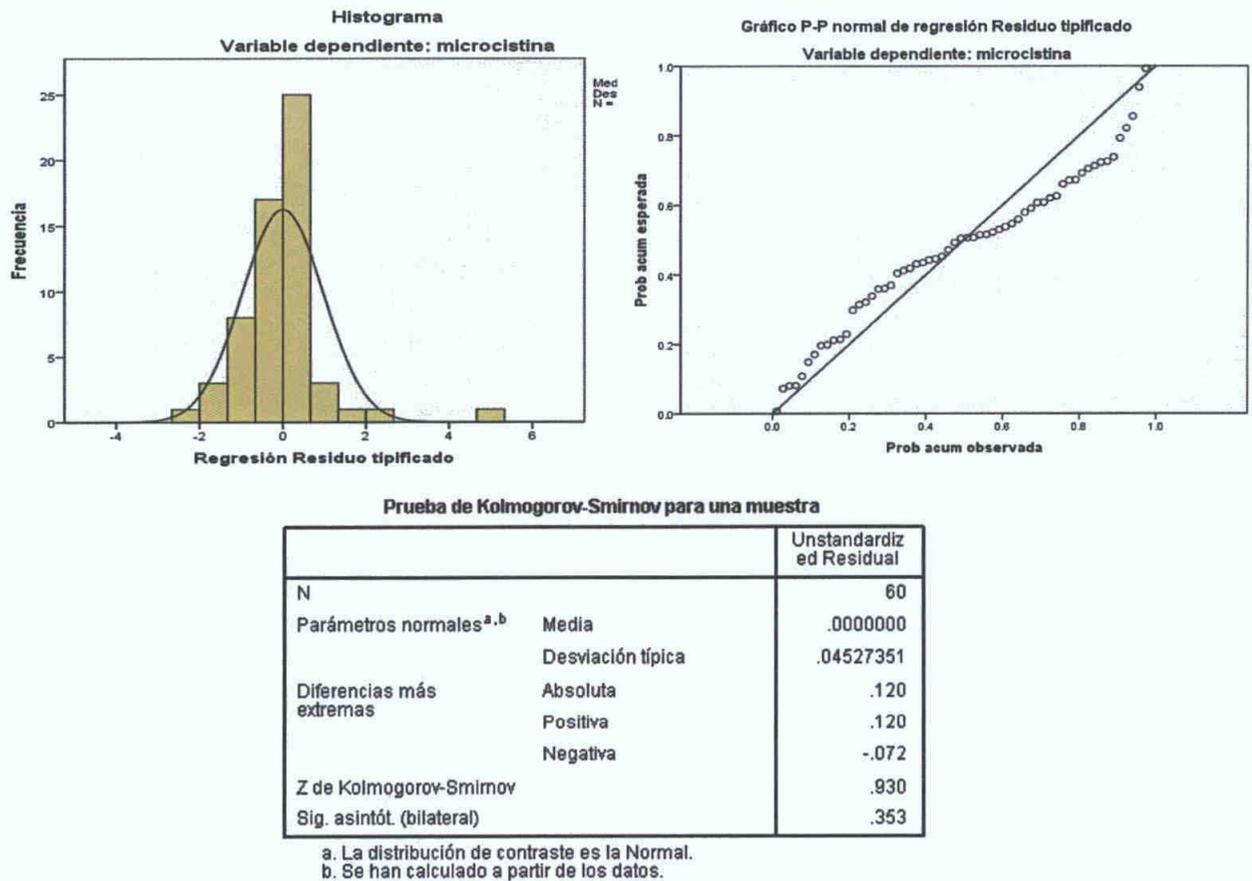


Figura 42. Gráfico P-P plot e histograma para la verificación de la normalidad de los residuos en el modelo de Paraíso.

