



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
VICERRECTORADO ACADÉMICO
DIRECCIÓN GENERAL DE LOS ESTUDIOS DE POSTGRADO
ÁREA DE INGENIERÍA
POSTGRADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

**RESOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA DE TRATABILIDAD ACTUAL QUE
PRESENTA EL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN CONVENCIONAL DE LA
PLANTA DE TRATAMIENTO CAUJARITO PERTENECIENTE AL SISTEMA TUY 3**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
MAGISTER SCIENTIARUM EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

Presentado por
Díaz González, José Gregorio

Caracas, Enero 2018.

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
VICERRECTORADO ACADÉMICO
DIRECCIÓN GENERAL DE LOS ESTUDIOS DE POSTGRADO
ÁREA DE INGENIERÍA
POSTGRADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

**RESOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA DE TRATABILIDAD ACTUAL QUE
PRESENTA EL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN CONVENCIONAL DE LA
PLANTA DE TRATAMIENTO CAUJARITO PERTENECIENTE AL SISTEMA TUY 3**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
MAGISTER SCIENTIARUM EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

Presentado por
Díaz González, José Gregorio

Caracas, Enero 2018

Para ustedes...

Salma mi princesita hermosa

Araima, amor y apoyo incondicional

Madre y Padre gracias por hacerme quien soy.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por guiarme en este y los caminos que vienen...

Hija, Esposa, Madre, Padre con sus motivaciones, palabras precisas en los momentos perfectos y espacios de tiempo que formaron parte para el logro de este objetivo tan esperado.

Familia gracias por el apoyo que ayudo a la concreción de este trabajo.

Profesores y compañeros del postgrado, felicidades a los que culminaron esta etapa y ánimo a los que aún no terminan.

A mi tutor Nicola Ceci por su profesionalismo, tiempo, detalle en sus revisiones, en fin, por expandir la perspectiva de la investigación.

A la empresa Hidrocapital por brindarme todo el apoyo institucional, logístico y analítico para desarrollar esta investigación, en el Laboratorio Central de Aguas de La Mariposa, gracias Nadia, Gabriel, Esteherina, Aymara, Rudys, Yandira, Williams, Albania, Marla y a otras persona que de alguna manera hayan estado relacionadas con la realización de este trabajo, en la Planta de Tratamiento Caujarito gracias María Eugenia.

A las profesoras Debbie Méndez y Antonieta Melone como Jurado Examinador de esta propuesta y a la compañera Yoseni Martínez por sus buenos oficios en la tópicos relacionados a los trámites administrativos.

AUTOR: José Gregorio Díaz González

Tutor: Nicola Ceci

Fecha: Enero 2018

RESUMEN

RESOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA DE TRATABILIDAD ACTUAL QUE PRESENTA EL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN CONVENCIONAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO CAUJARITO PERTENECIENTE AL SISTEMA TUY 3

El presente trabajo fue realizado en el embalse Camatagua, río Guárico (principal afluente del embalse Camatagua), Planta de Tratamiento de Caujarito y la Planta Piloto con tratamiento alternativo de aire por flotación, en esta investigación se realizaron muestreos en el embalse Camatagua en el año 2015 en las épocas de verano e invierno pero además durante 20 años para evaluar el comportamiento histórico de este cuerpo de agua que ha estado sometido a importantes afectaciones antrópicas, para el río Guárico se realizaron muestreos en el mismo año 2015 en ambas épocas climáticas y por último en las plantas de tratamiento que reciben las aguas del mencionado reservorio. Como principal objetivo de esta investigación fue determinar la eficiencia de la Planta Piloto en la remoción de compuestos organolépticos, parámetros físico químicos, parámetros biológicos como la clorofila y el fitoplancton, esta Planta Piloto utiliza un proceso de aire por flotación y la Planta de Tratamiento Caujarito utiliza un proceso de potabilización convencional de Coagulación, Floculación y Sedimentación. Por otra parte determinamos el ahorro en términos de inversión en la dosificación de sustancias químicas de una planta respecto a la otra, realizando un análisis Costo-Beneficio, concluyendo que la Planta Piloto ofrece una mejor alternativa desde el punto de vista de la remoción de contaminantes pero además un ahorro significativo en términos de inversión.

Palabras clave: Embalse Camatagua, Río Guárico, Planta de Tratamiento Caujarito, Análisis Costo- Beneficio, Potabilización.

09/01/2018-08



UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO
Urb. Montalbán - La Vega - Apartado 29068
Teléfono: 407-42-68 y 407-42-69 Fax: 407-43-52
Estudios de Postgrado

ACTA DE EVALUACIÓN DE PRESENTACIÓN Y DEFENSA DE TRABAJO DE GRADO DE MAESTRÍA INGENIERÍA AMBIENTAL

Nosotros, Profesores **Nicola Ceci** (Tutor), **Debbie Méndez** y **Antonieta Melone**, designados por el Consejo General de los Estudios de Postgrado el día **22 de Noviembre** de **dos mil diecisiete** para conocer y evaluar en nuestra condición de jurado del trabajo de grado de maestría **“RESOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA DE TRATABILIDAD ACTUAL QUE PRESENTA EL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN CONVENCIONAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO CAUJARITO PERTENECIENTE AL SISTEMA TUY 3”**, presentado por el estudiante **José Gregorio Díaz**, C.I. N° **V- 15.331.974**, para optar al título de *Magíster en Ingeniería Ambiental*.

Declaramos que:

Hemos leído el ejemplar del Trabajo de Grado de Maestría que nos fue entregado con anterioridad por la Dirección General de los Estudios de Postgrado.

Después de haber estudiado dicho trabajo, presenciamos la exposición del mismo, el día **nueve de enero** de **dos mil dieciocho** en la sede de los Estudios de Postgrado de la Universidad Católica Andrés Bello, donde el estudiante **José Gregorio Díaz González**, expuso y defendió el contenido del trabajo de grado en referencia.

Hechas por nuestra parte, las preguntas y aclaratorias correspondientes y, una vez terminada la exposición y el ciclo de preguntas, hemos considerado formalizar el siguiente veredicto:

Aprobado

Hemos acordado calificar la presentación y defensa del Trabajo de Grado de Maestría con

Diecinueve 19 puntos.

En fe de lo cual, nosotros los miembros del jurado designado, firmamos la presente acta en Caracas, a los **nueve** días del mes de **enero** de **dos mil dieciocho**.

Nombre y firmas del jurado evaluador:


Nicola Ceci
C.I.: V-10.484.535


Debbie Méndez
C.I.: V- 2.767.268


Antonieta Melone
C.I. E- 1.014.741

Estudiante: 3ª. emisión de seis ejemplares de un mismo tenor.



Tabla de contenido

Dedicatoria

Agradecimientos

Reumen

INTRODUCCIÓN1-3

I.- EL PROBLEMA

I.I.- Planteamiento del problema4-14

I.II Formulación de las interrogantes de la investigación.....15

I.III Objetivos de la investigación.....15-16

I.IV Justificación de la investigación.....16

I.V. Alcance y limitaciones de la investigación.....17

II.- MARCO TEÓRICO

II.I Antecedentes

II.I.I Antecedentes nacionales.....18-25

II.I.II Antecedentes internacionales.....26-28

II.II Bases teóricas

II.II.I Eutrofización.....29-31

II.II.I.I Causas de la Eutrofización.....32-33

II.II.I.II Consecuencias de la Eutrofización.....34-36

II.II.I.III Relación Nitrógeno / Fósforo (N/P).....36-37

II.II.I.IV Fitoplancton–Clorofila.....37

II.II.I.V Nitrógeno.....38

II.II.I.VI.- Subproductos de desinfección nitrogenados en el
agua potable.....40

II.II.I.VII.- Fuentes precursoras y vías de formación.....42

II.II.I.VIII.-Fósforo.....43

II.II.II Cianobacterias.....44

II.II.II.I Floraciones de cianobacterias.....45

II.II.II.II Monitoreo de floraciones de cianobacterias.....45

II.II.II.III Origen de la toxicidad.....46

II.II.II.IV Literatura disponible.....	47
II.II.II.V Exposición humana a las cianotoxinas.....	49
II.II.II.VI Ocurrencia y propiedades de las cianotoxinas.....	49
II.II.II.VII Microcistinas.....	51
II.II.II.VIII Tratamiento de cianobacterias en el agua potable.....	52
II.II.II.IX.- Impactos de pre tratamientos en cianobacterias y cianotoxinas.....	53
II.II.II.X.- Filtración a través de arenas.....	55
II.II.II.XI.- Filtración por membrana.....	56
II.II.II.XII.- Carbón activado.....	57
II.II.II.XIII.-Impactos del tratamiento basado en la degradación de cianobacterias y cianotoxina.....	58
II.II.III Arrastre de aire y aireación.....	61
II.II.IV Análisis costo - beneficio.....	62
II.III.- Contexto referencial.....	65-79
II.IV.- Bases legales.....	80-84
II.V.- Sistemas de variables.....	85
 III.- MARCO METODOLÓGICO	
III.I Tipo de investigación.....	87
III.II Diseño de la investigación.....	87
III.III.- Población y muestra.....	88
III.IV.- Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	90
III.V.- Validez y confiabilidad de los instrumentos de medición.....	95
III.VI.- Consideraciones éticas.....	95
III.VII.- Aspectos administrativos.....	96

IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	97
IV.I.- Épocas climáticas influyentes en los cuerpos de agua.....	97
IV.II.- Profundidades de captación de muestras en las tomas selectivas del perfil vertical del Embalse Camatagua.....	99
IV.III.-Caracterización del embalse Camatagua en las dos épocas climáticas, invierno y verano del año 2015. <i>Objetivo específico N° 1</i>	101
IV.III.I.-Estudio de los parámetros físico químicos, incluyendo las dos variables de agrupación, 1.- Épocas climáticas que influyen en los cuerpos de agua y 2.- Profundidades de captación de muestras en las tomas selectivas del perfil vertical del Embalse Camatagua.....	105
IV.III.II- Estudio de parámetros físico químicos, de acuerdo a la variable de agrupación “Profundidades de captación de muestras en las tomas selectivas del perfil vertical del Embalse Camatagua”.....	119
IV.III.III- Estudio de los parámetros físico químicos utilizando la variable de agrupación Época climática (Verano, Invierno), por medio de comparación de medias (<i>T</i> de student) y ANOVA.....	122
IV.III.IV.- Estudio de los parámetros físico químicos utilizando el modelo de análisis factorial, Análisis de Componentes Principales (ACP).....	128
IV.III.V.-Caracterización del Río Guárico en las dos estaciones climáticas, invierno y verano en el año 2015. <i>Objetivo específico N° 2</i>	134
IV.III.VI.-Comportamiento histórico del embalse Camatagua, para evaluar la intervención antrópica al que fue sometido desde su construcción. <i>Objetivo específico N°3</i>	141
IV.III.VII.- Caracterización físico química del embalse Camatagua durante el período completo de estudio, 20 años (1995-2015), tomando las variables de agrupación “Estación climática” y “Profundidades de captación de muestras en las tomas selectivas del perfil vertical del embalse Camatagua”.....	145
IV.III.VIII.- Comparación de parámetros físico químicos en el embalse Camatagua durante el período completo de estudio, 20 años (1995-2015), antes de la intervención antrópica, 10 años (1995-2005) y después de la intervención antrópica, 9 años (2006-2015)”.....	159

IV.III.IX.- Aplicación de modelos de Regresión Lineal y Múltiple a los parámetros físico químicos dentro del período de estudio de 20 años (1995-2015), Antes de la intervención antrópica (1995-2005) “AIA”, Después de la intervención antrópica (2006-2015) “DIA”.....	169
IV.III.X.- Aplicación de análisis factorial basado en el modelo de Análisis de Componentes Principales (ACP) a los parámetros físico químicos dentro de los períodos de estudio de 20 años (1995-2015), Antes de la Intervención Antrópica (AIA) 10 años (1995-2005), Después de la Intervención Antrópica (DIA) 9 años (2006-2015).....	177
IV.IV.- Evaluación de la eficiencia del sistema alternativo de tratabilidad con respecto al sistema actual instalado. <i>Objetivo Específico N°4</i>	188
IV.IV.I Muestreos compuestos (parámetros in situ) en Planta Piloto y la Planta de Tratamiento.....	188
IV.IV.II Resultados de los análisis completos (de laboratorio).....	195
IV.IV.III Determinación de Clorofila a en el sistema alternativo de tratabilidad (Planta Piloto) y en el sistema de tratamiento convencional (Planta de tratamiento Caujarito).....	206
IV.IV.IV. Determinación del porcentaje de remoción del Fósforo y sus especies en el agua flotada (Nata de flotación) y el agua filtrada (efluente) del sistema alternativo de tratabilidad (Planta Piloto).....	209
IV.IV.V Determinación de Fitoplancton en el sistema alternativo de tratabilidad (Planta Piloto) y el sistema convencional (Planta de Tratamiento).....	213
IV.IV.VI Alternativas de reutilización de las microalgas para la producción de biocombustibles como herramienta de Ingeniería Ambiental.....	217
IV.IV.VI.I Biodiesel.....	218
IV.IV.VI.II Microalgas.....	219
IV.IV.VI.III Tipos de reactores para el cultivo de Microalgas Oleaginosas.....	222
IV.V.- Relación Costo-Beneficio del sistema de tratabilidad propuesto. <i>Objetivo específico N° 5</i>	224
IV.VI.- Propuestas de soluciones a la problemática de calidad de las aguas del embalse Camatagua. <i>Objetivo específico N° 6</i>	235

IV.IV.I.- Tecnología propuesta.....	236
IV.IV.I.II Ventajas de la Abeja Solar.....	238
IV.IV.I.III Economía Abeja Solar.....	241
IV.IV.I.IV Ingeniería de la Abeja Solar.....	242
V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	244
VI.-REFERENCIAS.....	249

Índice de Tablas

Tabla N° 1 Características del agua de grifo utilizada para los experimentos antes de inocular Microcistina Aeruginosa.....	27
Tabla N° 2 Eficiencias de remoción en el DAF de Turbiedad, Clorofila y Microcistina Aeruginosa extracelular del agua de grifo inoculada con Microcistina Aeruginosa (PCC 7820), sin adición de coagulante y la comparación con el comportamiento de la flotación natural. Nivel 1: concentración del influente 10-35 µg/l clorofila-a y Nivel 2: concentración del influente mayor a 50 µg/l. de clorofila-a.....	28
Tabla N °3 Características toxicológicas de las cianotoxinas.....	50
Tabla N° 4 Período de muestreo para los 4 sitios de captación en la investigación...89	89
Tabla N° 5 Frecuencia de muestreo para captar muestras compuestas.....	90
Tabla N ° 6 Parámetros físico químicos y biológicos con la técnica analítica para su determinación.....	92
Tabla N° 7 Recursos materiales, humanos y financieros para desarrollar la investigación.....	96
Tabla N° 8 Parámetros físico químicos con estadísticos descriptivos en el año 2015 para el embalse Camatagua... ..	102
Tabla N° 9 Comparación de medias y ANOVA, V=Verano, I= Invierno.....	123
Tabla N° 10 Prueba T de student.....	124
Tabla N° 11 Parámetros físico químicos con estadísticos descriptivos en el año 2015 para el río Guárico.....	135
Tabla N° 12 Parámetros físico químicos con estadísticos descriptivos desde el año 1995 hasta 2015 para el embalse Camatagua.....	142

Tabla N° 13 Parámetros físico químicos con estadísticos descriptivos desde el año 1995 hasta 2005 para el embalse Camatagua, Antes de la Intervención Antrópica *(mg/L).....	143
Tabla N° 14 Parámetros físico químicos con estadísticos descriptivos desde el año 2006 hasta 2015 para el embalse Camatagua, Después de la Intervención Antrópica.....	144
Tabla N° 15 Regresión lineal, ANOVA Y Parámetros de estimación para Índice de Langelier y pH.....	169
Tabla N° 16 Regresión lineal, ANOVA Y Parámetros de estimación para Color Aparente y Turbiedad.....	170
Tabla N° 17 Regresión lineal, ANOVA Y Parámetros de estimación para Índice de Estación climática “Lluvia”, Transparencia.....	171
Tabla N° 18 Regresión lineal, ANOVA Y Parámetros de estimación para Estación climática Lluvia y Cloruros.....	172
Tabla N° 19 Regresión lineal, ANOVA Y Parámetros de estimación para Estación climática Sequía y Cloruros.....	173
Tabla N° 20 Regresión lineal, ANOVA Y Parámetros de estimación para Estación climática Sequía y Conductividad.....	174
Tabla N° 21 Resultados de parámetros físico químicos in situ para el agua cruda (promedios del muestreo compuesto).....	188
Tabla N° 22 Resultados de parámetros físico químicos in situ para el agua tratada (en ambos sistemas de tratamiento).....	189
Tabla N° 23 Turbiedad (in situ) de la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento y magnitud removida por cada sistema de tratamiento con respecto al agua cruda....	190
Tabla N° 24 Comparación de la turbiedad removida por la Planta Piloto y la aplicación de coagulantes aplicada las plantas de tratamiento.....	190
Tabla N° 25 Color Aparente (in situ) de la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento y magnitud removida por cada sistema de tratamiento con respecto al agua cruda..	193
Tabla N° 26 Resultados de laboratorio (parámetros físico-químicos completos) para el agua cruda, planta piloto y planta de tratamiento Caujarito, de fecha 25/09/2015.....	195

Tabla N° 27 Resultados de laboratorio (parámetros físico-químicos completos) para el agua cruda, planta piloto y planta de tratamiento Caujarito, de fecha 27/10/2015.....	196
Tabla N° 28 Resultados de laboratorio (parámetros físico-químicos completos) para el agua cruda, planta piloto y planta de tratamiento Caujarito, de fecha 08/01/2015.....	197
Tabla N° 29 Resultados de laboratorio (parámetros físico-químicos completos) para el agua cruda, planta piloto y planta de tratamiento Caujarito, de fecha 12/02/2015.....	198
Tabla N° 30 Resultados de laboratorio (parámetros físico-químicos completos) para el agua cruda, planta piloto y planta de tratamiento Caujarito, de fecha 26/05/2015.....	199
Tabla N ° 31 Resultados de Clorofila para el agua cruda, Planta Piloto, Planta de Tratamiento y la magnitud removida por cada uno de los sistemas.....	207
Tabla N° 32 Resultados de fosforo y sus especies determinados en la nata de flotación y comparados con el agua cruda y el agua tratada.....	210
Tabla N° 33 Porcentajes de remoción de las especies de fosforo en la planta piloto.....	211
Tabla N° 34 Porcentajes de ganancia de las especies de fosforo en la planta piloto (agua cruda vs nata de flotación).....	211
Tabla N° 35 Grupo y especies de fitoplancton en el embalse Camatagua en AIA.....	213
Tabla N° 36 Grupo y especies de fitoplancton en el embalse Camatagua en DIA.....	214
Tabla N° 37 Resultados de fitoplancton en (org/ml) en la planta piloto y la planta de tratamiento con la magnitud removida por la planta piloto.....	215
Tabla N° 38 Resultados de fitoplancton en (USA/ml) en la planta piloto y la planta de tratamiento con la magnitud removida por la planta piloto.....	216
Tabla N° 39 Especies de Fitoplancton en ambas plantas.....	217
Tabla N° 40 Comparación de distintas fuentes de materia prima para la producción de biodiesel	219