### Homocedasticidad de los residuos

En el gráfico de dispersión (Figura 43) podemos observar la variabilidad de los residuos que se mantienen más o menos constantes a lo largo de todo el rango de valores pronosticados tipificados. Por tanto, aceptamos que existe homocedasticidad de los residuos.

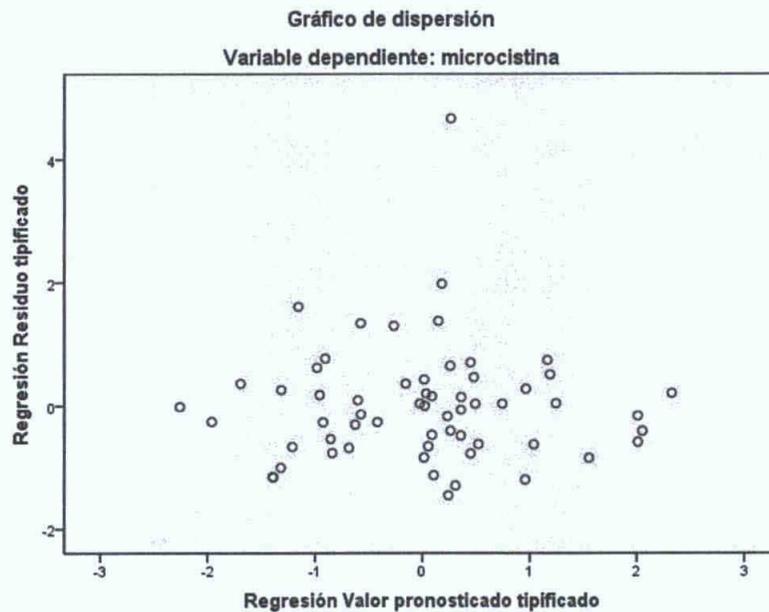


Figura 43. Diagrama de dispersión para evaluar la homocedasticidad de los residuos en el modelo de Paraíso.

### Auto-correlación de los residuos

Para evaluar la auto-correlación de los residuos, se utiliza el estadístico Durbin-Watson y los gráficos residuales. En el modelo de Paraíso, el estadístico DW es de: 1,339 (Cuadro 28), lo que sugiere que el modelo no es concluyente.

### Colinealidad de las variables

En la tabla de los coeficientes presentada se muestran dos estadísticos denominados tolerancia y FIV. En el modelo para Paraíso la tolerancia en cada una de las variables son

altas (0,859, 0,436, 0,328, 0,503 y 0,804) y los FIV son bajos (1,164, 2,294, 3,052, 1,988 y 1,243), por lo que se concluye que no existe problema de colinealidad.

### Linealidad

En los gráficos de regresión parcial (Figura 44) se puede observar una tendencia lineal entre el pH y la microcistina, la temperatura y la transparencia con la misma. Sin embargo, la relación lineal es más confusa entre las microcistinas y el fósforo total y la turbiedad.