Tabla N° 41 Contenido lipídico y productividad de diferentes especies de microalgas	220
Tabla N° 42 Costos de la materia prima para la potabilización del agua	224
Tabla N° 43 Costos de materia prima, específicamente sulfato de aluminio líquido y sulfato de aluminio sólido.....	225
Tabla N° 44 Costos mensuales de gas cloro	227
Tabla N° 45 Costos de los productos y/o servicios utilizados en la planta de tratamiento Caujarito	228
Tabla N° 46 Beneficios (Bs) en 9125 días por la cancelación del agua potable por parte de los suscriptores	229
Tabla N° 47 Comparación de la turbiedad removida por la Planta Piloto y la aplicación de coagulantes aplicada las plantas de tratamiento.....	230
Tabla N° 48 Comparación del costo real, y el costo hipotético proveniente del promedio de magnitud removida por la planta piloto.....	230
Tabla N° 49 Costo real del cloro, y costo hipotético proveniente de la demanda de cloro de la planta de tratamiento convencional.....	231
Tabla N° 50 Costo de productos y servicios asumiendo la tecnología de la planta piloto.....	231
Tabla N° 51 Tipos de tratamientos a reservorios de agua de acuerdo a sus probabilidades de éxito y factibilidad económica.....	236
Tabla N° 52 Embalse que presenta la comparación de la utilización y no utilización de la tecnología Abeja Solar durante el período de un año.....	241
Tabla N° 53 Valores referenciales de la tecnología Abeja solar.....	242

Índice de Gráficas

Gráfica N°1 Tomado de González 2015. Nivel de las aguas del embalse Camatagua.....	21
Gráfica N°2 Tomado de González 2015. Transparencia del agua en las cuatro localidades de estudio del embalse.....	21

Gráfica N°3 Tomado de González 2015. Variaciones de los sólidos totales en las localidades de estudio del embalse.....	22
Gráfica N°4 Tomado de González 2015. Variaciones de la Turbiedad de las aguas en las diferentes profundidades de las localidades de estudio del embalse.....	22
Gráfica N° 5 Tomado de González 2015.Isotermas en E1.....	23
Gráfica N° 6 Tomado de González 2015.Isopletas de Oxígeno Disuelto en E1.....	23
Gráfica N°7 Tomado de González 2015. Isopletas de Conductividad en E1.....	23
Gráfica N°8 Tomado de González 2015. Concentraciones de N total en los diferentes estratos de las localidades del embalse.....	24
Gráfica N°9 Tomado de González 2015. Concentraciones de P total en los diferentes estratos de las localidades del embalse.....	24
Gráfica N° 10 Tomado de González 2015. Proporciones relativas (%) del fitoplancton en E1 del embalse Camatagua.....	25
Gráfica N° 11 Tomado de González 2015. Concentraciones de clorofila-a en las diferentes localidades del embalse.....	25
Gráfica N° 12 Resultado del DAF, Microcistina Aeruginosa, células cultivadas (PCC 7820). En donde: R/Q Relación de la presión del agua reciclada, con adición de coagulante Ci y sin adición de coagulante Cf, Nivel 1 (Level 1) 10-35 µg/l Clorofila a, Nivel 2 (Level 2) mayor a 50 µg/l. Chl_a: Clorofila a, DOC: Carbono orgánico disuelto, TOC: Carbono orgánico total, MC-LR :Microcistina Aeruginosa.....	28
Gráfica N° 13 Tasa Interna de Retorno.....	64
Gráfica N° 14 Valores promedio de Temperatura (°C) y Humedad Relativa del aire (%) en el Embalse Camatagua.....	97
Gráfica N°15 Valores promedio, máximos y mínimos de las precipitaciones en la estación La Urbina-Quebrada Seca.....	98
Gráfica N°16 Valores promedio, máximos y mínimos de las precipitaciones en la estación Rancho Grande.....	99
Gráfica N° 17 Nivel de las aguas en el embalse Camatagua en el año 2015.....	103
Gráfica N° 18 Transparencia en el año 2015 en el embalse Camatagua.....	104
Gráfica N° 19 pH (medias) obtenido en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.....	105

Gráfica N° 20 Turbiedad (medias) obtenida en todas las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.....	106
Gráfica N° 21 Conductividad específica (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.....	107
Gráfica N° 22 Color Aparente (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.....	108
Gráfica N° 23 Hierro Total (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.....	109
Gráfica N° 24 Manganeso Total (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.....	110
Gráfica N° 25 Dureza Total (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.....	111
Gráfica N° 26 Alcalinidad Total (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.....	112
Gráfica N° 27 Aluminio (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.....	113
Gráfica N° 28 Sílice reactiva (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.....	114
Gráfica N° 29 Índice de Saturación Langelier (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.....	115
Gráfica N° 30 Fosforo total (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.....	116
Gráfica N° 31 Fosforo reactivo total (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.....	117
Gráfica N° 32 Nitrógeno amoniacal (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.....	118
Gráfica N° 33 pH y Alcalinidad total (medias) a diferentes profundidades en el embalse Camatagua, año 2015.....	119
Gráfica N° 34 Hierro total y Manganeso total (medias) a diferentes profundidades del embalse Camatagua, año 2015.....	120

Gràfica N° 35 Aniones mayoritarios (medias) en diferentes profundidades del embalse Camatagua, año 2015.....	121
Gràfica N° 36 Cationes mayoritarios (Na,K, Mg,Ca) a diferentes profundidades en el embalse Camatagua, año 2015.....	122
Gràfica N° 37 Medias marginales estimadas Índice de Saturación de Langelier.....	125
Gràfica N° 38 Medias marginales estimadas pH.....	126
Gràfica N° 39 Medias marginales estimadas Cloruros.....	127
Gràfica N° 40 Componentes en espacio rotado. Mes y año 2015, nutrientes.....	128
Gràfica N° 41 Componentes en espacio rotado.Nutrientes.....	129
Gràfica N° 42 Componentes en espacio rotado.Mes y año, Transparencia Disco Sechhi.....	130
Gràfica N° 43 Componente en espacio rotado.Iones y Conductividad específica...131	
Gràfica N° 44 Componente en espacio rotado.Mes y Año y Parámetros físico químico.....	132
Gràfica N° 45 Componente en espacio rotado.Componentes Organolépticos, según NSCAP.....	133
Gràfica N° 46 pH en el río Guárico año 2015.....	136
Gràfica N° 47 Color Verdadero y Color Aparente en el río Guárico año 2015.....	136
Gràfica N° 48 Turbiedad en el río Guárico año 2015.....	137
Gràfica N° 49 Hierro y Manganeseo Total en el río Guárico año 2015.....	138
Gràfica N° 50 Conductividad específica en el río Guárico año 2015.....	138
Gràfica N° 51 Fosforo Total, Fosforo Disuelto Total y Fosforo Reactivo Disuelto en el río Guárico año 2015.....	139
Gràfica N° 52 Nitratos y Nitritos en el río Guárico año 2015.....	140
Gràfica N° 53 pH (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015).....	145
Gràfica N° 54 Conductividad específica (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015).....	146
Gràfica N° 55 Turbiedad (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015).....	147

Gráfica N° 56 Índice de Saturación de Langelier (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015).....	148
Gráfica N° 57 Alcalinidad total (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015).....	149
Gráfica N° 58 Aluminio (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015).....	150
Gráfica N° 59 Calcio (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015).....	151
Gráfica N° 60 Bicarbonato (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015).....	152
Gráfica N° 61 Hierro total (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015).....	153
Gráfica N° 62 Manganeseo total (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015).....	154
Gráfica N° 63 Cloruros (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015).....	155
Gráfica N° 64 Fósforo total (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015).....	156
Gráfica N° 65 Fósforo reactivo disuelto (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015).....	156
Gráfica N° 66 Nitrógeno Amoniacal (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015).....	157
Gráfica N° 67 Nitrógeno Orgánico (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015).....	158
Gráfica N° 68 Transparencia durante los tres períodos de estudio en el embalse Camatagua.....	160
Gráfica N° 69 Hierro Total durante los tres períodos de estudio en el embalse Camatagua.....	161
Gráfica N° 70 Sulfatos durante los tres períodos de estudio en el embalse Camatagua.....	162
Gráfica N° 71 pH durante los tres períodos de estudio en el embalse Camatagua.....	163

Gráfica N° 72 Conductividad específica durante los tres períodos de estudio en el embalse Camatagua.....	164
Gráfica N° 73 Fósforo total durante los tres períodos de estudio en el embalse Camatagua.....	165
Gráfica N° 74 Fósforo reactivo disuelto durante los tres períodos de estudio en el embalse Camatagua.....	166
Gráfica N° 75 Nitrógeno Amoniacal durante los tres períodos de estudio en el embalse Camatagua.....	166
Gráfica N° 76 Nitrógeno Orgánico durante los tres períodos de estudio en el embalse Camatagua.....	167
Gráfica N° 77 Gráfica resumen de los parámetros físico químicos evaluados en los períodos Antes de la Intervención Antrópica y Después de la Intervención Antrópica. En el período de estudio correspondiente a 20 años se asume el valor cero del eje.....	168
Gráfica N° 78 Regresión lineal Índice de Langelier y pH.....	170
Gráfica N° 79 Regresión lineal Color Aparente y Turbiedad.....	171
Gráfica N° 80 Regresión lineal Estación climática Lluvia y Transparencia Disco Secchi.....	172
Gráfica N° 81 Regresión lineal Estación climática Lluvia y Cloruros.....	173
Gráfica N° 82 Regresión lineal Estación climática Sequía y Cloruros.....	174
Gráfica N° 83 ACP: Nutrientes, Mes y año. Durante 10 años.....	177
Gráfica N° 84 ACP: Nutrientes, Mes y año. Durante 9 años.....	178
Gráfica N° 85 ACP: Nutrientes, Mes y año. Durante 20 años.....	178
Gráfica N° 86 ACP: Componentes organolépticos, Cond. Esp., Mes y año. Durante 10 años.....	179
Gráfica N° 87 ACP: Componentes organolépticos, Cond. Esp., Mes y año. Durante 9 años.....	180
Gráfica N° 88 ACP: Componentes organolépticos, Cond. Esp., Mes y año. Durante 20 años.....	180
Gráfica N° 89 ACP: Especies CaCO_3 , ISL, pH, Mes y Año. 10 años.....	182
Gráfica N° 90 ACP: Especies CaCO_3 , ISL, pH, Mes y Año. 9 años.....	182

Gráfica N° 91 ACP: Especies CaCO_3 , ISL, pH, Mes y Año. 20 años.....	183
Gráfica N° 92 ACP: Aniones, Cond. Esp. Mes y Año. 10 años.....	184
Gráfica N° 93 ACP: Aniones, Cond. Esp. Mes y Año. 9 años.....	184
Gráfica N° 94 ACP: Aniones, Cond. Esp. Mes y Año. 20 años.....	185
Gráfica N° 95 ACP: Metales, Especies de fósforo, Profundidad de captación, Mes y año . 10 años.....	186
Gráfica N° 96 ACP: Metales, Especies de fósforo, Profundidad de captación, Mes y año. 9 años.....	186
Gráfica N° 97 ACP: Metales, Especies de fósforo, Profundidad de captación, Mes y año. 20 años.....	187
Gráfica N° 98 Turbiedad de la Planta Piloto y la Planta Convencional.....	192
Gráfica N° 99 Color Aparente de la Planta Piloto y la Planta Convencional.....	193
Gráfica N° 100 pH de la Planta Piloto y la Planta Convencional.....	194
Gráfica N° 101 Conductividad específica de la Planta Piloto y la Planta Convencional.....	194
Gráfica N° 102 Turbiedad para las 5 fechas de muestreo en la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento Convencional.....	201
Gráfica N° 103 Hierro Total para las 5 fechas de muestreo en la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento Convencional.....	201
Gráfica N° 104 Aluminio para las 5 fechas de muestreo en la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento Convencional.....	202
Gráfica N° 105 Fósforo Total para las 5 fechas de muestreo en la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento Convencional.....	203
Gráfica N° 106 Fósforo Reactivo Disuelto para las 5 fechas de muestreo en la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento Convencional.....	204
Gráfica N° 107 Nitratos para las 5 fechas de muestreo en la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento Convencional.....	205
Gráfica N° 108 Nitrógeno Amoniacal para las 5 fechas de muestreo en la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento Convencional.....	206

Gráfica N° 109 Clorofila para las 5 fechas de muestreo en la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento Convencional.....	207
Gráfica N ° 110 Fósforo Total para el efluente y la nata de flotación.....	212
Gráfica N ° 111 Fósforo Reactivo Disuelto para el efluente y la nata de flotación....	212
Gráfica N° 112 Comparación de los costos entre el sulfato de aluminio líquido y sólido.....	226
Gráfica N° 113 Costos del gas cloro desde enero 2014 hasta enero 2016.....	228

Índice de figuras

Fig.1 Habitantes/ km ² en Venezuela tomado de González 2015.....	4
Fig.2 Distribución del Sistema Tuy. Tomado de González 2015.....	11
Fig.3 Origen de la toxicidad por floración de cianobacterias y exposición humana...	14
Fig.4 Puntos de muestreo de González 2015.....	20
Fig. 5 Interacción simplificada entre fósforo y fitoplancton, tomado de CBE 1989.....	38
Fig. N° 6 Grupo/formula y estructuras de los más importantes subproductos de desinfección nitrogenados.....	42
Fig. N° 7 Estructuras de las principales especies de fósforo.....	43
Fig. N° 8 Literatura de cianobacterias y Distribución de literatura de cianotoxinas...	48
Fig. N° 9 Estructura de cianotoxinas	52
Fig. N° 10 Visión general del tratamiento del agua potable e impacto global de cianobacterias y toxinas.....	60
Fig. N° 11 Aspecto del embalse Camatagua.....	69
Fig. N° 12 Estructura de un embalse con su correspondiente torre toma.....	100
Fig. N° 13 Etapas del proceso de obtención de biodiesel a partir de microalgas....	218
Fig. N° 14 Esquema de la biosíntesis de lípidos en microalgas.....	221
Fig N° 15 Microfotografías donde se observan tres aumentos 1.- Agua + Metanol (10X), 2.- Capa celular (100X), 3.- Capa de aceite (40X).....	221
Fig. N° 16 Abeja solar para la circulación epilimnética.....	237
Fig. N° 17 Abeja solar para la circulación hipolimnética.....	238
Fig. N° 18 Esquema de efectos beneficios y perjudiciales de la Abeja Solar.....	240

Figura N° 19 Ilustra las distancias desde el centro de la manguera de la tecnología Abeja Solar.....	243
--	-----

Índice de imágenes

Imagen N° 1 Embalse Camatagua en 1997 y en 2012.....	70
Imágenes N° 2-6 muestran secuencialmente el proceso de eutrofización tomando como referencia el color verde de las fotografías satelitales.....	71
Imagen N° 7 Visión general de la planta piloto.....	74
Imagen N° 8 Medidor del volumen de entrada de agua.....	75
Imagen N° 9 Mezcla rápida.....	76
Imagen N° 10 Medición de profundidad del manto flotado.....	76
Imagen N° 11 Filtro de arena.....	78
Imagen N° 12 Bomba de saturación.....	79
Imagen N° 13 Manómetros de presión de saturación y vacío de succión, rotámetros caudal aire.....	79
Imagen N° 14 Nata de flotación previo al análisis de laboratorio, específicamente en la determinación de los parámetros físico químicos Fósforo Total, Fósforo Reactivo Disuelto y Fósforo Disuelto Total.....	209
Imagen N° 15 Nata de flotación acumulada por efecto del empuje por aire en el tanque de flotación.....	210
Imagen N° 16 a.- FBR Tubular, b.- FBR Tubular, c.- Tecnología vertical de alga, d.- FBR Tipo placas, e.- Lagunas abiertas (LA) o “raceways”.....	223
Imagen N° 17. Cultivo de <i>Nannochloropsis</i> sp. en lagunas abiertas (LA) para la producción de biodiesel en Israel. a) <i>Nannochloropsis</i> sp., b) cultivo en laboratorio, c) cultivo en LOATs, d) co-bio-floculación, e) cosecha de biomasa, f) <i>Nannochloropsis</i> sp. seca y g) biodiesel.....	223
Imagen N° 18 Relación de escala que permite visualizar las dimensiones del Abeja Solar.....	243

INTRODUCCIÓN

Dentro de los requerimientos poblacionales para alcanzar calidad de vida, el bien natural agua, representa un pilar fundamental. El suministro de agua potable debe ser garantizado a la totalidad de los habitantes de cualquier región.

El servicio de agua potable, además de ser producido para todos los usuarios, o por lo menos para un porcentaje mayoritario dentro de un espacio geográfico, debe brindarse con la óptima calidad para evitar, entre otros factores, enfermedades parasitarias, afecciones dérmicas y complicaciones celulares malignas. Así pues, la calidad del agua viene a formar parte del complejo paradigma del Desarrollo Humano.

Los países latinoamericanos en sus mediciones de índices de desarrollo humano, basados en el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), incluyen la variable agua, con algunos indicadores como: la prestación del servicio agua potable *per cápita* y calidad de las aguas, como indicadores intervinientes para estimar el desarrollo humano de los países latinoamericanos.

En este contexto nos trasladamos a la región capital de la República Bolivariana de Venezuela. En el Distrito Capital, el servicio de agua potable es direccionado por la empresa hidrológica Hidrocapital, la cual está constituida por seis acueductos que son listados a continuación: Acueducto Metropolitano, Acueducto Altos Mirandinos, Acueducto Barlovento, Acueducto Guarenas-Guatire, Acueducto Valles del Tuy y Acueducto Vargas. Adicionalmente, la compleja red de distribución que gestiona Hidrocapital es abastecida por tres sistemas: Sistema Tuy I, Sistema Tuy II, Sistema Tuy III mientras aún se construye el Sistema Tuy IV.

Dentro del Sistema Tuy III, está ubicada la principal fuente de agua que abastece a los habitantes de la ciudad de Caracas y algunas zonas de los acueductos antes mencionados, el embalse Camatagua, ubicado en el estado Aragua.

Las aguas del embalse Camatagua fluyen hasta la Planta de Tratamiento de Agua Potable Caujarito, esta unidad de tratamiento aporta un caudal aproximado de 8000 l/s (15000 l/s de capacidad máxima) y abastece un 40% de los habitantes de la ciudad de Caracas.

El embalse Camatagua ha sido objeto de actividades antrópicas en su cuenca y trasvases de fuentes de agua que han incorporado volúmenes de nutrientes que han promovido el proceso de eutrofización de este cuerpo de agua.

El río Guárico, principal afluente del embalse Camatagua, ha recibido aguas de otros afluentes intervenidos, razón por la cual se han generado los problemas de nutrientes en el embalse.

Las floraciones de fitoplancton es uno de los mayores inconvenientes a estudiar en el embalse, el cual afecta directamente a la Planta de Tratamiento de Agua Potable Caujarito que recibe y trata sus aguas. A este hecho le sumamos el aporte de nutrientes representado por los parámetros físico químicos nitrógeno y fósforo, parámetros de interés que afectan la calidad del agua.

La Planta de Tratamiento de Agua Potable Caujarito, presenta algunos problemas para acondicionar el agua con estas propiedades, por esta razón fue diseñada una planta piloto dentro de sus predios, para validar tecnologías que permitan verificar y cuantificar la remoción del fitoplancton presente en el agua cruda sin tratar.

La Planta de Tratamiento de Agua Potable Caujarito, es una planta de tratamiento convencional que cuenta con operaciones de Coagulación / Floculación / Sedimentación / Filtración y Desinfección, sin embargo; la planta piloto propone un sistema de flotación por aire previo que sirve para encapsular el fitoplancton y posteriormente removerlo.

Dentro de los objetivos de esta investigación se estableció el grado de eficiencia para la remoción del fitoplancton mediante flotación y compararlo con el sistema de tratamiento clásico, además se diseñó un análisis de costo para determinar el ahorro de la hidrológica en lo referente al uso de las sustancias químicas que deben aplicarse en este tipo de tratamientos, básicamente coagulantes químicos y la desinfección mediante cloro.

Adicionalmente resultó importante, caracterizar las aguas del embalse Camatagua en las épocas de invierno y verano para estudiar el comportamiento del mismo en estos períodos anuales.

Así pues; la investigación está constituida por el Capítulo I, donde fue presentado el planteamiento del problema, el objetivo general y objetivos específicos, alcance de la

investigación, justificación de la investigación, es decir, la contextualización del problema a investigar.