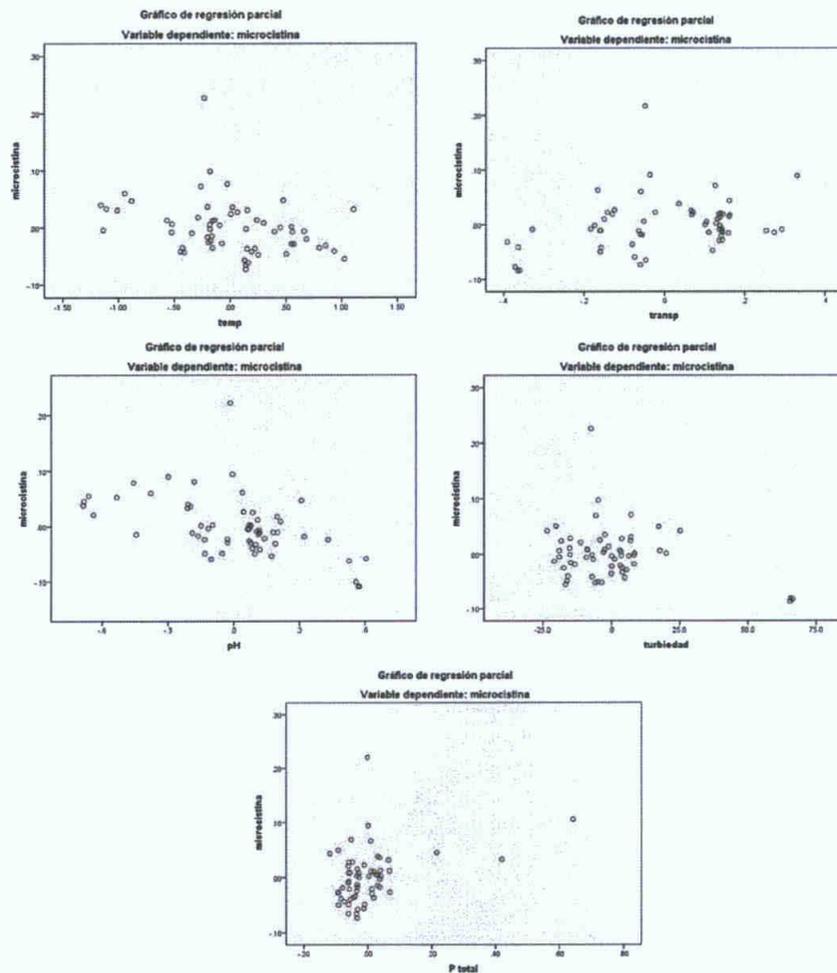


Figura 44. Gráfico de regresión parcial de la microcistina con las variable temperatura, transparencia, pH, turbiedad y fósforo total en el modelo de Paraíso.

#### IV. Supuestos del modelo de regresión múltiple para el modelo de la estación seca.

##### Distribución normal de los residuos

Al aplicar el estadístico Kolmogorov-Smirnov, se observa que  $p = 0,790$ ; por tanto se acepta la hipótesis nula de que los residuos presentan una distribución normal. Esto puede ser representado además en los gráficos P-P plot e histograma (Figura 45).

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		Unstandardiz ed Residual
N		48
Parámetros normales <sup>a,b</sup>	Media	.0000000
	Desviación típica	.02239630
Diferencias más extremas	Absoluta	.094
	Positiva	.094
	Negativa	-.069
Z de Kolmogorov-Smirnov		.651
Sig. asintót. (bilateral)		.790

a. La distribución de contraste es la Normal.  
b. Se han calculado a partir de los datos.

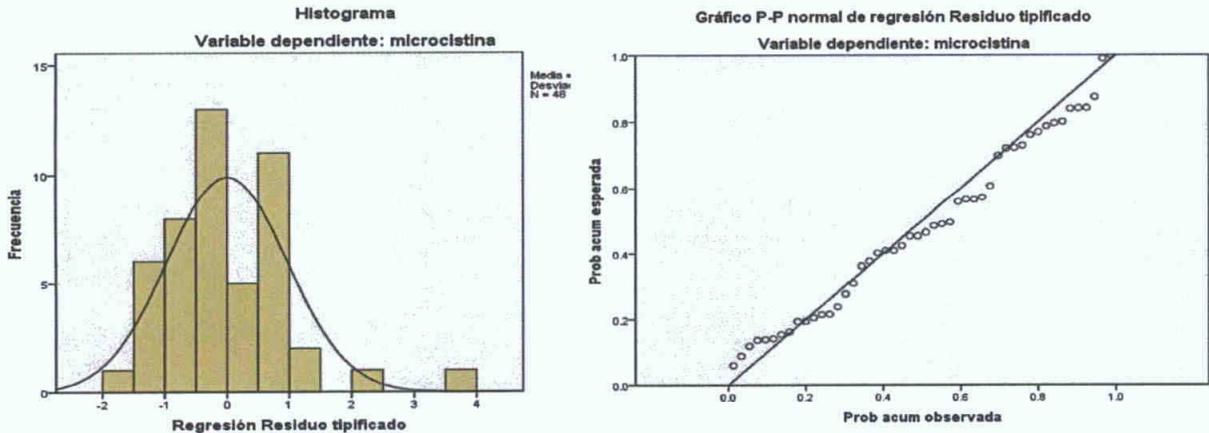


Figura 45. Gráfico P-P plot e histograma para la verificación de la normalidad de los residuos en el modelo para la estación seca.