El Capítulo II, contiene los fundamentos teóricos de la investigación, los cuales sustentan la relación entre el proyecto y la teoría; las bases referenciales y bases legales. Complementado con los antecedentes nacionales e internacionales más resaltantes y la pertinencia con esta investigación.

En el Capítulo III, se indica por medio del marco metodológico el tipo y diseño de la investigación, las técnicas y herramientas utilizadas para el desarrollo del proyecto, determinando todos los procedimientos y pasos necesarios para el levantamiento de información, el proceso de selección de la población y muestra y los recursos materiales.

El capítulo IV Resultados y Discusión referido a los Resultados obtenidos y la Discusión de los mismos.

El capítulo V destinado a presentar las Conclusiones y Recomendaciones del estudio presentado.

Por último las referencias (bibliografías y fuentes electrónicas) utilizadas.

I.I- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Venezuela tiene alrededor de 28 millones de habitantes, distribuidos en 916 mil 445 km² de territorio. Según el Censo Nacional del año 2011, la densidad poblacional es de 29,6 habitantes/km², con más de 87% de la población habitando zonas urbanas y alrededor de 12% en zonas rurales (Tomado de INE 2013, en González, 2015).

El 80% de la población venezolana está concentrada en 20% del territorio nacional, de la cual más del 60% se encuentra ubicada en el arco Andino-Costero; específicamente 40% en las ciudades más importantes del país como son: Caracas, Maracaibo, Valencia, Barquisimeto, Maracay y Ciudad Guayana, las cuales cuentan con la menor disponibilidad de agua.

Dado que el mayor porcentaje de la población se encuentra en la zona con menor disponibilidad de agua, es evidente que pueden generarse problemas asociados con su distribución y prestación, como es el servicio de saneamiento, además de aquellos causados por la dislocación de grandes volúmenes de agua fuera de sus cuencas de origen. Todo ello hace fundamental la caracterización del ciclo del agua urbana, con la finalidad de garantizar los servicios de suministro de agua potable y saneamiento y el abordaje de diversos problemas para procurar propuestas que permitan su mitigación.

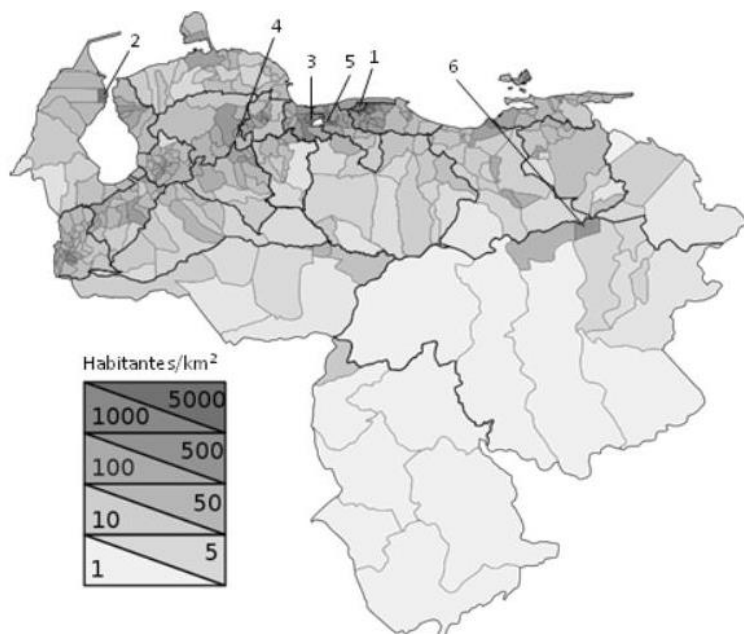


Fig.1 Habitantes/ km² en Venezuela tomado de González 2015.

El suministro de agua potable en Venezuela proviene en gran medida de fuentes de origen superficial. Según González Landazábal en 2001, la distribución espacial del escurrimiento superficial en Venezuela se caracteriza por los siguientes aspectos:

- El volumen medio anual escurrido en el territorio de Venezuela y generado por las precipitaciones que caen sobre él, sin incluir la Guayana Esequiba, se estima en 705 millones de m³.
- Las cuencas de los ríos ubicadas en los estados Amazonas y Bolívar, que contribuyen al Río Orinoco por la margen derecha, generan alrededor de 82% del volumen antes mencionado.
- La región del país situada al norte del Río Orinoco genera el 18% restante, del cual, 9% lo aportan los afluentes del Río Orinoco de los Llanos Centro Occidentales, el otro 9% corresponde al Lago de Maracaibo, la vertiente del Mar Caribe, la cuenca del Lago de Valencia y Golfo de Paria.

A partir de 1990 se inició en Venezuela la reestructuración de los organismos responsables de la prestación del servicio de agua potable y saneamiento, con el objetivo de pasar de un esquema de prestación centralizado, a un modelo que tomara en cuenta los principios de corresponsabilidad y de participación de cada habitante de la nación venezolana, garantizados en los artículos 60, 70 y 184 de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela, como punto de partida para incorporarlos legítimamente en el diseño de las políticas, planes y proyectos de agua y saneamiento relacionados a su comunidad y entorno, contribuyendo de este modo a la construcción del Poder Popular y al intercambio de saberes, entre otros aprendizajes. Para ello, se creó a HIDROVEN como casa matriz del sector agua potable y saneamiento, de naturaleza rectora y supervisora, con diez empresas hidrológicas filiales regionales (actualmente son nueve), con el objetivo de evitarla privatización de la prestación del servicio y descentralizarla administración a fin de lograr el funcionamiento de las empresas filiales con ingresos y recursos propios, provenientes de la cancelación de la tarifa, además del aporte del Gobierno nacional a través de subsidios económicos (HIDROCAPITAL, 2002).

El Gobierno central se mantiene como dueño de las acciones de las Empresas Hidrológicas Regionales, ya que su accionista único es HIDROVEN, que funge de

casa matriz de dichas empresas, y a su vez el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MINAMB) actualmente Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo y Aguas, es el dueño del 95% de las acciones de HIDROVEN, el restante 5 % no aparece reportado en la bibliografía.

En el caso de los estados Amazonas y Delta Amacuro, pertenecientes a la región de Guayana, el servicio es prestado también por un ente gubernamental, como lo es la Corporación Venezolana de Guayana (CVG).

La distribución de las Empresas Hidrológicas Regionales se describe a continuación (HIDROVEN, 2008, Tomado de González, 2015):

- HIDROCAPITAL: Acueducto Metropolitano de Caracas, Estados Vargas y Miranda.
- HIDROCENTRO: Estados Aragua, Carabobo y Cojedes.
- HIDROLAGO: Estado Zulia.
- HIDROFALCÓN: Estado Falcón.
- HIDROSUROESTE: Estado Táchira y Municipio Ezequiel Zamora del estado Barinas.
- HIDROANDES: Estados Trujillo y Barinas (excepto Municipio Ezequiel Zamora).
- HIDROPÁEZ: Estado Guárico.
- HIDROCARIBE: Estados Sucre, Nueva Esparta y Anzoátegui.
- HIDROLLANOS: Estado Apure.

Existe también una serie de Empresas Descentralizadas para la prestación del servicio de agua potable y saneamiento, con participación de gobernaciones y alcaldías, así como de la Corporación Venezolana de Guayana (CVG), la cual administra la Gerencia de Obras Sanitarias e Hidráulicas (GOSH) para los estados Amazonas y Delta Amacuro.

La Junta Directiva de estas empresas descentralizadas es elegida por la Asamblea de accionistas y es independiente del Poder Nacional. Son usualmente del ámbito estatal y se ocupan de la gestión y operación de los servicios de agua potable y saneamiento.

Actualmente existen las siguientes empresas descentralizadas en el país:

- HIDROLARA: Estado Lara.
- AGUAS DE MONAGAS: Estado Monagas.

- AGUAS DE MÉRIDA: Estado Mérida.
- HIDROS PORTUGUESA: Estado Portuguesa.
- AGUAS DE YARACUY: Estado Yaracuy.
- HIDROBOLÍVAR: Estado Bolívar.
- CVG-GOSH: Estados Amazonas y Delta Amacuro.
- AGUAS DE EJIDO: Municipio Ejido-Estado Mérida.

Las fuentes de agua para suministro en las grandes ciudades del país se derivan de embalses construidos para tal fin.

Según HIDROVEN (2008), el suministro de agua potable se ha venido incrementando para la población urbana en los últimos años, hasta alcanzar más de 91% de cobertura, mientras que la cobertura alcanza 79% para la población rural. Asimismo, la recolección de aguas servidas ha alcanzado 82, 41%, pero sólo 25,91% de las aguas servidas es tratado (hasta tratamiento secundario).

El abastecimiento de agua potable del Área Metropolitana de Caracas (AMC) fue configurándose desde el año 1950 como un sistema regional que implica la captación y trasvase de grandes volúmenes de agua desde las cuencas de los ríos Tuy y Guárico, además de incorporar pequeños aportes de la cuenca del Río Guaire. Después de distintas incorporaciones y ajustes, el abastecimiento de agua para la Región Metropolitana de Caracas (RMC) quedó configurado en cinco sistemas que produjeron y distribuyeron en 2011 casi 26 mil l/s al conjunto; se trata de los sistemas Metropolitano, Litoral, Fajardo, Losada-Ocumarito y Panamericano, que sirven a la ciudad de Caracas, estado Vargas, Guarenas-Guatire, Valles del Tuy y Altos Mirandinos respectivamente (Modificado de Martínez, 2012). Un sexto sistema, el de Barlovento, atiende a la región del mismo nombre y completa el conjunto de sistemas que maneja la Empresa Hidrológica HIDROCAPITAL. Para el AMC, la producción de agua potable del Sistema Metropolitano es de 17,7 metros cúbicos por segundo (m^3/s), ofreciendo una dotación media holgada per cápita de 470 litros por persona por día (lpd) (Martínez, 2012).

El hecho de que la mitad de la población habita en áreas no planificadas, en cotas de servicio altas, con limitados sistemas de almacenamiento, bombeo y distribución, implica que la dotación de 470 lpd no beneficia por igual a todos los habitantes

(IMUTC, 2012). No se conoce la existencia de estudios integrales recientes que determinen el suministro real de agua potable en los asentamientos informales del AMC, pero estudios parciales realizados en algunos barrios señalan racionamientos que duran varios días y una dotación inferior a lo recomendado por las normas sanitarias (Martínez, 2012). Otra debilidad de la red de distribución que se evidencia con creciente frecuencia, consiste en la rotura de tuberías y la dificultad para sustituirlas. Gran parte de la red de distribución tiene más de 50 años de construida, por lo cual su vida útil feneció, requiriéndose su completa sustitución. Las pérdidas por fugas en la distribución alcanzan 5,4 m³/s; las mediciones individuales sólo alcanzan 14% de los suscriptores (IMUTC, 2012), y la proporción de agua no facturada es de 60% desde hace varios años (HIDROCAPITAL, 2002).

En relación con la red de alcantarillado sanitario, desde el punto de vista técnico, el sistema debería recoger en forma separada las aguas residuales de las aguas de lluvia, descargándolas en colectores marginales a las quebradas que afluyen hacia el Río Guaire. Al llegar a la canalización del Río Guaire, sus colectores marginales izquierdo y derecho deberían captar la totalidad de las aguas residuales.

En momentos de exceso de caudal por el ingreso de aguas de lluvia a los colectores cloacales, unos aliviaderos colocados en el empalme entre los colectores marginales de las quebradas y los del Río Guaire deberían evacuar el exceso, muy diluido, hacia el Río Guaire. Aunque ya antes de 1930, en el Plan General de Alcantarillado del Ministerio de Obras Públicas estaba previsto que el Río Guaire no recibiese aguas residuales y que éstas se depuraran antes de su descarga, después de 90 años ello no se ha logrado (Martínez, 2012).

A finales de la década de 1950 se diseñaron nuevos colectores marginales que, en conjunto, son capaces para transportar un caudal de 60 m³/s, más de 3 veces el gasto medio actual del acueducto (Pérez Lecuna, 2005). A pesar de que estos colectores marginales fueron completados desde la década de 1970, no funcionan adecuadamente debido a la falta de mantenimiento del sistema, al crecimiento de la informalidad urbana y a debilidades en la prosecución de los planes de recolección y tratamiento, incluyendo el más reciente Proyecto de Saneamiento del Río Guaire. Respecto a los colectores en las áreas informales, éstos se han construido

mayoritariamente gracias a la participación de las comunidades sin seguirse normas técnicas, por lo que funcionan mal, ocasionando infiltraciones al suelo y descargas en el drenaje natural.

Como consecuencia de la actual forma de gestión de los sistemas de agua potable y saneamiento, persisten algunos problemas de carácter social, económico y ambiental. Respecto a problemas sociales, las estadísticas de morbilidad del año 2012 (Martínez, 2013) indican la mayor incidencia de enfermedades de transmisión hídrica en aquellas parroquias del Municipio Libertador donde existen carencias de los sistemas de agua y saneamiento, y donde se concentra la población de más bajos recursos económicos.

Respecto a problemas económicos, puede señalarse que el limitado acceso a los servicios de agua potable y saneamiento repercute negativamente en el ingreso familiar de la población de menores recursos económicos, quienes deben adquirir agua a un precio más alto, a través de operadores privados que le trasladan con camiones cisterna que no están debidamente supervisados, y que no garantizan la provisión de agua potable “segura” (Modificado de Jouravlev, 2004). Otra consecuencia económica de las carencias en las redes sanitarias con importantes repercusiones en las estadísticas vitales se refiere al incremento de la vulnerabilidad en las áreas informales.

Las deficientes redes de agua y cloacas existentes generalmente ocasionan filtraciones al terreno, debilitándolo para el soporte de estructuras, provocando deslizamientos en masa e incrementando la vulnerabilidad en caso de sismos. De acuerdo a los reportes de Protección Civil, en el Distrito Capital los deslizamientos en masa ocupan 72% de las incidencias, mientras que el 28% restante se distribuye entre derrumbes, inundaciones, asentamientos del terreno y otros (Grases, 2006).

Por último, desde el punto de vista de los impactos al ambiente, la construcción de redes cloacales no planificadas implica descargas no tratadas hacia las quebradas. Pero aunque se resolviera la captación de todos los efluentes hacia los colectores marginales del Río Guaire, tampoco se ha logrado el tratamiento a nivel general, con lo cual se mantiene la descarga de aguas crudas a este río, y por consiguiente al Río Tuy y al Mar Caribe, generando graves problemas de eutrofización y contaminación.

Por otra parte, la inexistencia de una política tarifaria que propenda al ahorro implica la no racionalización del consumo de agua potable, lo que conduce al uso excesivo de aguas frescas con irreversibles efectos ambientales.

Si en las próximas dos décadas no se producen medidas que tiendan a racionalizar el consumo ya reciclar aguas residuales, el consumo del AMC al año 2031 podría situarse en 21,3 m³/s, mientras que en la RMC podría alcanzar 34,2 m³/s. Ello requerirá utilizar los sistemas Tuy I al IV, sin posibilidades de holgura en el funcionamiento de los sistemas de abastecimiento (Martínez y col., 2013). Respecto a la producción de aguas residuales, si no se implementan medidas para racionalizar el consumo, separar las aguas de lluvia y reciclar las aguas residuales, la producción del AMC al año 2031 podría situarse en 34,5 m³/s, mientras que en la RMC podría alcanzar 57,5 m³/s. Por su parte, si no se resuelve el problema del tratamiento, la contaminación de las aguas de los cursos naturales se mantendrá y ocasionará efectos nocivos irreparables en los ecosistemas submarinos afectados por la descarga del Río Tuy, siendo su cuenca la que mayores efectos nocivos ocasiona en el Mar Caribe (Martínez y col., 2013).

En lo que respecta al suministro de agua para abastecimiento, la ciudad de Caracas depende de fuentes superficiales (embalses) ubicadas en regiones lejanas y en cotas mucho menores que las de la ciudad. El agua llega a la ciudad a través de un complejo de conexiones y tuberías que se denomina “Sistema Tuy”, el cual se compone de los siguientes subsistemas:

- Sistema Tuy I: Se abastece del embalse Lagartijo (80 x10⁶ m³). Se trasvasa al embalse La Mariposa. Suministra agua a las partes bajas de la ciudad (3 m³/s).
- Sistema Tuy II: Se abastece del embalse Taguaza (184 x10⁶ m³). Suministra agua a las zonas del Sureste y zonas de alturas intermedias de la ciudad (7,2 m³/s).
- Sistema Tuy III (el más importante): Se abastece del embalse Camatagua (1.550 x10⁶ m³). Suministra agua al resto de la ciudad y otras poblaciones de otros estados (9 m³/s).
- Sistema Tuy IV (en construcción): Se abastecerá del embalse que se construirá sobre el Río Cuira. Suministrará 12 m³/s e, incluso, podría llegar a suministrar 21 m³/s.

En la figura N° 2 se muestra el sistema de distribución de agua en los tres sistemas, Tuy I, Tuy II y Tuy III además del Tuy IV que se encuentra en proceso de construcción.

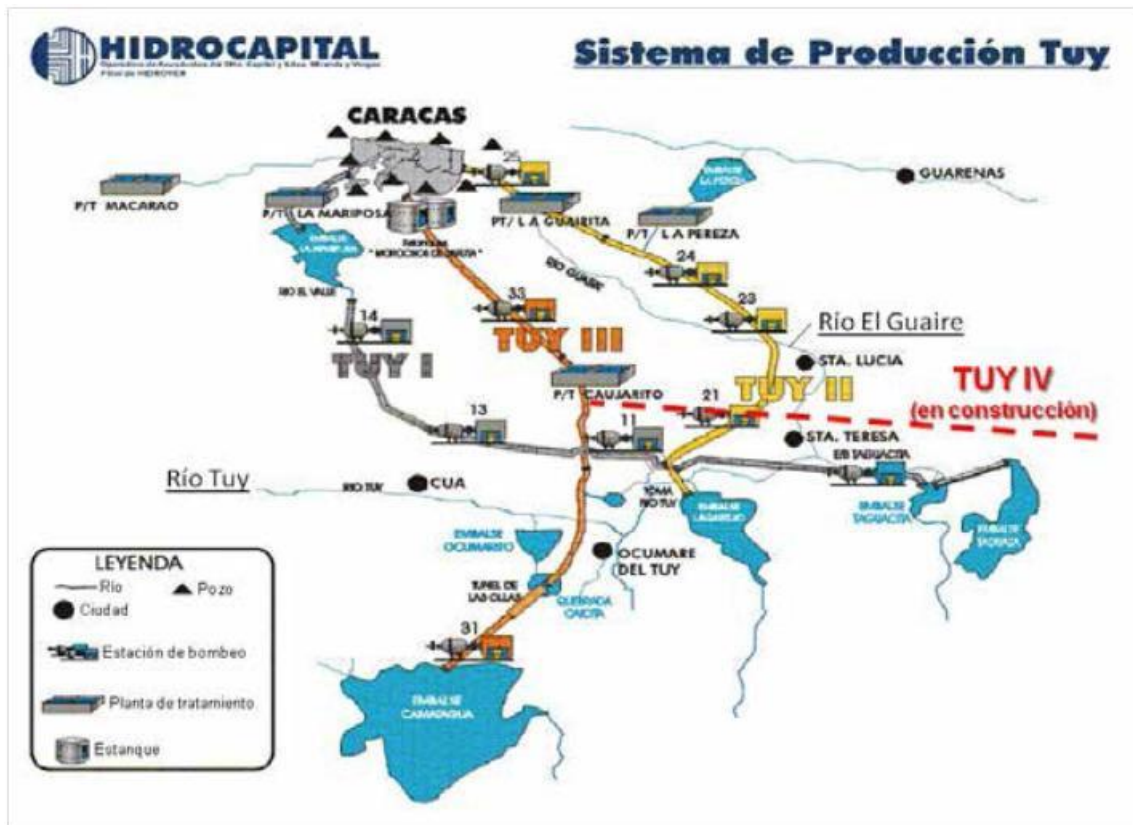


Fig. 2 Distribución del Sistema Tuy. Tomado de González 2015

Se sabe que las aguas residuales albergan microorganismos que causan enfermedades (patógenos), incluyendo virus, protozoarios y bacterias (Reynolds, 2002). Los organismos patógenos pueden originarse en los individuos infectados o en animales domésticos o salvajes, los cuales pueden o no presentar señales de enfermedad. La diarrea y la gastroenteritis se encuentran entre las tres principales causas de muerte en el mundo y en la región latinoamericana.