### Homocedasticidad de los residuos

En el gráfico de dispersión (Figura 46) podemos observar la variabilidad de los residuos que se mantienen más o menos constantes (entre -2 y 2), a lo largo de todo el rango de valores pronosticados tipificados. Por tanto, aceptamos que existe homocedasticidad de los residuos.

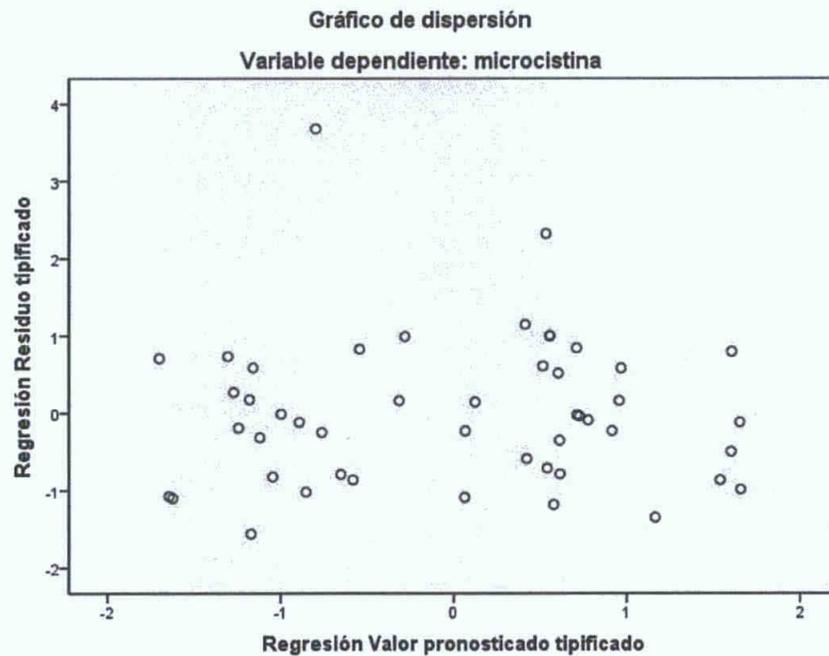


Figura 46. Diagrama de dispersión para evaluar la homocedasticidad de los residuos en el modelo para la estación seca.

### Auto-correlación de los residuos

Para evaluar la auto-correlación de los residuos, se utiliza el estadístico Durbin-Watson y los gráficos residuales. En el modelo de la estación seca, el estadístico DW es de: 1,532 (Cuadro 34), lo que sugiere que el modelo cumple con el supuesto de homocedasticidad de los residuos.

### Colinealidad de las variables

En la tabla de los coeficientes presentada se muestran dos estadísticos denominados tolerancia y FIV. En nuestro modelo para la estación seca la tolerancia en cada una de las variables son altas (0.762, 0,794, 0,762), y los FIV son bajos (1,313, 1,260 y 1,312), por lo que se concluye que no existe problema de colinealidad.

### Linealidad

En los gráficos de regresión parcial (Figura 47) se puede observar una tendencia lineal entre las variables pH, temperatura y transparencia con la microcistina.

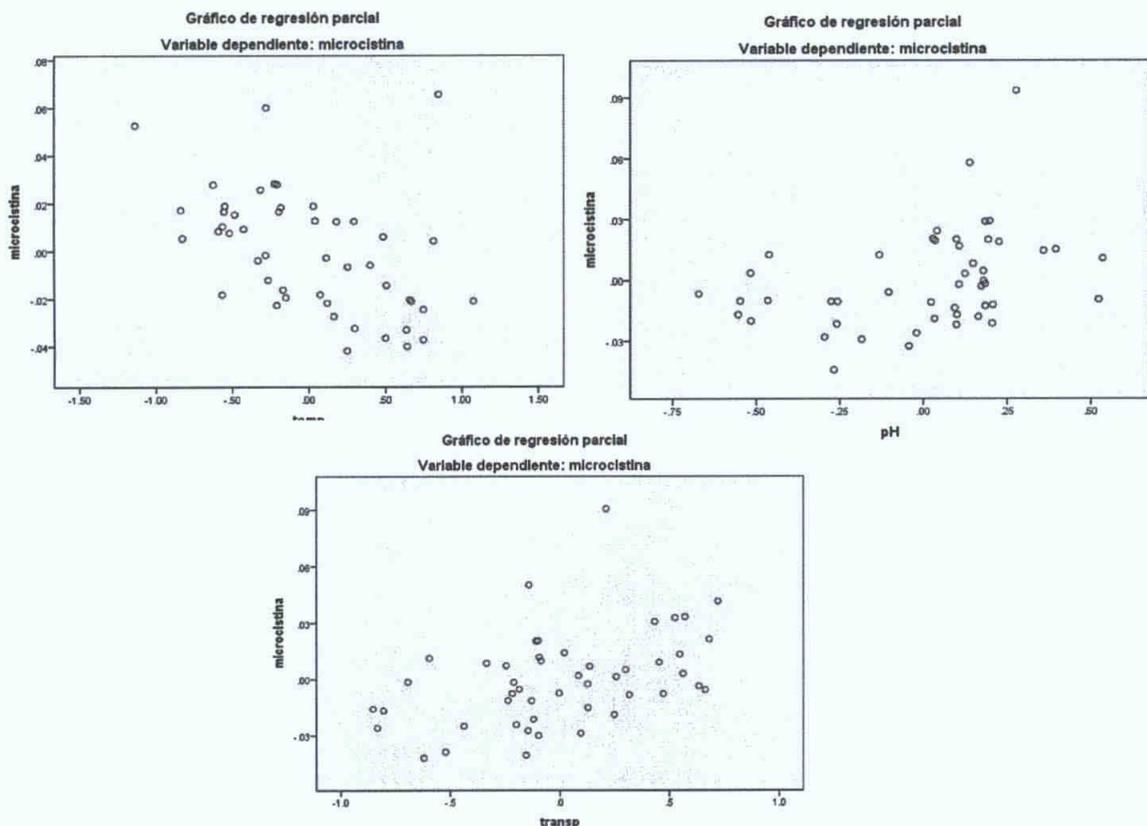


Figura 47. Gráfico de regresión parcial de la microcistina con las variable temperatura, pH y transparencia en el modelo para la estación seca.

## V. Supuestos del modelo de regresión múltiple para el modelo de la estación lluviosa

### Distribución normal de los residuos

Al aplicar el estadístico Kolmogorov-Smirnov, se observa que  $p = 0,230$ ; por tanto se acepta la hipótesis nula de que los residuos presentan una distribución normal. Esto puede ser representado además en los gráficos P-P plot e histograma (Figura 48).