El agua no segura para beber y la contaminación a través de la disposición inadecuada de aguas negras, son responsables por la gran mayoría de estas muertes.

Desde el punto de vista de la salud pública, una inadecuada provisión de agua potable y de servicios de recolección de efluentes, aunados a condiciones de pobreza, involucran la aparición de enfermedades de transmisión hídrica, tales como amibiasis, diarreas (principalmente en niños), giardiasis, helmintiasis y hepatitis aguda Tipo A (Martínez, 2013).

De acuerdo a Martínez (2013), en el Distrito Capital se presentaron más de 30 mil casos de enfermedades de origen hídrico durante el año 2012, lo que representó un índice de 15,5 casos por cada mil habitantes. De este índice, 42,64% de los casos se presentaron en los estratos más pobres de la población.

Pero al discriminarse por parroquias de acuerdo a la mayor incidencia de casos, puede observarse que:

- 1) En las parroquias de la ciudad relativamente más sanas, donde se registraron 12 casos o menos de enfermedades de transmisión hídrica por cada mil habitantes, predominan redes formales de acueducto y cloacas, y el porcentaje promedio de población pobre es relativamente más bajo (36,48%).
- 2) En las parroquias donde el número de casos se ubica entre más de 12 y hasta 30 por cada mil habitantes, la informalidad urbana está presente en forma significativa, las redes en algunos de sus sectores son bastante precarias y el porcentaje promedio de población pobre es de 43,11%.
- 3) Por último, donde la concentración de casos supera los 30 por cada mil habitantes, las condiciones de hacinamiento de viviendas, de informalidad y de deficiencias de los servicios de agua y saneamiento son relevantes y el porcentaje promedio de población pobre es alto (48,95%).

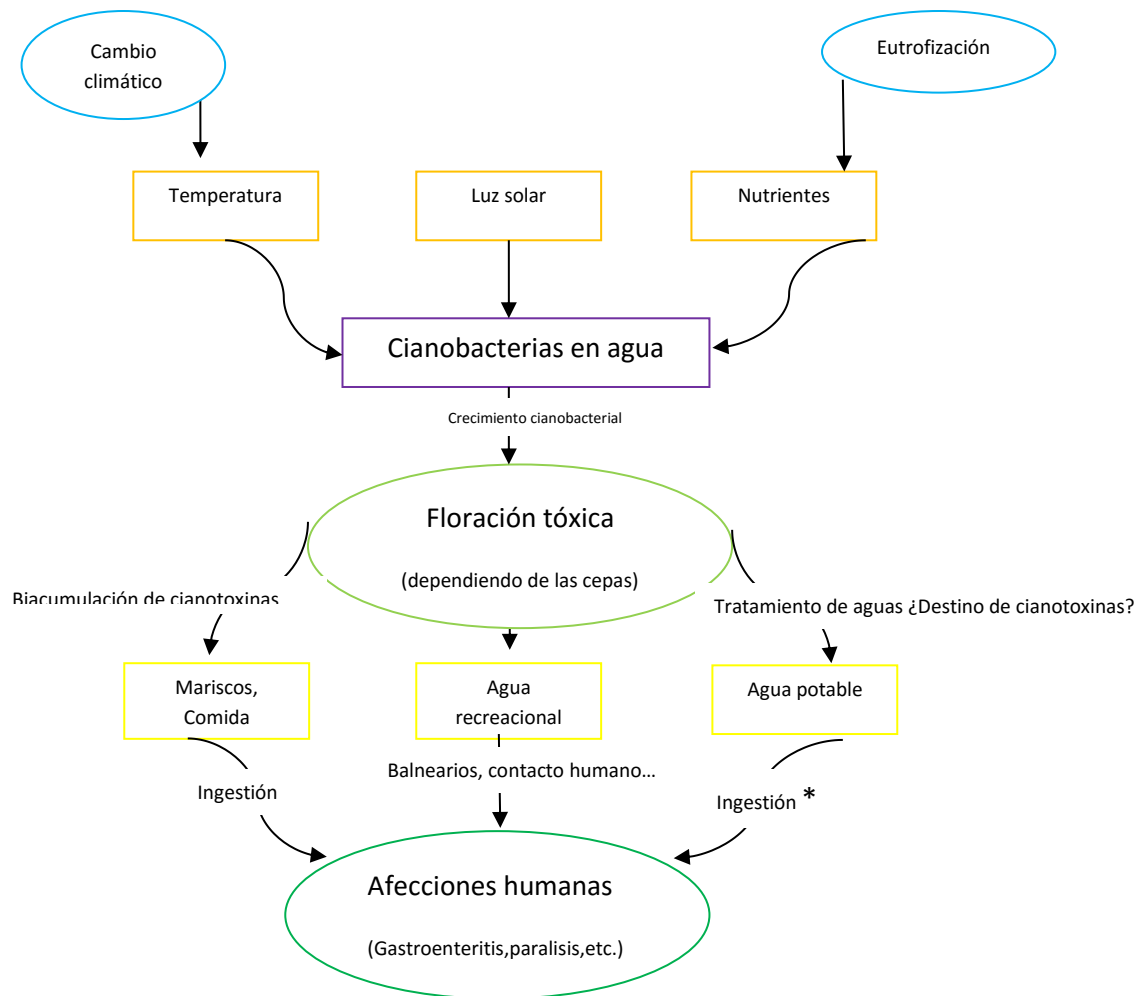
A estos resultados habría que añadir que el almacenamiento inadecuado de agua en recipientes abiertos para paliar los racionamientos, facilita la propagación de enfermedades como el dengue y la malaria, y pueden tener una distribución geográfica asociada. También suelen estar presentes algunas estructuras, como por ejemplo neumáticos viejos de vehículos, que pueden acumular agua, proveyendo así hábitats adecuados para los vectores de algunas enfermedades.

Ahora bien; como ya fue mencionado el embalse Camatagua es el principal reservorio de agua potable para la ciudad de Caracas. Los últimos estudios fueron

efectuados en el año 1997 y, desde entonces, el embalse ha sufrido grandes variaciones en su nivel por las situaciones de sequía extrema, además de la demanda creciente de agua potable para la población. De manera adicional, el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales Taiguaiguay (Edo. Aragua), fue desviado hacia el embalse Taiguaiguay, y de allí se bombea agua hacia el río Tucutunemo para la construcción del sistema de riego hacia los valles de esta zona. Sin embargo, por no haberse completado totalmente esta obra, parte del efluente de este sistema está siendo vertido hacia el río Guárico, principal afluente del embalse Camatagua.

Este evento ha generado consecuencias perjudiciales en el contexto de la calidad del agua potable. Entre ellos el crecimiento acelerado de las floraciones de cianobacterias.

No existe una definición o cuantificación internacional para el fenómeno de la floración de cianobacterias, sin embargo, es generalmente considerado como una producción significativa de la biomasa en un periodo corto de tiempo correlacionado con una disminución de la diversidad de fitoplancton. De hecho, las floraciones de cianobacterias son a menudo mono-específica (o casi) y pueden formar una capa densa de células en la superficie del agua visiblemente apreciable. La formación de las floraciones de cianobacterias se controla por factores ambientales, y las afecciones humanas son condicionadas por la capacidad de las cepas individuales para llevar a cabo la biosíntesis de cianotoxinas posteriormente a la exposición a estos dañinos metabolitos (Merel y col, 2013).



80% * Exposición humana a cianotoxinas (OMS, 1998)

Fig. 3 Origen de la toxicidad por floración de cianobacterias y exposición humana (Modificado de Merel y col., 2013)

La Planta de Tratamiento de Agua Potable Caujarito, que recibe las aguas del embalse Camatagua ha presentado algunos inconvenientes desde el punto de vista del tratamiento, relacionado entre otras causas al florecimiento explosivo del fitoplancton generado en el embalse y que se asemejan a lo exhibido en la figura N° 3.

A raíz de este problema de calidad de agua surge la alternativa de diseñar el sistema de tratabilidad (planta piloto) cuyo fundamento de tratamiento está orientado a la flotación, con el fin de optimizar la remoción del fitoplancton, en comparación al

tratamiento convencional Coagulación / Floculación / Sedimentación aplicado en la Planta de Tratamiento de Agua Potable Caujarito.

I.II Formulación de las interrogantes de investigación

1¿Puede continuar su aporte de agua la principal fuente de suministro para la Región Metropolitana, Embalse Camatagua, a raíz de las múltiples intervenciones, sin modificar los tratamientos aplicados en la Planta de Tratamiento Caujarito?

2¿La Planta Piloto ubicada en las inmediaciones de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Caujarito, resolverá con su tratamiento alternativo la remoción de especies que posteriormente son introducidas a la red de distribución de la Región Metropolitana?

3¿El sistema de tratabilidad propuesto representará un ahorro en términos de inversión en lo concerniente a la dosificación de sustancias químicas que usualmente son suministradas a la Planta de Tratamiento Caujarito, una vez que se inicie el proceso de rehabilitación?

I.III Objetivos de la investigación

I.III.I Objetivo general

Resolver la problemática actual de tratabilidad de agua potable mediante el sistema alternativo de tratamiento para la remoción de fitoplancton y compuestos organolépticos a fin de comprobar su eficiencia con respecto al sistema de potabilización convencional de la planta de tratamiento Caujarito.

I.II.II Objetivos específicos

- 1.- Caracterizar el embalse Camatagua en las dos épocas climáticas del año, invierno y verano, para evaluar la calidad del agua desde el punto de vista sanitario.
- 2.- Caracterizar el río Guárico en las dos épocas climáticas del año, invierno y verano para evaluar la calidad del agua desde el punto de vista sanitario.
- 3.- Determinar el comportamiento histórico del embalse Camatagua con el objeto de evaluar la intervención antrópica al que fue sometido desde su construcción.
- 4.-Evaluar la eficiencia del sistema de tratabilidad propuesto con el objeto de mejorar la calidad del agua cruda y complementar el sistema de tratabilidad actual instalado.
- 5.- Evaluar la relación costo-beneficio del sistema de tratabilidad propuesto.
- 6.- Proponer soluciones a la problemática de calidad de las aguas y al manejo del embalse Camatagua.

I.IV Justificación de la investigación

La investigación se consideró necesaria por la importancia que reviste el estudio de las fuentes de abastecimiento de agua, en este caso el embalse Camatagua, la cual surte a más de 5 millones de habitantes. La fuente que abastece a la ciudad de Caracas y a otras ciudades periféricas de importancia poblacional está siendo intervenida, por lo tanto requiere disminuir la influencia antrópica, sin embargo, en esta investigación fueron medidos algunos componentes para comprobar si las soluciones que se plantearon a corto plazo subsanarán parcialmente la problemática existente.

Adicionalmente, existe numerosa información concerniente a los estudios realizados al embalse Camatagua, la presente investigación fue necesaria para ordenar e interpretar estadísticamente los comportamientos históricos de este cuerpo de agua, a fin de establecer medidas preventivas de operaciones ó maniobras en el embalse cuando sea requerido.

El diseño de la Planta Piloto ubicada en Caujarito con su tratamiento de flotación representa una alternativa de remoción de compuestos físicos, químicos y biológicos con respecto a la Planta de Tratamiento de Potabilización Caujarito, además de está razón los costos de inversión en la dosificación de sustancias químicas utilizadas

actualmente en la planta convencional representó otro objetivo para esta investigación, mediante el estudio de la relación costo-beneficio en el uso de sustancias químicas.

I.V Alcance y limitaciones de la investigación

En cuanto al aspecto temporal, la caracterización de los cuerpos de agua, del embalse Camatagua y el río Guárico, fueron realizados en el año 2015 durante las épocas de invierno y verano.

Adicionalmente la investigación comprendió 20 años de resultados para la compilación e interpretación estadística a fin de verificar el comportamiento histórico de esta fuente de suministro.

Desde el punto de vista espacial, la investigación estuvo circunscripta al embalse Camatagua, y la Planta de Tratamiento de Potabilización Caujarito así como la Planta Piloto ubicada en la potabilizadora previamente mencionada.

II.- MARCO TEÓRICO

II.I Antecedentes

II.I.I Antecedentes nacionales

La investigación titulada Estudio Integral del Fitoplancton del embalse Camatagua: Sistemática, Distribución vertical, Abundancia, Biomasa y Producción Primaria; fue propuesta por Matos en 1992.

La metodología utilizada fue el muestreo durante un año (Octubre, 86 – Septiembre, 87) en la estación A ubicada aproximadamente en el centro del embalse. Muestreando una vez en época de sequía (Marzo, estación B) y otra vez en época de lluvia (Septiembre, estación C) además se muestrearon otros dos puntos del embalse con el fin de detectar posibles diferencias biológicas y físico químicas entre ellos.

La estación A se seleccionó para la determinación de la distribución vertical de las variables estudiadas por ser un punto próximo a la mayor profundidad del embalse 40 metros. Tomando en cuenta la influencia del Río Guárico la estación B, ubicada en la entrada de éste al embalse, se fijó para caracterizar el agua del río y la estación C de aproximadamente 40 metros de profundidad se fijó, debido a que es representativa del agua que sale del embalse, ya que se encuentra cerca de la torre-toma.

La hora de muestreo estuvo comprendida, durante todo el período, entre las 12 y 14 horas.

Los parámetros físico químicos determinados por Matos fueron, Transparencia del agua, Temperatura del agua y del aire, Radiación fotosintéticamente activa (RFA) este parámetro se registró con la ayuda de un quantum-sensor marca LICOR, con sensor sumergible, Oxígeno disuelto, Conductividad, pH, Alcalinidad total, Silicatos y fosfatos (ortofosfatos), Dureza total, Sólidos suspendidos.

Por otra parte, los parámetros biológicos determinados fueron identificación, abundancia y biomasa del fitoplancton, además de la productividad primaria, la cual se estimó en la estación A, mediante el método de la variación de la concentración de oxígeno disuelto en botellas claras y oscuras, este método se basa en el hecho de que la cantidad de dióxido de carbono absorbido en el proceso de síntesis de materia

orgánica es proporcional a la cantidad de oxígeno liberado por las plantas, de modo que la cantidad de carbono asimilado se puede calcular de la cantidad de oxígeno liberado, y por último el estado trófico del embalse Camatagua se determinó usando el índice de Carlson (1977).

Las conclusiones obtenidas por Matos fueron:

- 1.- Las concentraciones de oxígeno disuelto, fosfatos, productividad primaria, abundancia y composición del fitoplancton indican que el embalse de Camatagua, presenta características que permiten considerarlo como moderadamente productivo (mesotrófico).
- 2.- Al aplicar el Índice de Estado Trófico de Carlson, usando como indicador la transparencia del agua también caracterizó al embalse como Mesotrófico.
- 3.- La comunidad fitoplanctonica del embalse Camatagua, se caracteriza por el predominio en abundancia y biomasa de las algas verde-azules.
- 4.- La abundancia y variaciones estacionales del fitoplancton parecen estar asociadas, principalmente, con el aumento de la provisión de nutrientes durante la circulación (febrero y marzo) y con el comienzo de las lluvias (a partir de mayo hasta julio).
- 5.- En las condiciones actuales y con respecto a las características físico químicas y biológicas analizadas en este estudio se puede decir, que con el tratamiento de potabilización del agua proveniente de este embalse, la misma es adecuada para consumo humano.

El embalse Camatagua muestra una estacionalidad relativamente bien definida en su comportamiento térmico. Presenta un período de estratificación que comprende los meses de abril a noviembre, abarcando toda la época de lluvias y un período de circulación parcial que probablemente se inicia en diciembre y se prolonga hasta marzo, período que coincide con la época seca.

Se recomienda el Saneamiento Integral de la cuenca del Río Guárico, para así disminuir la entrada de nutrientes. Es necesario el manejo correcto de los embalses y el mantenimiento de estudios limnológicos en estos cuerpos de agua que permitan detectar cambios en su estado trófico, para así establecer programas precisos de control.

Un antecedente más reciente es de González en 2015, el cual realizó la evaluación limnológica del embalse Camatagua, planteándose como objetivo general: Evaluar la calidad de las aguas del embalse Camatagua y determinar el impacto generado luego del trasvase de agua desde fuentes contaminadas y eutrofizadas.

En cuanto a la metodología empleada se realizaron los muestreos mensualmente desde septiembre de 2012 hasta agosto de 2013. Se establecieron cuatro localidades de muestreo, las muestras se tomaron a niveles superficial, intermedio y fondo con una botella de captación. El muestreo fue realizado en 4 puntos, que son presentados a continuación:

E1: Cercana al dique, al lado de la estación de monitoreo instalada por el Ministerio del Ambiente y las Hidrológicas. Coordenadas = $9^{\circ}49'10.6''$ N – $66^{\circ}56'59.7''$ O (UTM: 19 P 724848 1086154).

E2: Quebrada El Jobal. Coordenadas = $9^{\circ}49'11.1''$ N – $66^{\circ}58'32.3''$ O (UTM: 19 P 722026 1086153).

E3: Quebrada Zuata. Coordenadas = $9^{\circ}49'28.5''$ N – $67^{\circ}02'30.9''$ O (UTM: 19 P 714751 1086644).

E4: Río Guárico. Coordenadas = $9^{\circ}50'20.9''$ N – $67^{\circ}02'42.3''$ O (UTM: 19 P 714394 1088252).

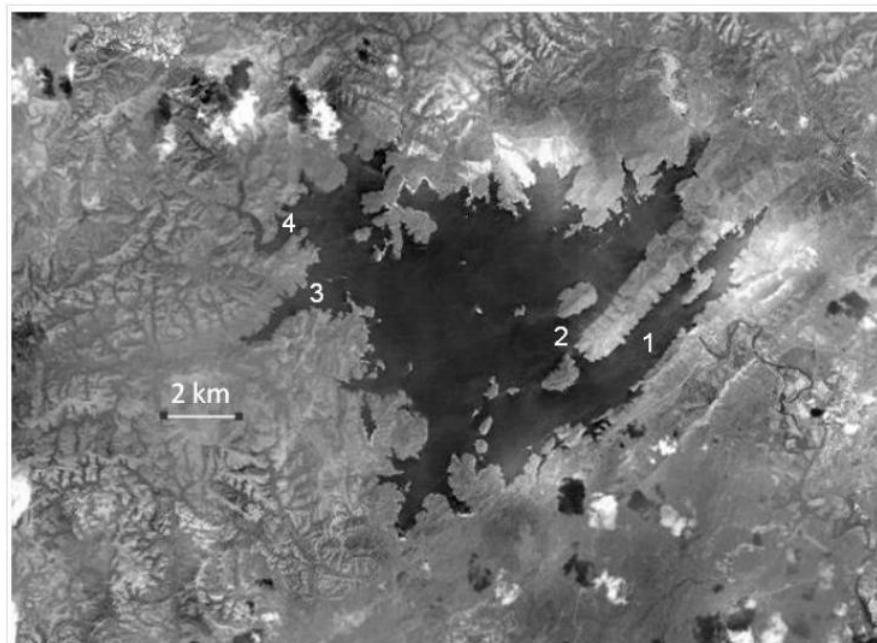
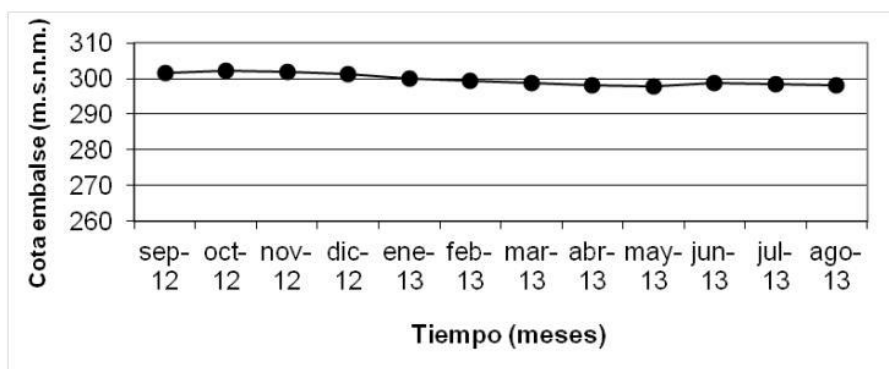


Fig.4 Puntos de muestreo de González 2015

En el campo, se determinaron la transparencia del agua, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad, pH. Se realizaron los siguientes análisis físico químicos: Turbiedad, Alcalinidad Total, Dureza Total, Fósforo Total, Nitrógeno Total, Sólidos Totales, Ortofosfatos, Nitritos y Nitratos, Amonio. En cuanto a los análisis biológicos se determinaron variables del fitoplancton (identificación de las especies de plancton, conteo de las algas, determinación de la biomasa de algas por el contenido de clorofila-a), además fueron determinadas abundancia e identificación de especies de zooplancton y la determinación del estado trófico de acuerdo al criterio de Salas y Martínó, de lagos cálidos tropicales el cual se basa en la concentración de fósforo total.

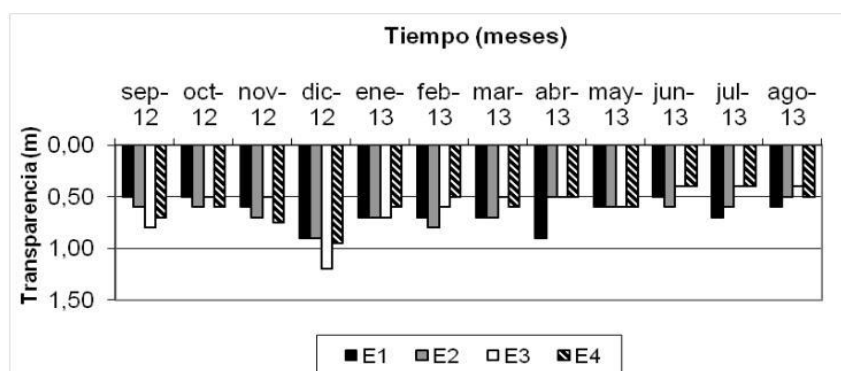
González obtuvo los siguientes resultados.

Nivel de las aguas



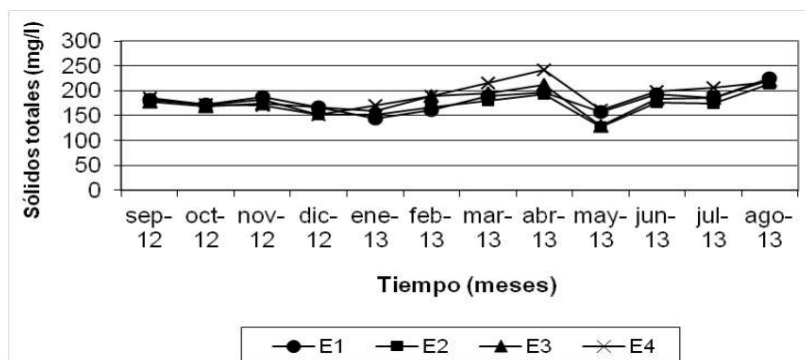
Gráfica N°1 Tomado de González 2015 Nivel de las aguas del embalse Camatagua.

Transparencia



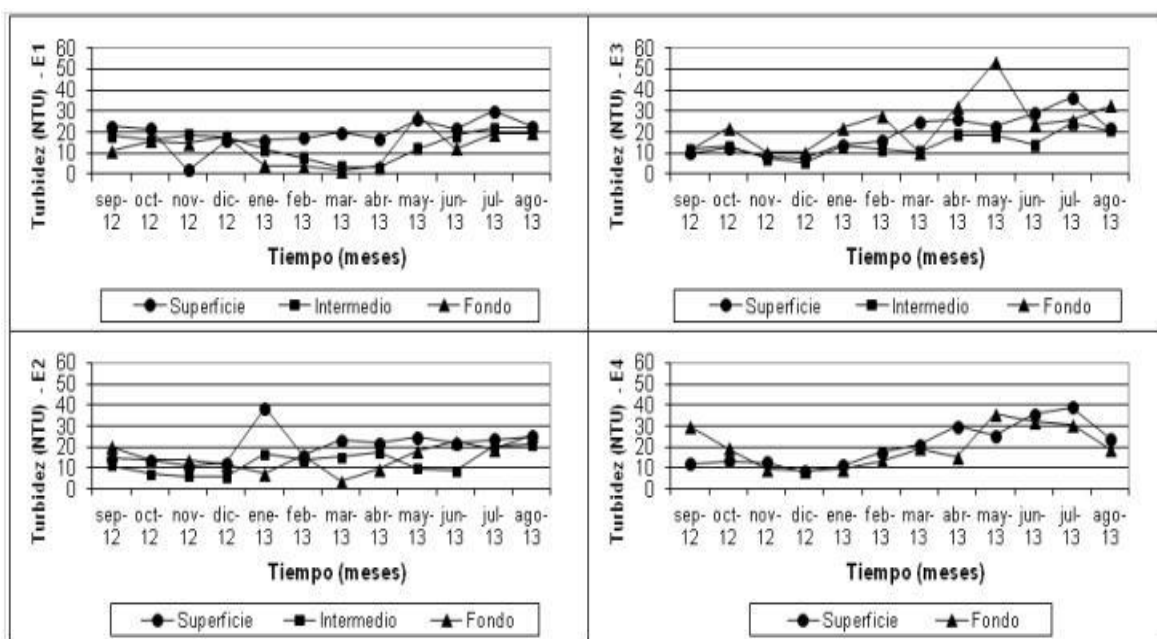
Gráfica N° 2 Tomado de González 2015 Transparencia del agua en las cuatro localidades de estudio del embalse.

Sólidos Totales



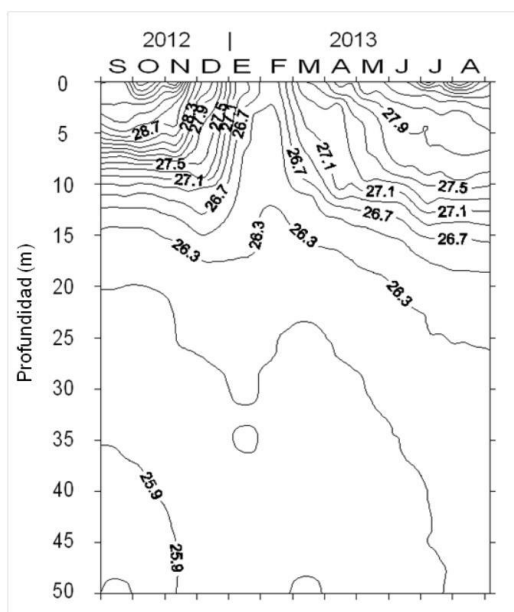
Gráfica N°3 Tomado de González 2015. Variaciones de los sólidos totales en las localidades de estudio del embalse.

Turbiedad



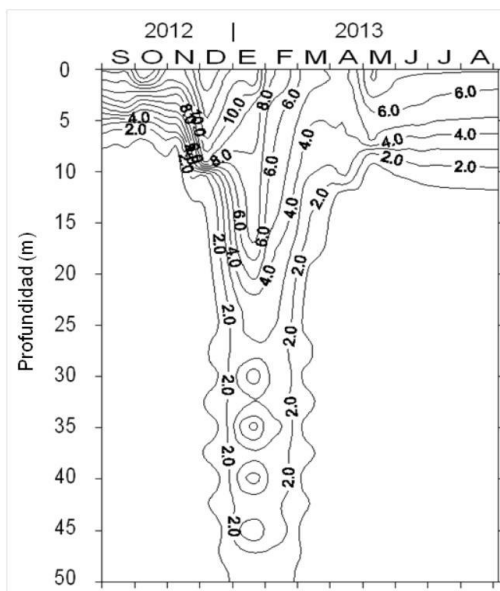
Gráfica N° 4 Tomado de González 2015. Variaciones de la Turbiedad de las aguas en las diferentes profundidades de las localidades de estudio del embalse

Temperatura



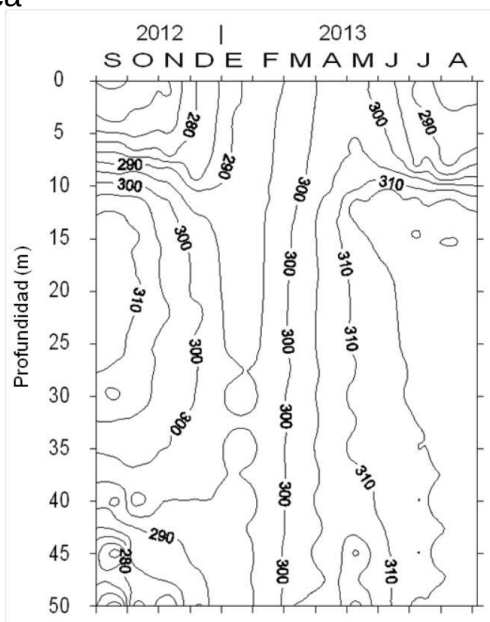
Gráfica N° 5 Tomado de González 2015. Isotermas en E1

Oxígeno Disuelto



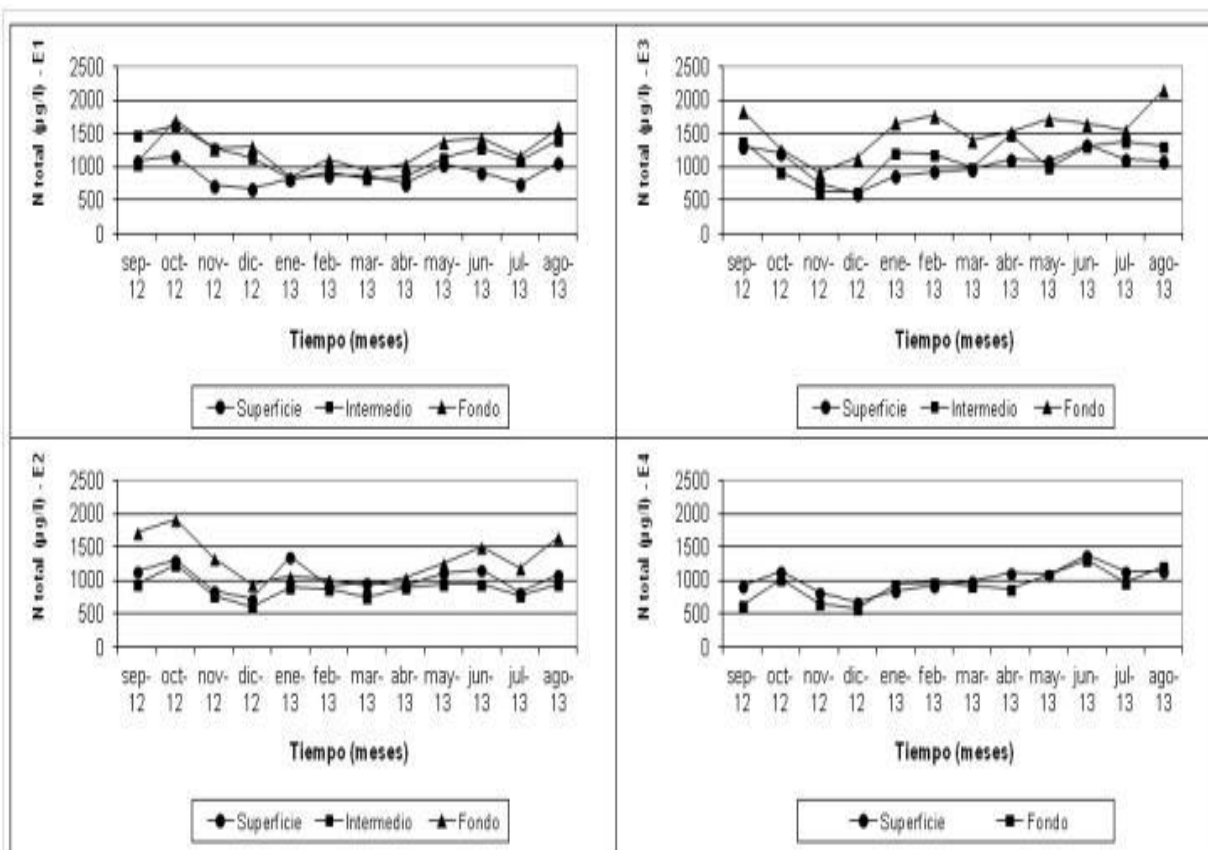
Gráfica N° 6 Tomado de González 2015. Isopletas de Oxígeno Disuelto en E1

Conductividad específica



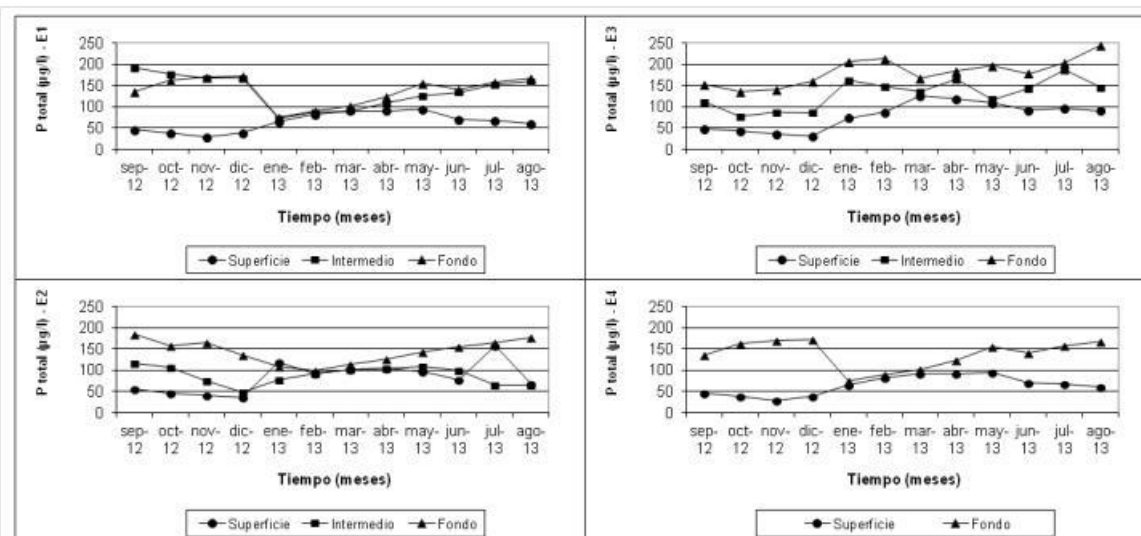
Gráfica N° 7 Tomado de González 2015. Isopletas de Conductividad en E1

Nitrógeno total ($\mu\text{g/l}$)



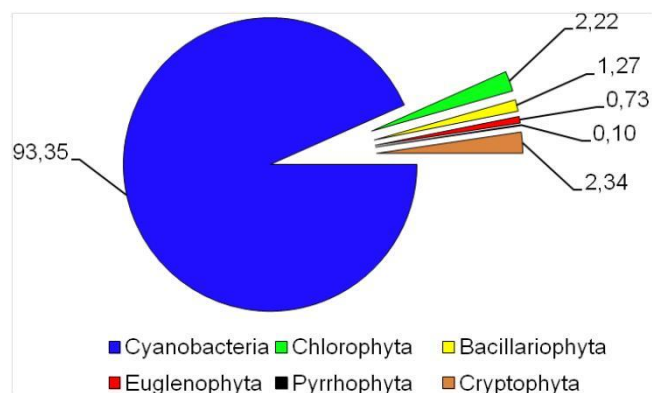
Gráfica N°8 Tomado de González 2015. Concentraciones de N total en los diferentes estratos de las localidades del embalse.

Fósforo total ($\mu\text{g/l}$)



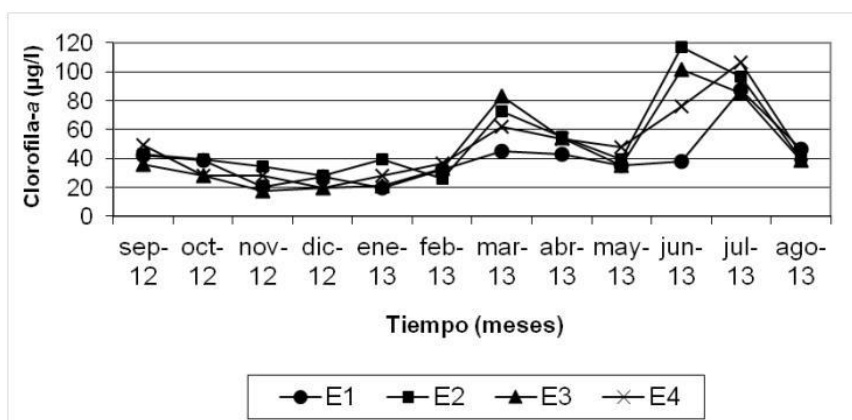
Gráfica N° 9 Tomado de González 2015. Concentraciones de P total en los diferentes estratos de las localidades del embalse.

En cuanto al Fitoplancton en el período de estudio se registraron 37 especies, siendo las algas verdes (Chlorophyta) las más diversas con 14 representantes, seguidas de las cianobacterias (Cyanobacteria) con 11 representantes, de las diatomeas (Bacillariophyta) con 7 representantes, las Cryptophyta y Euglenophyta, con 2 especies cada división y, finalmente, las Pyrrhophyta con un representante



Gráfica N° 10 Tomado de González 2015. Proporciones relativas (%) del fitoplancton en E1 del embalse Camatagua

Clorofila – a



Gráfica N° 11 Tomado de González 2015. Concentraciones de clorofila-a en las diferentes localidades del embalse

Las consideraciones finales más importantes reportadas por González en esta investigación fueron.

-Se registraron elevadas concentraciones de nutrientes, de nitrógeno total y de fósforo total, todo lo cual permite clasificar el embalse como eutrófico.

- Debe prestarse atención a la presencia de géneros de cianobacterias con representantes (géneros) que pudieran tener cepas potencialmente tóxicas para los mamíferos. Se recomienda altamente el monitoreo de la cianotoxinas en las aguas del embalse.
- Debido a que se trata de un embalse que se emplea para el suministro de agua potable, debe limitarse la actividad antrópica en la cuenca e intentar, en el corto plazo, de tratar adecuadamente las aguas antes de que desemboquen en el cuerpo de agua.

II.I.II Antecedentes internacionales

En el caso de antecedentes internacionales Teixeira y Rosa en 2006 titularon su investigación como “Comparación de Flotación por Aire Disuelto y Sedimentación convencional para remover células cianobacteriales de Microcystinas Aeruginosa, Parte 1: Condiciones de operaciones claves”.