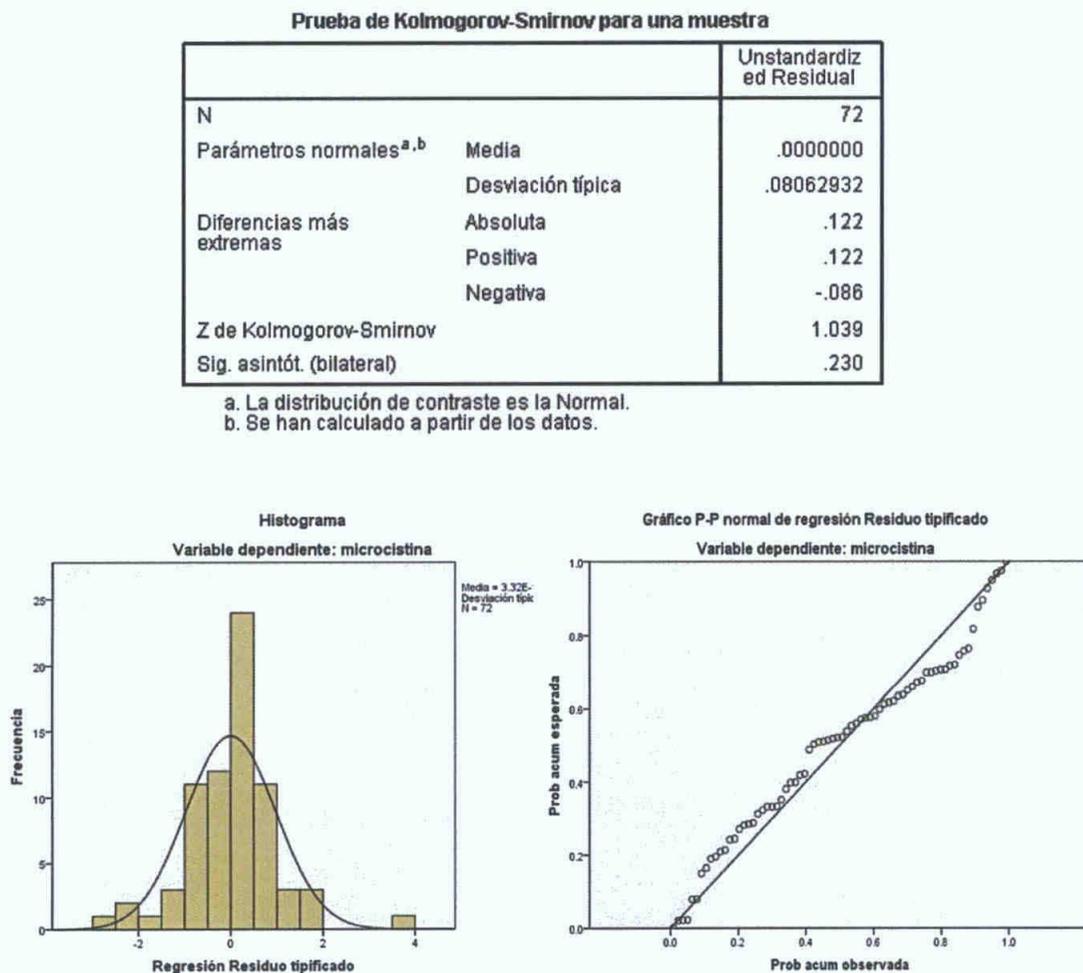


Figura 48. Gráfico P-P plot e histograma para la verificación de la normalidad de los residuos en el modelo para la estación lluviosa.

### Homocedasticidad de los residuos

En el gráfico de dispersión (Figura 49) podemos observar la variabilidad de los residuos que se mantienen concentrados alrededor del cero del rango de valores pronosticados tipificados. Sin embargo, podríamos aceptar que existe homocedasticidad de los residuos.