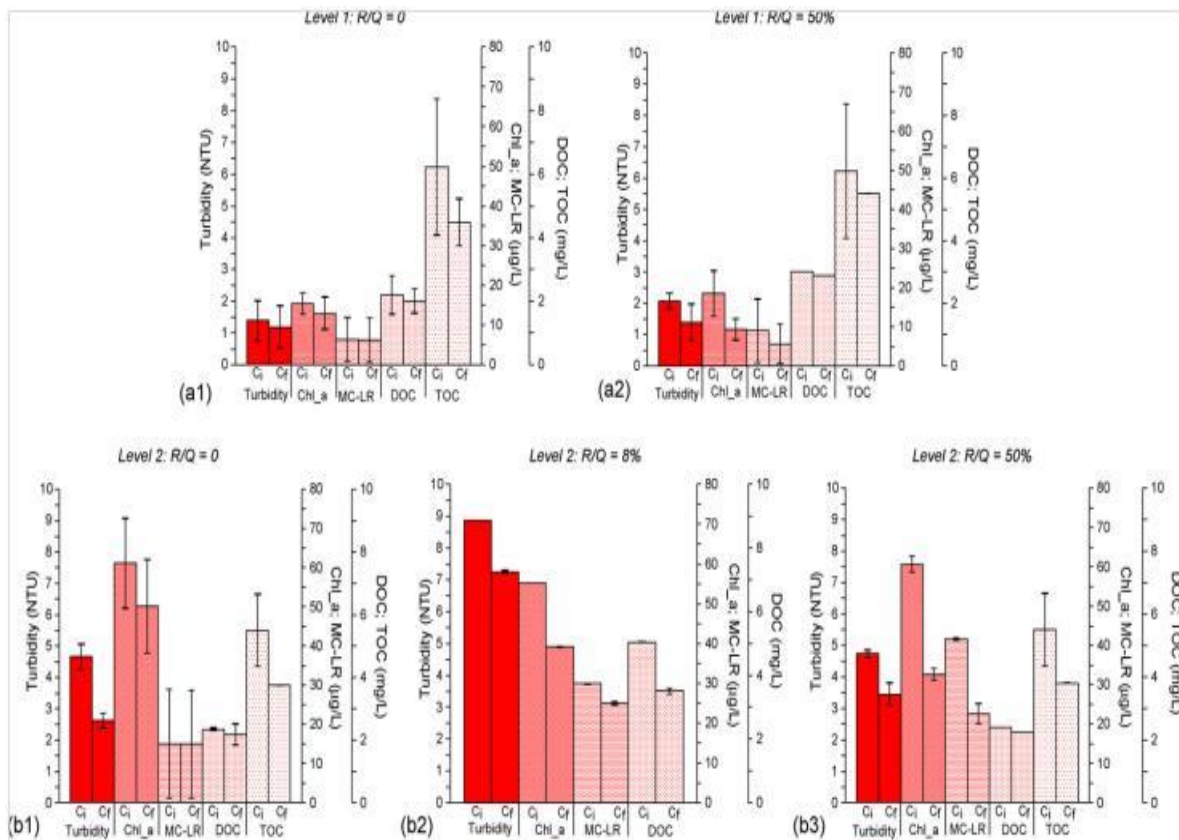
La flotación con aire disuelto (DAF por sus siglas en inglés) generalmente es considerada más efectiva que la sedimentación en el tratamiento de aguas ricas en algas. Sin embargo, el tipo y dosis de coagulante, es también tal como la Coagulación (C), Floculación (F), y Flotación (DAF) parámetros de operación claves para la remoción intacta de células cianobacteriales. Este estudio compara el comportamiento del C/F/DAF y la C/F/Sedimentación (S) para remover sin causar daños a las células de la Microcistina Aeruginosa, un referente global de la eficiencia en la eliminación de las cianobacterias. Fueron utilizados dos coagulantes, sulfato de aluminio y un coagulante de sulfato de aluminio pre polimerizado de alta basicidad “WAC”, y tomadas en cuenta las condiciones de operación más relevantes (gradientes de velocidad de la coagulación y floculación, tiempo de retención en la floculación y la relación de presión del agua reciclada en el DAF), todo esto para dos escenarios de concentración celular en el influente, expresados como clorofila a, de 10-35 µg/l (Nivel 1) y más alta que 50 µg/l (Nivel 2).

Las características del agua de grifo utilizada para los experimentos fueron

<i>Tipo de agua</i>	<i>pH</i>	<i>Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)</i>	<i>Turbiedad (NTU)</i>	<i>COD (mg C/l)</i>	<i>COT (mgC/l)</i>	<i>UV 254nm(cm^{-1})</i>
Agua de grifo	6,4	236	0,78	2,09	2,35	0,009

Tabla N° 1 Características del agua de grifo utilizada para los experimentos antes de inocular Microcistina Aeruginosa

Los resultados demuestran que C/F/DAF es el proceso más eficiente para remover las células de Microcistinas Aeruginosa con respecto al C/F/S, removiendo un alto porcentaje de clorofila a del 93% al 98%, sin liberación de toxinas al agua (8% al 15%), con una baja relación de presión de agua reciclada (8%) y una baja dosis de coagulante (3 mg $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{l}$ versus 5 mg $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{l}$ de WAC), coagulación más lenta (380 s^{-1} versus 743 s^{-1}) y un tiempo de floculación más corto (8 minutos en 70 s^{-1} versus 15 minutos en 24 s^{-1}). El WAC se comportó mejor que el sulfato de aluminio para ambos procesos. Para cualquiera de los dos coagulantes la eficiencia de remoción celular aumentó con la concentración del influente, aunque eran necesarias dosis más altas para alcanzar los mismos residuales.



Gráfica Nº 12 Resultado del DAF, Microcistina Aeruginosa, células cultivadas (PCC 7820). En donde: R/Q Relación de la presión del agua reciclada, con adición de coagulante Ci y sin adición de coagulante Cf, Nivel 1 (Level 1) 10-35 µg/l Clorofila a, Nivel 2 (Level 2) mayor a 50 µg/l. Chl_a: Clorofila a, DOC: Carbono orgánico disuelto, TOC: Carbono orgánico total, MC-LR :Microcistina Aeruginosa.(Tomada de Teixeira, 2006)

	% Remoción					
	Nivel 1		Nivel 2			Nivel 2
	R/Q=0	R/Q=0.5	R/Q=0	R/Q=0.08	R/Q=0.5	Flotación Natural
Turbiedad	14.1	0.4	43.5	11.6	9.5	4.1
Clorofila a	15.7	24.7	18.0	23.5	19.2	17.6
MC-LR	2.2	6.2	0.3	9.5	18.0	16.9

Tabla Nº 2 Eficiencias de remoción en el DAF de Turbiedad, Clorofila y Microcistina Aeruginosa extracelular del agua de grifo inoculada con *Microcistina Aeruginosa* (PCC 7820), sin adición de coagulante y la comparación con el comportamiento de la flotación natural. Nivel 1: concentración del influente 10-35 µg/l clorofila-a y Nivel 2: concentración del influente mayor a 50 µg/l. de clorofila-a. (Tomada de Teixeira, 2006)

Nota: las eficiencias de remoción relativas a R/Q distinto de cero, incluye el factor de corrección de la dilución.

II.II Bases teóricas

II.II.I Eutrofización

La palabra Eutrofia procede del adjetivo alemán “eutrophe” y se refiere a “rico en nutrientes”. La eutrofización se define como el enriquecimiento de las aguas con nutrientes a un ritmo tal que no puede ser compensado por eliminación o mineralización total. Una de sus principales manifestaciones es la proliferación de algas y macrófitos en función de la carga de nutrientes. Naumann en 1975 introdujo los conceptos generales de oligotrofia y eutrofia y los distinguió en base a las poblaciones fitoplanctónicas. Posteriormente, gran número de estudios limnológicos se han ocupado de definir las características de los distintos tipos y subtipos de lagos. Se desarrolló una terminología exagerada y confusa porque, mientras unos lagos se diferenciaban de acuerdo a sus especies indicadoras, otros lo hacían en función de los parámetros fisicoquímicos. Por esto se definen los principales tipos o categorías tróficas en:

- a.- Oligotróficos: sistemas acuáticos de bajo contenido de nutrientes y producción vegetal mínima.
- b.- Eutróficos: sistemas acuáticos de alto contenido de nutrientes y producción vegetal excesiva.
- c.- Mesotróficos: sistemas acuáticos con características intermedias entre oligotrófico y eutrófico.

Los tres tipos representan un espectro de condiciones lacustres y no existe una demarcación fija entre ellos.

Aún cuando la eutrofización puede ser un fenómeno natural al que tienden los lagos durante su evolución milenaria, en la actualidad el ritmo se ve acelerado por la intervención humana (descarga de nutrientes, aumento de la erosión) y se habla de eutrofización cultural.

El paso de un lago oligotrófico a uno eutrófico se caracteriza por un cambio importante en las poblaciones. En el lago oligotrófico el cociente producción/biomasa es más bajo y existe mayor diversidad biótica. Conforme se tiende a la eutrofia disminuye el número de especies, pero no la densidad. En cuanto al fitoplancton y zooplancton se produce una sustitución de grupos y poblaciones. Las algas

diatomeas y crisofíceas van siendo sustituidas por clorofíceas y cianofíceas. En el zooplancton, las especies de larga vida y carnívoras dan paso a una mayor proliferación de rotíferos y pequeños copépodos de alta tasa de renovación (CEPIS, 1989).

En el caso de eutrofización o fertilización excesiva, no puede hablarse de una sucesión hacia el estado “maduro” o de equilibrio, sino por el contrario, de una regresión. El avance de este proceso es alarmante y se han encontrado relaciones estrechas entre el aumento de la población humana y los índices de eutrofización (Margalef, 1983)

En un sistema acuático existen diversos compartimientos intercomunicados: interfase aire-agua, columna de agua, sedimento e interfase agua-sedimento. Para analizar sus características limnológicas hay que tener en cuenta la interacción entre estos compartimientos. Con referencia a la eutrofización, la relación más importante es la que se produce entre la columna de agua y el sedimento en la interfase sedimentaria. Los intercambios están regulados por mecanismos asociados al equilibrio agua-mineral, interacciones dependientes del redox, oxígeno disuelto y actividades de los distintos seres vivos.

Los procesos de adsorción-liberación de nutrientes por el sedimento, dependen de la presencia-ausencia de oxígeno en la interfase sedimentaria. El contenido de oxígeno en esta microzona está influido por el metabolismo de las algas, bacterias, hongos, invertebrados plantónicos que migran a la interfase e invertebrados bentónicos sésiles.

La principal causa del consumo de oxígeno en el hipolimnion es la degradación microbiana de la materia orgánica particulada sedimentada. Cuando en la superficie del sedimento hay una microzona oxidada (al menos 1 a 2 mg/l de oxígeno), se previene la liberación de los componentes solubles desde el agua intersticial del sedimento a la columna de agua. Funciona como una trampa eficiente de Fe^{+2} y Mn^{+2} , así como de PO_4^{-3} (absorbido y acomplejado con óxidos e hidróxidos de Fe).

La liberación de fósforo aumenta con la anaerobiosis (la ausencia de oxígeno reduce los hidróxidos férricos y el ortofosfato se libera). También aumenta en presencia de bacterias de los géneros *Pseudomonas*, *Bacterium* y *Cromobacterium* sp. La

abundancia y distribución de especies varía en función del tipo de sedimentos. La mayor densidad se encuentra en sedimentos limosos con alto contenido de materia orgánica. La densidad es baja en sedimentos arenosos y va aumentando en sedimentos más uniformes con mezcla de arena y cantidades moderadas de materia orgánica y limo. Hutchinson 1975 describe detalladamente el ciclo de los principales nutrientes (fósforo, nitrógeno, carbono, sílice) involucrados en los procesos de eutrofización en el sistema acuático.

Para lagos oligotróficos los bajos niveles de productividad están regulados por la poca entrada de nutrientes inorgánicos. Las características morfométricas comunes en los lagos oligotróficos (gran tamaño y profundidad, valores del cociente volumen hipolimnético / epilimnético) influyen en su ciclo de nutrientes.

La baja producción de materia orgánica y las elevadas tasas de degradación de los sedimentos producen tasas bajas de descomposición. Por otro lado, las condiciones oxigenadas del hipolimnion dan lugar a una liberación escasa de nutrientes desde el sedimento.

Asimismo, la concentración baja de sustratos orgánicos disueltos condiciona la escasez de poblaciones bacterianas y las tasas lentas de metabolismo microbiano. La síntesis de los micronutrientes orgánicos, esenciales a la mayoría de las algas planctónicas, se ve limitada y desciende la productividad del ecosistema.

Por el contrario, en el lago eutrófico la carga de nutrientes (fosforo y nitrógeno) es elevada. Al aumentar la fijación fotosintética y la productividad, aumentan las interacciones cíclicas de regeneración de nutrientes inorgánicos y compuestos orgánicos. Como consecuencia de la descomposición del exceso de materia orgánica producida, la concentración de oxígeno en aguas profundas (hipolimnion) disminuye drásticamente (condiciones anaeróbicas) favoreciendo la liberación de nutrientes a partir del sedimento. La riqueza de compuestos orgánicos disueltos potencia el crecimiento de las poblaciones bacterianas y tasas elevadas de metabolismo microbiano. Los micronutrientes orgánicos sintetizados favorecen el crecimiento algal. Al aumentar la productividad planctónica, disminuye la zona trofógena por limitación de la luz.

Los lagos no se pueden estudiar independientemente de sus cuencas, forman una unidad con relaciones más intensas a medida que intervienen los procesos de degradación (CBE, 1989).

II.II.I.I Causas de la Eutrofización

Como los nutrientes son directamente responsables del crecimiento de algas y macrófitos, el enriquecimiento de nutrientes constituye la raíz principal del problema de eutrofización.

Las algas requieren una serie de elementos minerales para su crecimiento: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, azufre, potasio, magnesio, calcio, hierro, boro, zinc, cobre, molibdeno, manganeso, cobalto, sodio y cloro. Adicionalmente, las diatomeas requieren sílice.

La importancia de cada elemento en la regulación del crecimiento vegetal depende de su abundancia y demanda en el ambiente acuático. Para el crecimiento correcto de las plantas acuáticas, existe una relación estequiométrica definida de los elementos esenciales. Por ejemplo, la proporción de nitratos a fosfatos debe ser en la mayoría de las especies, del orden de 10-15 N a 1P. Si aumentamos al doble la cantidad de fosfatos en el sistema, la planta utilizará el fosfato solamente mientras haya nitrato disponible en esa proporción (10-15 a 1), el resto queda en el medio acuático.

El concepto más importante para explicar la respuesta alga-nutriente es el principio conocido como “nutriente limitante”. De forma resumida, este principio se basa en que la tasa de crecimiento algal será restringida por el elemento que se encuentre presente en el medio acuático en menor concentración respecto a la proporción requerida por el alga. Solamente la adición de este elemento limitante estimularía el crecimiento algal. Aunque cualquiera de los elementos necesarios para el desarrollo vegetal mencionado anteriormente, es susceptible de ser limitante, en la mayoría de los casos el fósforo y nitrógeno son los nutrientes limitantes y por eso los responsables de la aparición de condiciones perjudiciales en los sistemas acuáticos. Hay una serie de consideraciones a tener en cuenta respecto a las formas de fósforo y nitrógeno y sus relaciones dentro del medio acuático:

a.- El fósforo se encuentra presente en las aguas naturales en forma de distintos tipos de fosfatos. Estas formas son normalmente clasificadas como ortofosfatos, fosfato condensado (polifosfato) y fosfatos acomplejados orgánicamente. Pueden estar presentes en la forma soluble, particulada (detrito) o en los cuerpos de los organismos acuáticos. El ortofosfato es la forma disponible para el crecimiento algal; las algas son capaces de acumularlo y almacenarlo en sus células para usarlo cuando su concentración en el agua sea menor.

b.- El nitrógeno está presente en las aguas naturales en varias formas o estados de oxidación. Las más comunes son amonio (NH_4), nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-) y gran cantidad de compuestos de nitrógeno orgánico. La mayoría de las algas requiere una fuente de nitrógeno en forma combinada (por ejemplo, nitrato, amonio, nitrito o urea). Sin embargo, algunas algas verde-azuladas son capaces de fijar el nitrógeno gaseoso y de esta forma no dependen del suministro de nitrógeno combinado.

c.- De forma experimental se encontró que la relación atómica del nitrógeno-fósforo para las células vegetales, era de aproximadamente 16:1, de forma equivalente, el cociente de masa sería 7:1, estimulándose la fijación atmosférica de nitrógeno, mientras que estarían limitados por fósforo cuando es superior a 7:1. El valor del cociente depende de la estequiometría de las distintas especies.

Los diferentes usos del terreno juegan un papel importante en la eutrofización al alterar las rutas y tasas de transporte de nutrientes del ambiente. En la mayoría de las cuencas, los nutrientes que entran al ecosistema acuático pueden ser derivados de fuentes naturales y artificiales.

De forma general, una fuente de nutrientes puede describirse como el lugar en que se liberan nutrientes vegetales o el área a partir de la cual los nutrientes se exportan. Se dividen en puntuales (lugar en que los nutrientes se liberan en concentraciones compatibles con los métodos prácticos para su remoción) o dispersas (área desde la cual los nutrientes se exportan de forma no compatible con los métodos prácticos para su remoción).

Es importante definir las rutas y forma de transporte para estimar el flujo de nutrientes desde fuentes dispersas, porque pueden exportarse simultáneamente por distintas rutas y transportarse por distintos mecanismos; agua superficial (ríos,

arroyos), escorrentía, precipitación, aves acuáticas, fijación de nitrógeno en superficie (CBE, 1989).

II.II.I.II Consecuencias de la Eutrofización

La relevancia del fenómeno de eutrofización se hace patente al evaluar sus efectos negativos. El deterioro en la calidad del agua y la proliferación algal afecta los principales usos del recurso hídrico, suponiendo incluso un peligro potencial para la salud de los consumidores.

La primera consecuencia de la eutrofización es el desequilibrio ecológico del sistema que se resume en el siguiente esquema:

- A.- Exceso de nutrientes
- B.- Generación de biomasa vegetal
- C.- Sedimentación de materia orgánica muerta
- D.- Incremento de la demanda bioquímica de oxígeno
- E.- Condiciones anaeróbicas en el hipolimnion
- F.- Predominio de bacterias anaeróbicas y facultativas y de un estrato algal superficial.

Los efectos en el sistema acuático se podrían englobar en tres categorías:

- A.- Impactos en la calidad del agua del lago / embalse.

Las alteraciones en la calidad se reflejarían en:

- A.1.- Incremento en la cantidad de materia orgánica particulada como fitoplancton, zooplancton, bacterias y detrito.
- A.2.- Sustitución de especies de algas diatomeas y crisofíceas (inocuas) por especies de los grupos clorofíceas y cianofíceas (algas verdes y azul-verdosas indeseables que excretan sustancias tóxicas al medio)
- A.3.- Incremento de compuestos orgánicos disueltos que:
 - A.3.1.- Producen olores y sabores desagradables
 - A.3.2.- Aumentan el color del agua
 - A.3.3.- Son precursores potenciales de compuestos halogenados
 - A.3.4.- Constituyen el sustrato para el crecimiento bacteriano en las plantas de tratamiento y redes de distribución.

A.3.5.- Contribuyen a los problemas de corrosión

A.4.- La falta de oxígeno en el área de contacto agua-sedimento conduce a una mineralización incompleta de las sustancias orgánicas. En esas condiciones reductoras se propicia la liberación de sustancias tales como: metano, ácido sulfhídrico, amoníaco, fosforo, hierro, manganeso y otros metales, a la columna de agua, alterando sus características fisicoquímicas.

A.5.- Pérdida de los valores estéticos.

B.- Impactos en las operaciones de utilidad del agua (sistemas de tratamiento).

Los cambios que se producen en la calidad del agua tienen efectos directos en las operaciones y costos del tratamiento para suministro de agua potable.

B.1.- Efectos en la floculación al incrementar los costos químicos y de operación para el control del pH.

B.2.- Efectos en la filtración. Las algas filamentosas y partículas orgánicas obstruyen los filtros de las plantas de tratamiento e incrementan la pérdida de agua y los costos de energía de la operación.

B.3.- Efectos en la desinfección, que incluyen:

B.3.1.- Incremento en la demanda de cloro por el exceso de materia orgánica,

B.3.2.- Descenso en la efectividad debido a las turbiedades altas,

B.3.3.- Aumento de la formación de hidrocarburos clorinados (como trihalometanos) por reacción del cloro con los compuestos orgánicos.

B.4.- Efectos en la distribución como:

B.4.1.- Desarrollo bacteriano al incrementar el contenido orgánico,

B.4.2.-Incremento en los problemas de olor-sabor que requieren de tratamientos costosos (carbón activado) para su completa eliminación,

B.4.3.- Incremento en la precipitación de hierro y manganeso. Si las plantas potabilizadoras no poseen unidades especiales para la eliminación de estos minerales (Fe y Mn) pasan al sistema de distribución. En el caso de los gases sulfuro de hidrógeno, carbónico y metano, su eliminación se consigue por aireación simple.