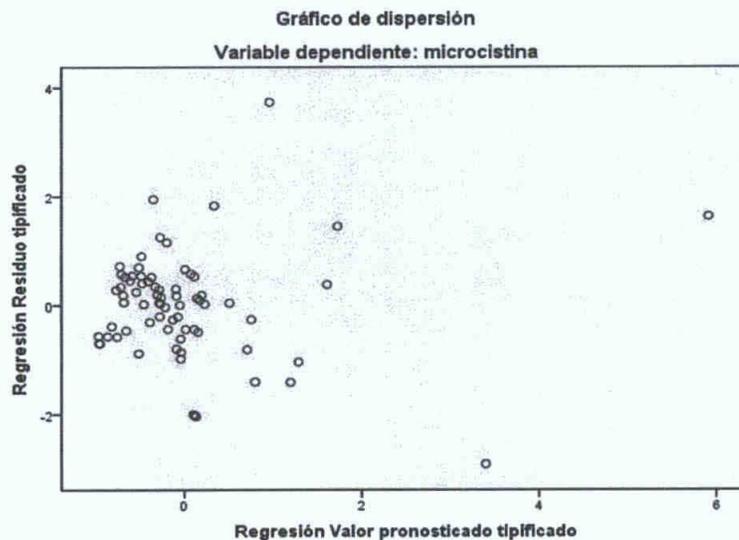


Figura 49. Diagrama de dispersión para evaluar la homocedasticidad de los residuos en el modelo para la estación lluviosa.

### Auto-correlación de los residuos

Para evaluar la auto-correlación de los residuos, se utiliza el estadístico Durbin-Watson y los gráficos residuales. En el modelo de la estación seca, el estadístico DW es de: 1,553 (Cuadro 50), lo que sugiere que el modelo cumple con el supuesto de homocedasticidad de los residuos.

### Colinealidad de las variables

En la tabla de los coeficientes presentada se muestran dos estadísticos denominados tolerancia y FIV. En nuestro modelo para la estación lluviosa la tolerancia en cada una de

las variables son altas (0,900, 0,789, 0,850), y los FIV son bajos (1,111, 1,267 y 1,177), por lo que se concluye que no existe problema de colinealidad.

### Linealidad

En los gráficos de regresión parcial (Figura 50) se puede observar una tendencia lineal entre las variables nitratos, temperatura y clorofila *a* con la microcistina.