B.5.- Otros efectos económicos incluyen: costos de programa de muestreo para la identificación de problemas en el embalse, muestreo para el control de los procesos de tratamiento, tratamientos especiales para la remoción de Fe y Mn y prevención de la intrusión algal, tratamientos para eliminar el olor-sabor.

C.- Impactos en los usuarios del recurso.

C.1.- Riesgos a la salud por exposición a algas y bacterias tóxicas. Investigaciones epidemiológicas han establecido una elevada correlación entre epidemias gastrointestinales y la presencia de grandes concentraciones de algas verde-azules en los embalses de abastecimiento público.

C.2.- Riesgo a la salud por exposición a compuestos orgánicos potencialmente tóxicos o cancerígenos. Está demostrado que el fitoplancton es una fuente importante de precursores de trihalometanos. La biomasa algal (algas verdes y verde-azules) y sus productos extracelulares reaccionan con el cloro en las plantas de tratamiento para producir trihalometanos y otros compuestos halogenados tóxicos.

C.3.- Interferencias con los usos recreacionales y de irrigación por obstrucción de canales (algas y macrófitos).

C.4.- Incrementan los costos económicos de tratamiento asociados a la presencia de Fe, Mn y corrosión.

C.5.- Incrementan las tarifas del uso del agua para pagar los nuevos costos de tratamiento (CBE, 1989).

II.II.I.III Relación Nitrógeno / Fósforo (N/P)

La relación N/P se utiliza para definir el elemento limitante en el crecimiento de las plantas acuáticas, es decir, el que desaparece antes de la columna de agua. Hay que tener en cuenta dos consideraciones:

a.- La cantidad relativa de fósforo y nitrógeno requerida por las plantas acuáticas.

b.- La cantidad relativa de fósforo y nitrógeno disponible inicialmente para el crecimiento en ese cuerpo de agua.

En general, se considera que cuando el cociente N/P es menor a 9 ó 10, el nitrógeno es el elemento limitante y cuando N/P es mayor a 9 ó 10, el fósforo controla, cuando N/P= 10 ninguno de los dos limita. Esto está sujeto a variación según la estequiometría de las plantas, en ocasiones sólo un cociente N/P de 20 o mayor corresponde a lagos limitados por fósforo y un cociente de 5 o menor refleja sistemas limitados por el nitrógeno.

Este cociente es útil para entender la relación entre N, P y biomasa de plantas a un primer nivel. Sin embargo, se debe tener precaución en su interpretación y uso. Por ejemplo, para controlar el fitoplancton, la remoción de nitrógeno de sistemas acuáticos limitados por dicho elemento, puede dar lugar a valores del N/P muy bajos. Se ha observado que valores del cociente N/P menores de 4 en agua dulce pueden estimular el crecimiento de algas verde azules dañinas, capaces de fijación atmosférica de nitrógeno. Estas especies producen vacuolas de gas que las mantiene en superficie reduciendo la velocidad de sedimentación incluso a valores negativos (CBE, 1989).

II.II.IV Fitoplancton-Clorofila

Los modelos de clorofila se basan generalmente en las relaciones de este parámetro con el contenido de fósforo total en el lago o con la carga externa y también en la relación entre la concentración de la clorofila y la profundidad del disco Secchi, interesante al ser la transparencia una medida de fácil determinación.

Las relaciones entre el fósforo total calculado mediante el balance de masa o ecuaciones empíricas y otras medidas de eutrofización es de gran utilidad para comprender el comportamiento general del lago ante cambios de la carga externa de fósforo.

La principal consecuencia de la eutrofización es el crecimiento acelerado del fitoplancton (floraciones algales), afectando negativamente los distintos usos del recurso hídrico y causando diversos daños en el sistema. De ahí el interés en conocer los factores que limitan dicho crecimiento.

La tasa de crecimiento fitoplanctónico depende de tres componentes principales: Temperatura, Radiación solar y Nutrientes (CBE, 1989).

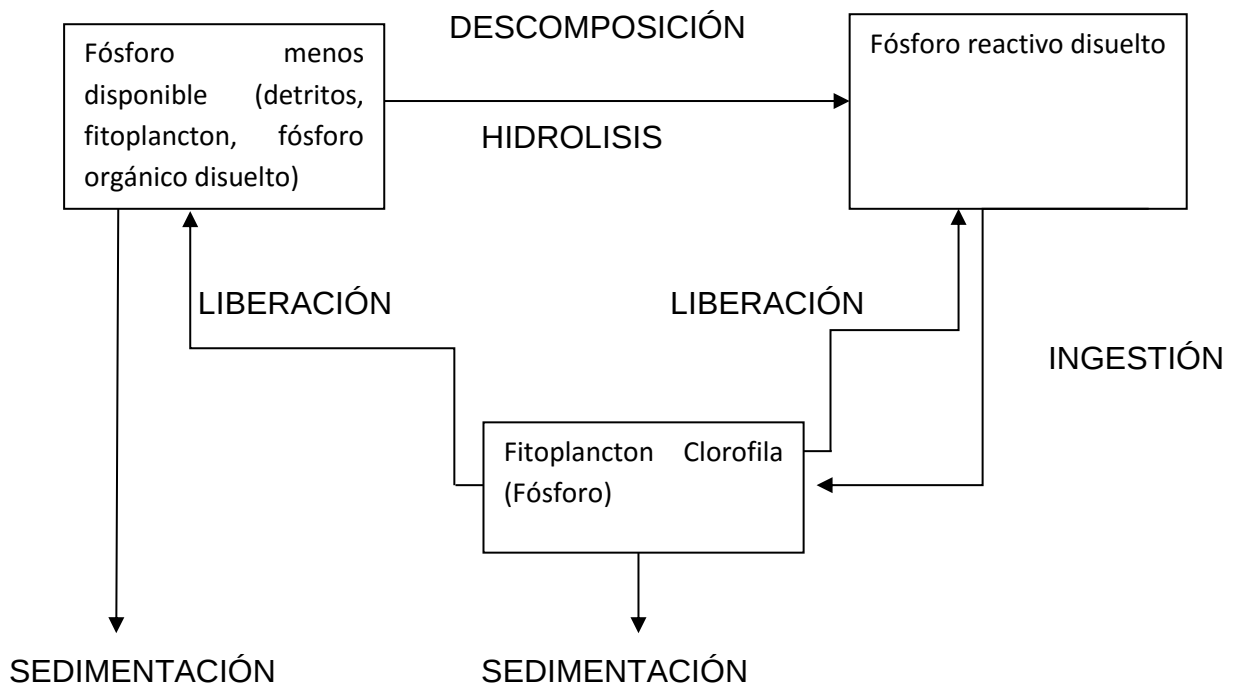


Fig. 5 Interacción simplificada entre fósforo y fitoplancton, tomado de CBE 1989

II.II.I.V.- Nitrógeno

En aguas naturales y residuales las formas de nitrógeno de mayor interés son, en orden decreciente de estado de oxidación, nitrato, nitrito, amoníaco y nitrógeno orgánico. Todas estas formas de nitrógeno, así como gas nitrógeno, son bioquímicamente interconvertibles y son componentes del ciclo del nitrógeno. Ellos son de interés por muchas razones. El nitrógeno orgánico se define funcionalmente como nitrógeno ligado orgánicamente en estado de oxidación -3. La cual no incluye todos los compuestos orgánicos de nitrógeno. Analíticamente, el nitrógeno orgánico y amoniacal pueden ser determinados juntos y se han denominado como nitrógeno Kjeldhal un término que refleja la técnica utilizada en su determinación. El nitrógeno orgánico incluye componentes naturales como proteínas y péptidos, ácidos nucleicos y urea, y numerosos compuestos orgánicos sintéticos. Las concentraciones típicas de nitrógeno orgánico varían en unos pocos cientos de microgramos por litro de nitrógeno en algunos lagos y a más de 20 miligramos por litro en aguas residuales. El nitrógeno total oxidado es la suma de nitrato y nitrito expresado como nitrógeno. El

nitrate se produce generalmente en cantidades traza en el agua superficial, pero puede alcanzar niveles altos en aguas subterráneas. El nitrato contribuye a la enfermedad conocida como metahemoglobinemia en lactantes. Un límite de 10 miligramos por litro de nitrato expresado como nitrógeno se ha regulado en el agua potable para evitar este trastorno. El nitrato sólo se encuentra en pequeñas cantidades en las aguas residuales domésticas, en efluentes de plantas de tratamientos de nitrificantes biológicos se pueden encontrar concentraciones de hasta 30 miligramos por litro. Es un nutriente esencial para muchos organismos fotosintéticos autótrofos y en algunos casos se ha identificado como el nutriente limitante en el crecimiento de estos (SMWW, 2005).

El nitrito es el estado de oxidación intermedio del nitrógeno, en la oxidación del amonio a nitrato y en la reducción del nitrato. Tal oxidación y reducción puede ocurrir en plantas de tratamientos de aguas residuales, redes de distribución y aguas naturales. El nitrito puede entrar en los sistemas de suministro de agua a través de su uso como inhibidor de la corrosión en agua de procesos industriales. El nitrito es el actual agente etiológico de la metahemoglobinemia. El ácido nitroso, el cual es formado desde el nitrito en una solución ácida, puede reaccionar con aminas secundarias ($RR'NH$) para formar nitrosaminas ($RR'N-NO$), las cuales son conocidas principalmente por ser carcinógenas. La significancia toxicológica de las reacciones de nitrógeno en ambientes naturales es objeto en la actualidad de preocupaciones y de numerosas investigaciones.

El amonio se encuentra naturalmente en aguas naturales y aguas residuales. Las concentraciones usualmente son bajas en aguas subterráneas debido a la adsorción en partículas del suelo y arcillas y no son lixiviadas fácilmente desde el suelo. Es producida ampliamente por la deaminación de nitrógeno orgánico producido por los compuestos contenidos al ocurrir la hidrólisis de la urea. En algunas plantas de tratamiento el amonio se agrega para reaccionar con el cloro para formar cloro residual. Las concentraciones de amonio que son encontradas en el agua varían desde menos de 10 microgramos por litro en algunas aguas superficiales y mayores a 30 miligramos por litro en aguas subterráneas (SMWW, 2005).

II.II.I.VI.- Subproductos de desinfección nitrogenados en el agua potable.

Las investigaciones de los subproductos de la desinfección, fue un resultado no intencional del tratamiento del agua. Fue a mediados de la década de los 70`, cuando se vinculó la formación de trihalometanos (THM) a las reacciones del cloro con la materia orgánica natural en el agua potable de Holanda (Rook, 1974). Al terminar la década de los 70´; los trihalometanos estaban regulados en los EEUU, en 100 µg/L debido al riesgo de cáncer, un segundo grupo de subproductos de desinfección, los ácidos haloacéticos, habían sido identificados en el agua potable en niveles comparables a los trihalometanos. Poco después los haloacetónitrilos, un importante grupo de los subproductos de desinfección nitrogenados fueron detectados en aguas naturales cloradas (Oliver, B.G., 1983). Un alto riesgo de cáncer en la vejiga viene asociado a la exposición de subproductos de desinfección (Villanueva, C.M., y col., 2007), aunque la contribución de diversos subproductos de desinfección en esta relación (cáncer de vejiga- subproductos de desinfección) sigue siendo incierta, dado que no se identifica los subproductos de desinfección por cloración, se cree que son ciertos los asociados al cáncer de vejiga.

Más de 600 subproductos de desinfección se han reportado en el agua potable y en pruebas simuladas de desinfección en laboratorios, resultantes de la utilización de cloro y otros desinfectantes, especialmente las cloraminas, el ozono y dióxido de cloro (Krasner, S.W., y col 2006). Sin embargo, los datos para gran proporción de subproductos de desinfección nitrogenados siguen siendo relativamente limitados.

Algunos factores han sido foco de intereses en los subproductos de desinfección nitrogenados. Primeramente, los más importantes subproductos de desinfección nitrogenados son percibidos de alto riesgo para la salud en comparación a los subproductos de desinfección regulados. La comparación de la data de pruebas *in vitro* de células mamarias demuestran que los haloacetónitrilos, halonitrometanos y haloacetamidas son más citotóxicas y genotóxicas que los subproductos de desinfección como los trihalometanos y ácidos haloacéticos. Adicionalmente los haloacetaldehídos presentan alta citotoxicidad y genotoxicidad (Plewa and Wagner, 2009). En segundo lugar, los servicios de agua potable públicos están migrando cada vez más de los tratamientos por cloración a desinfectantes alternativos,

particularmente las cloraminas, a fin de limitar la formación de trihalometanos y ácidos haloacéticos (Seidely col., 2005). El tipo de desinfectante es un factor clave en la formación de subproductos de desinfección nitrogenados, ya que dependiendo del compuesto y condiciones de reacción, estos compuestos nitrogenados se pueden obtener desde precursores orgánicos, por ejemplo del nitrógeno orgánico disuelto o en el caso de la cloraminación desde el desinfectante. Por último, el impacto de la actividad humana sobre las fuentes de agua potable cada vez se incrementa repercutiendo en la formación de aguas residuales y actividad algal.

De los componentes del nitrógeno orgánico disuelto, es conocido que los aminoácidos son precursores de los haloacetonitrilos, haloacetamidas y haluros cianógenos, mientras que las aminas precursoras del nitrosodimetilamina son en gran medida producidas por actividad antropogénica, en contraste a los trihalometanos y ácidos haloacéticos, donde la materia orgánica natural, por lo general proviene de origen terrestre.

A continuación son presentados los distintos subproductos de desinfección nitrogenados.

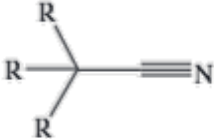
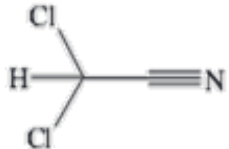
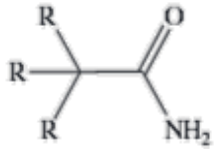
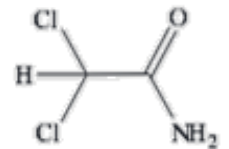
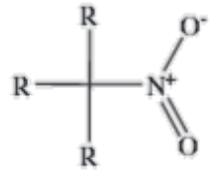
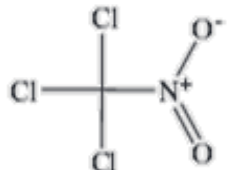
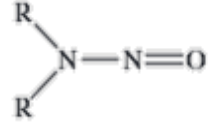
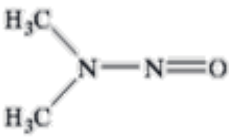
Grupo/Fórmula	Estructura	Especie importante	Estructura
Haloacetnitrilos		Dicloroacetnitrilo	
Haloacetamidas		Dicloroacetamida	
Haluros cianógenos	$R-C\equiv N$	Cloruro Cianógeno	$Cl-C\equiv N$
Halonitrometanos		Tricloronitrometano	
Nitrosaminas		N-Nitrosodimetilamina	

Fig.Nº 6 "R" es usualmente Cl, Br, I, H o un grupo alquil, aunque también puede ser una cadena alifática o grupo aromático

Figura Nº6 Grupo/formula y estructuras de los más importantes subproductos de desinfección nitrogenados. Modificado de Bond, y col. ,2012.

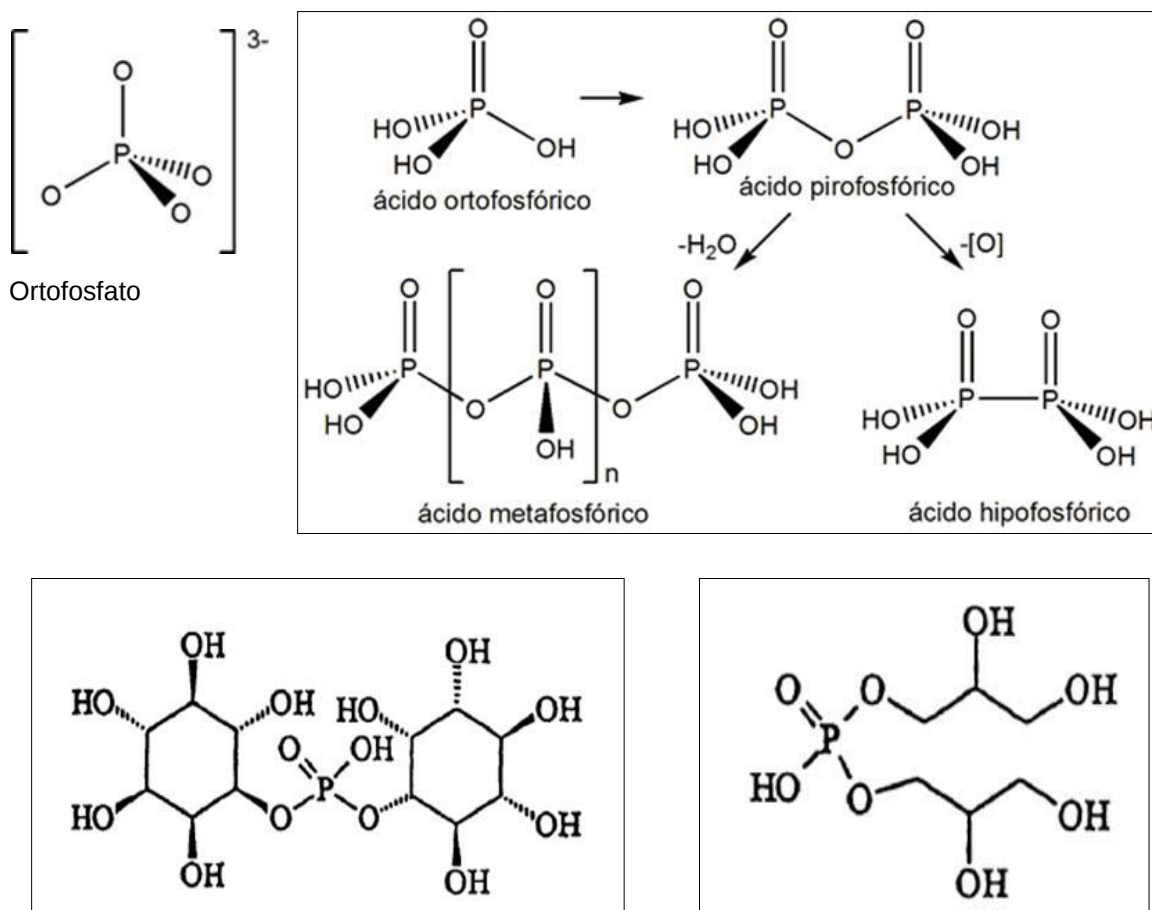
II.II.I.VII.-Fuentes precursoras y vías de formación

Las especies de nitrógeno orgánico disuelto tales como aminoácidos, proteínas, amino azúcares, amidas, nitrilos, pirroles, purinas y pirimidinas se propagan generalmente en las aguas superficiales. Ellos comprenden una fracción de materia orgánica natural en peso de 0,5 a 10% y derivan de la actividad de microorganismos, lixiviación de suelos y la influencia de la descarga de aguas residuales (Westerhoff y Mash, 2002). Las bases hidrofílicas y las fracciones coloidales de materia orgánica natural son especialmente ricas en materia nitrogenada (Leenheery col ., 2007).

Las aguas residuales y la actividad de algas están vinculadas a un aumento en los niveles de nitrógeno orgánico disuelto en el agua potable (Krasnery col ., 2006).

II.II.I.VIII.-Fósforo

El fósforo se produce en aguas naturales y en aguas residuales casi exclusivamente en su forma de fosfatos. Ellos son clasificados como: ortofosfatos, fosfatos condensados (piro-, meta-, y otros polifosfato), y fosfatos enlazados orgánicamente.



Ejemplos de fosfatos enlazados orgánicamente

Fig. N° 7 Estructuras de las principales especies de fósforo. Tomado de www.textoscientificos.com.