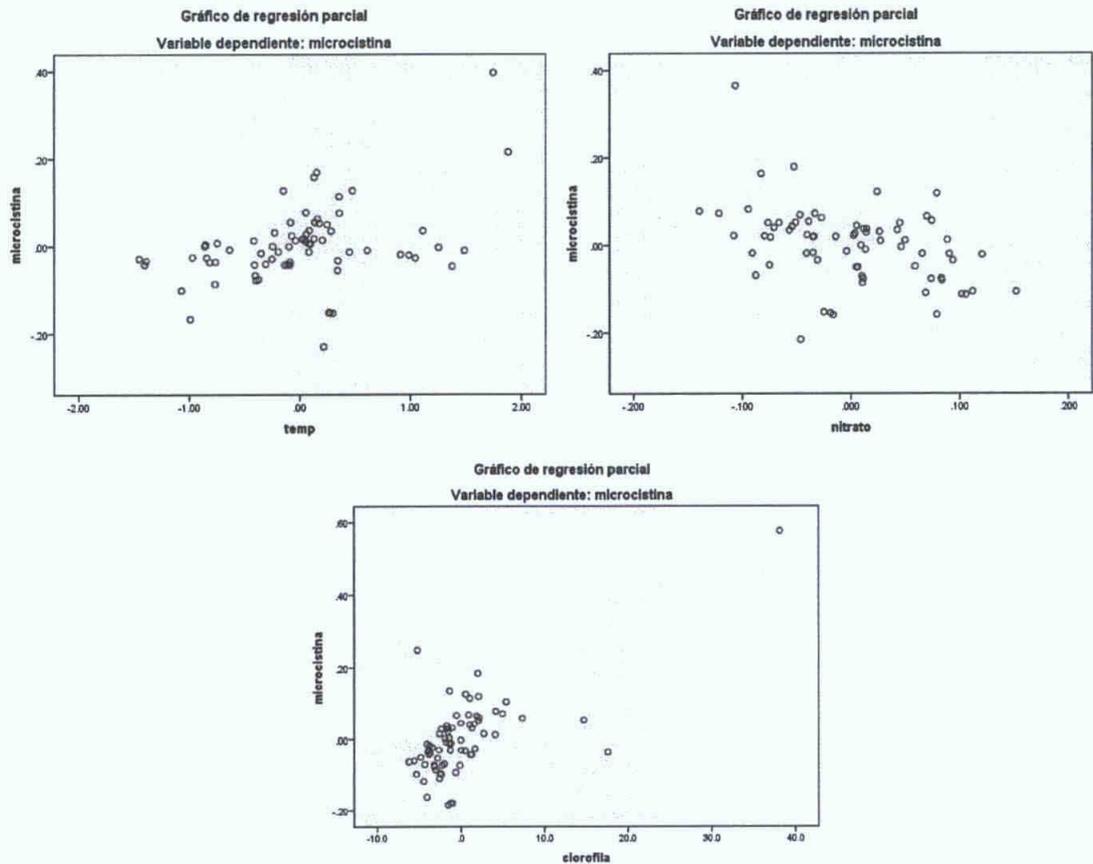


Figura 50. Gráfico de regresión parcial de la microcistina con las variable temperatura, nitratos y clorofila *a* en el modelo para la estación lluviosa.

## VI. Fotografías



Figura 51. 24 de agosto de 2009, Gamboa



Figura 52. Colonias de cianobacterias en muestra de agua



Figura 53. Análisis de microcistinas en muestras de agua



Figura 54. Manchas de color verde en la superficie del agua, Paraíso.



Figura 55. Toma de agua de Gamboa, poca profundidad.



Figura 56. Análisis de microcistinas en muestras de agua, suspensión de cianobacterias.

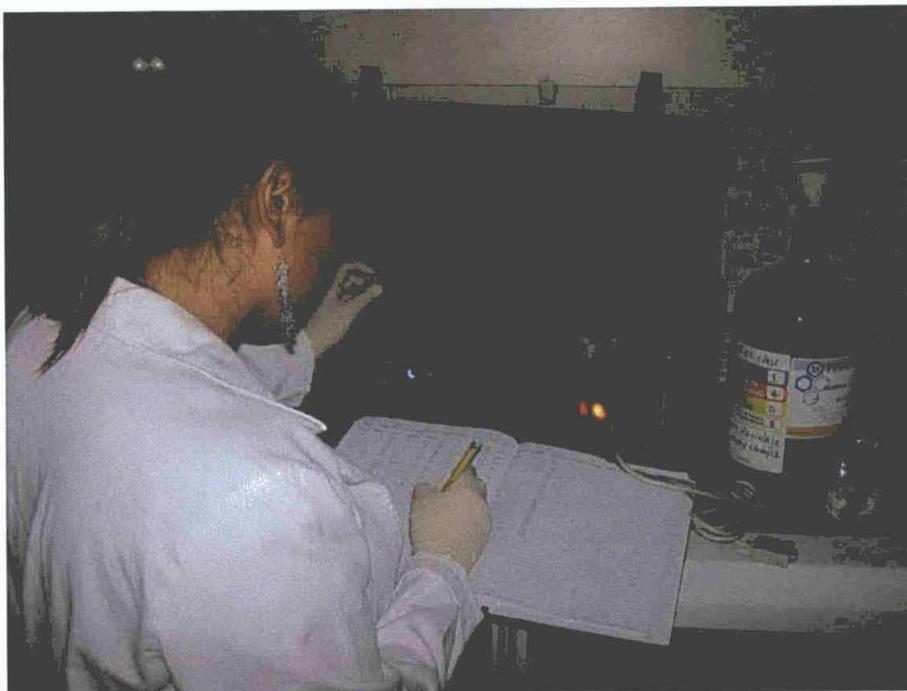


Figura 57. Análisis de clorofila a en muestras de agua.



Figura 58. Colonia de cianobacterias, género *Microcystis* sp.