Estas formas de fosfatos surgen desde una variedad de fuentes, pequeñas cantidades de ortofosfatos o ciertos fosfatos condensados son vertidos a algunos suministros de agua durante el tratamiento. Existen mayores cantidades de estos mismos compuestos que pueden agregarse a cuerpos de agua cuando se utiliza el agua para el lavado o la limpieza, ya que estos compuestos son los principales constituyentes en la preparación de productos de limpieza comercial.

Los fosfatos son utilizados ampliamente en el tratamiento de aguas de caldera. Los ortofosfatos son utilizados como fertilizantes en los cultivos agrícolas y residenciales

y podrían ser dispuestos en aguas superficiales mediante procesos de escorrentía o por tormentas.

Por otra parte, los fosfatos orgánicos son formados principalmente por procesos biológicos que son aportados a las aguas residuales por desechos corporales y residuos de alimentos, y también pueden formarse a partir de ortofosfatos en procesos de tratamiento biológico o mediante la recepción de biota en el agua.

El fósforo es esencial en el crecimiento de organismos y puede ser el nutriente que limita la productividad primaria de un cuerpo de agua. En el caso donde los fosfatos son el nutriente limitante en el crecimiento de microorganismos, los vertidos de agua cruda, aguas residuales tratadas, drenajes agrícolas o ciertos desechos industriales promueven el crecimiento de microorganismos y macroorganismos fotosintéticos acuáticos en grandes cantidades.

Los fosfatos también se producen en los sedimentos de fondo y lodos biológicos, ambos precipitados en forma inorgánica y enlazados con compuestos orgánicos (SMWW,2005).

II.II.II Cianobacterias.

Las cianobacterias se encontraban entre los primeros organismos en nuestro planeta, y el oxígeno liberado a la atmósfera a través de su fotosíntesis pudo haber sido el precursor de la capa de ozono (Mur y col., 1999). Actualmente, si bien su importancia en la historia de la evolución del planeta no debe estar documentada, estos microorganismos ubicuos se asocian principalmente con aguas eutróficas. La eutrofización de las aguas a menudo se considera como la causa principal del deterioro en la calidad del agua a nivel mundial (Heisler y col., 2008).

Las cianobacterias son conocidas por su capacidad para producir compuestos (2-metilisoborneol y geosmin) causando sabores y olores desagradables en el agua potable (Falconer, 1999). Sin embargo, durante las últimas dos décadas, las prioridades de investigación se han centrado progresivamente en los metabolitos nocivos también biosintetizados por estos microorganismos. Las toxinas de las cianobacterias (cianotoxinas) incluyen hepatotoxinas que actúan sobre el hígado, las

neurotoxinas que actúan sobre el sistema nervioso y las dermatotoxinas causando irritación de la piel.

Los seres humanos estamos expuestos a cianotoxinas a través de actividades recreativas y del consumo de agua potable tratada inadecuadamente producida de fuentes contaminadas. Por lo tanto, la gestión eficiente y la protección de los recursos hídricos de floraciones cianobacteriales perjudiciales son de importancia fundamental para proteger la salud humana.

II.II.II.I Floraciones de cianobacterias

No existe una definición o cuantificación internacional de floración de cianobacterias, sin embargo, este fenómeno es generalmente considerado como una producción significativa de la biomasa en un periodo corto de tiempo correlacionado con una disminución de la diversidad de fitoplancton. De hecho, las floraciones de cianotoxinas son a menudo mono específicas y pueden formar una densa capa de células en la superficie del agua visiblemente apreciables. La formación de las floraciones de cianobacterias se controla por factores ambientales, y las degradaciones humanas son aún más condicionadas por la capacidad de las cepas individuales para llevar a cabo la biosíntesis de cianotoxinas posterior a la exposición de estos dañinos metabolitos (Merel y col., 2013).

II.II.II.II Monitoreo de floraciones de cianobacterias

Un enfoque común para monitorear las floraciones de cianobacterias es medir la clorofila a (Cl a), el pigmento fotosintético primario contenido en microorganismos fotótrofos. La clorofila a se puede medir ya sea en el campo utilizando sensores *in situ* o las muestras se pueden captar para los análisis de laboratorio. Sin embargo, las mediciones de clorofila a las cianobacterias no discriminan el alga precursora, lo que plantea una seria limitación en la interpretación de los datos.

La medición de pigmentos específicos de cianobacterias tales como ficocianina puede subsanar el problema (Brient y col., 2008; Gregory col., 2007). Adicionalmente, el análisis combinado de clorofila a y ficocianina aporta información

útil con respecto a la proporción de cianobacterias entre otras especies de fitoplancton.

Otro método común de monitoreo en floraciones de cianobacterias es la enumeración e identificación de células por microscopio. La ventaja de este método es que pueden identificarse las especies y proporción de cianobacterias. El método del microscopio brinda la mayor precisión para enumerar e identificar cianobacterias en comparación con cualquier otro método. Sin embargo, requiere tiempo y un nivel de especialización taxonómico relativamente alto. Al igual que cualquier otro método, la identificación microscópica de una especie potencialmente tóxica de cianobacterias no significa que está activa la producción de toxinas. Sin embargo, la enumeración e identificación de cianobacterias por microscopio combinada con la identificación química de las toxinas en el agua brinda una buena indicación de la especie responsable del aporte de la carga tóxica. Adicionalmente a la identificación y recuento celular, las nuevas técnicas de reacción en cadena de la polimerasa (PCR) de los genes relacionados con la síntesis de la toxina ha sido estudiada (Al-Tebrineh y col., 2010; Barón-Sola y col., 2012; Baxay col., 2010; dos Anjos y col., 2006; Hisbergues y col., 2003; Kurmayer y Kutzenberger, 2003; Ostermaier y Kurmayer, 2010).

II.II.III Origen de la toxicidad

La toxicidad de las cianobacterias está relacionada con la biosíntesis de metabolitos llamados cianotoxinas. Sin embargo, las floraciones de cianobacterias no necesariamente están asociadas con la aparición de toxinas, es decir, no todas las cepas son tóxicas (Sarazin y col., 2002). En efecto, las cianotoxinas son producidas sólo por las cepas que tienen los genes apropiados (Kurmayer y Christiansen, 2009). Inclusive las cepas tóxicas no producen las toxinas de inmediato, ya que varias de ellas parecen tener la capacidad de convertir ciertos genes o desactivarlos dependiendo de las condiciones ambientales. La identificación de cepas en la actualidad, constituye el mejor método para determinar las cianobacterias que en la floración pueden llegar a ser tóxicas.

Los factores ambientales incluyen, pero no son limitantes: intensidad de luz y tiempo de exposición, movimiento y flujo del agua, influencias alelopáticas y competencia por los recursos y el pastoreo herbívoro, las concentraciones y proporciones de nutrientes, la temperatura y salinidad del agua, la división y tasa de crecimiento celular (Kosol y col, 2009; Orr y Jones, 1998; Sevilla y col., 2008; Tonk y col., 2005). La lista de factores ambientales e interacciones parece casi tan grande como la lista de cepas capaces de producir toxinas. Parece desalentador, la información en lo que respecta a los estudios de los factores ambientales y la relación con la cepa de la toxina producida individualmente, no a nivel generalizado.

II.II.II.IV Literatura disponible

La proliferación de *Nodularias pumigena* descrito por Francis (1878) en el lago Alexandrina, Australia, es a menudo referido como el primer informe de la floración de cianobacterias tóxicas, aunque no fue identificada ninguna toxina. Desde entonces, las preocupaciones crecientes asociadas con cianobacterias y sus floraciones potencialmente tóxicas han multiplicado la publicación de estudios sobre el tema. De hecho, la cantidad anual de publicaciones sobre cianobacterias aumentaron repentinamente en 1991 y en la actualidad sigue creciendo. En diciembre de 2012, el Thompson Reuters Web de la base de datos Science recopiló 18.642 publicaciones relacionadas con cianobacterias, entre las cuales 15.350 fueron artículos de investigación y 1255 artículos en revisión. Sin embargo, la investigación sobre las cianobacterias es diferente y artículos de floraciones sólo representan el 20% de las publicaciones. De hecho, la literatura disponible sobre cianobacterias cubre más de 100 investigaciones en áreas como la ingeniería y la producción de biocombustibles. Sin embargo, la mayoría de las publicaciones permanecen en el campo de la biología del agua (22 %), la ciencia ecológica (18 %) y microbiología (16 %), mientras que la salud del público y las condiciones ambientales (0,3 %) están escasamente considerados.

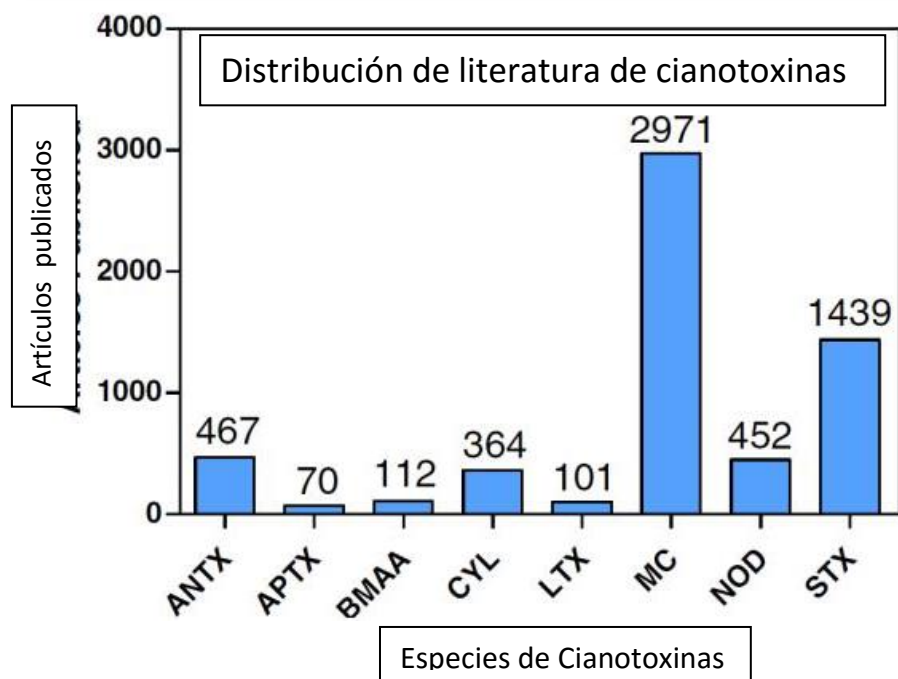
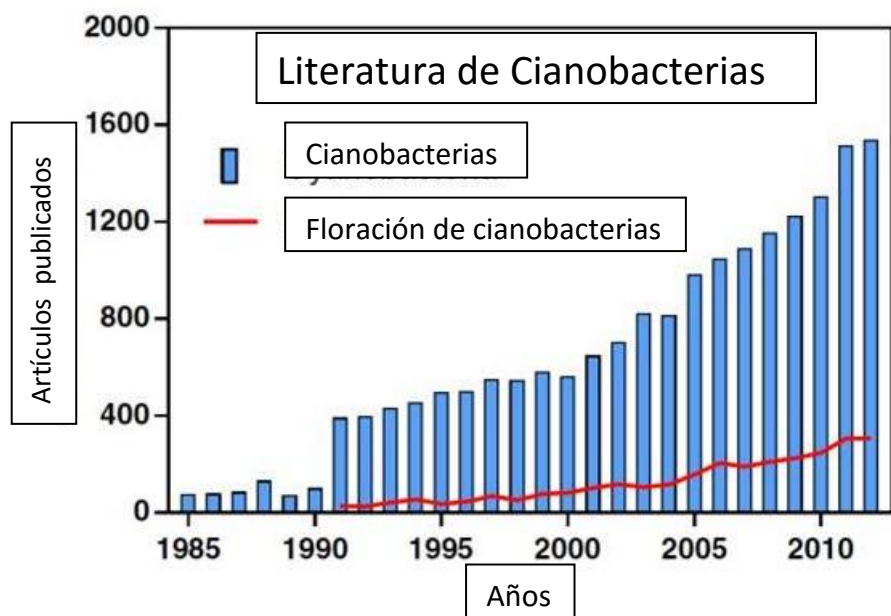


Fig. N° 8 Literatura de cianobacterias y Distribución de literatura de cianotoxinas, modificado de Merel y col. 2013.

II.II.II.V Exposición humana a las cianotoxinas

Las cianotoxinas se han asociado con numerosas intoxicaciones de animales en el mundo; pero también son una amenaza para la salud humana. Una vía de exposición es la ingestión contenido en los ingredientes de los alimentos provenientes de los crustáceos cuyas toxinas han sido previamente bioacumulados en el agua contaminada (Ibelings and Chorus, 2007; Johnson y col. 2008; Reyan y col. 2009; Saker y col, 2005). Otra vía de exposición es posible a través del contacto con la dermis y la inhalación accidental durante actividades recreativas en las aguas sometidas a una floración tóxica. La tercera vía de exposición podría ser causada por la ingestión de agua potable producida de una fuente contaminada (Byth, 1980; Griffiths y Saker, 2003). En función de la población atendida y el tipo de tratamiento antes de suministrar el agua potable al primer usuario, esta vía de exposición podría afectar a un número relativamente alto de los usuarios.

II.II.II.VI Ocurrencia y propiedades de las cianotoxinas.

La palabra cianotoxina se refiere a más de un centenar de compuestos que puede diferir fuertemente en su estructura química y propiedad toxicológica. Por lo general, se organizan en 3 clases según a su órgano: las hepatotoxinas (Microcistina, Nodularias y Cilindrospermopsina) que inducen lesiones hepáticas, las neurotoxinas (Anatoxinas, Saxitoxinas, β -N- Metilamino-L-Alanina) que alteran la transmisión neuromuscular y la dermatotoxinas (Aplisiatoxina, Lingbiatoxinas) que inducen la irritación de la piel.

Toxina	Modo de acción	Efecto principal	LD₅₀ (µg/kg)^{a,b}
MC	Inhibe la proteína fosfatasa	Insuficiencia y hemorragia hepática	25-150
NOD	Inhibe la proteína fosfatasa	Insuficiencia y hemorragia hepática	30-70
CYL	Inhibe la síntesis de proteína	Insuficiencia hepática y renal	2100
ANTX-a	Se une a los receptores de acetilcolinas nicotínicos	Parálisis muscular	375
STX	Se une a los canales de sodio	Ataxia, convulsiones y parálisis	10
BMMA	Se une a los receptores glutámicos	Síndrome neurodegenerativo	No especificado
APTX	Activa la proteína Quinasa C	Promueve tumores e irritación en la piel	No especificado
LTX	Activa la proteína Quinasa C	Promueve tumores e irritación en la piel	250

^aVan Apeldoorn y col., 2007

^bDespués de una inyección intraperitoneal en ratones

Tabla N ° 3 Características toxicológicas de las cianotoxinas

Leyenda

MC: Microcistina

NOD: Nodularias

CYL: Cilindrospermopsina

ANTX: Anatoxinas

STX: Saxitoxinas

BMMA: β -N- Metilamino-L-Alanina

APTX: Aplisiatoxina

LTX: Lingbiatoxinas

II.II.II.VII Microcistinas

Las Microcistinas (MC) forman la familia principal de cianotoxinas, son las estudiadas con mayor frecuencia. Por ejemplo, su incidencia ha sido reportada en Asia, Europa, África del Norte, América del Norte y los países escandinavos (Fristachi y Sinclair, 2008).

Las Microcistinas fueron denominadas de acuerdo con *Microcystis*, el primero de los géneros de cianobacterias asociadas con su biosíntesis. Sin embargo, *Oscillatoria*, *Nostoc*, *Anabaena* y *Anabaenopsis* también son producidas por Microcistinas (Kaebernick y Neilan, 2001) . Como se mencionó anteriormente, la síntesis de la toxina es un proceso complejo influenciada por las condiciones ambientales que depende además de las propiedades genéticas de cada cepa de cianobacterias.

Tal como se presenta en la Fig. 8, las Microcistinas son compuestos cíclicos que encierran 7 aminoácidos. Entre ellos, el aminoácido inusual Adda se asocia a menudo con la toxicidad de la molécula, debido a su conjugado dieno (Dawson, 1998). Además, X y Z se refieren generalmente como aminoácidos variables con múltiples combinaciones que hacen la diferencia entre más de 90 variantes de la toxina (Sivonen y Jones, 1999). Luego, cada variante es identificada por las iniciales de X y Z. Por ejemplo, la Microcistina común que tiene leucina (L inicial) y arginina(R inicial) debe ser identificada como MC -LR.

Las Microcistinas son moléculas solubles en agua y estables (Sivonen y Jones, 1999). Una vez absorbidas por el organismo, se concentran rápidamente en el hígado (Fischer y col ., 2000) y se unen a la proteína fosfatasa(Dawson, 1998; Gupta y col,2003;Kuiper-Goodman y col.,1999;MacKintosh y col.,1990). Dependiendo de la

dosis y el peso corporal, la inhibición de la proteína fosfatasa puede conducir sucesivamente a la acumulación de proteínas fosforiladas en el hígado, necrosis celular, masiva hemorragia y la muerte. Las Microcistinas también son promotoras de tumores (Falconer,1991; Nishiwaki-Matsushima y col.,1992).

Cianotoxinas hepatotóxicas

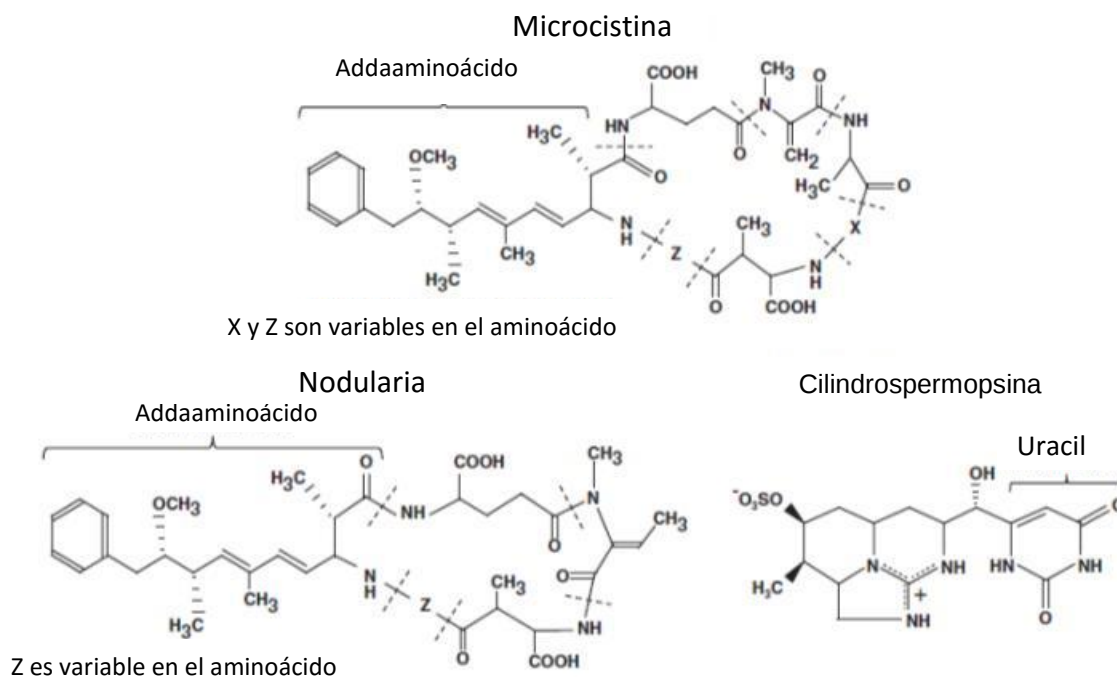


Fig. N° 9 Estructura de cianotoxinas

II.II.II.VIII Tratamiento de cianobacterias en el agua potable.

El tratamiento del agua potable debe ser capaz de proteger a los consumidores de la exposición a cianotoxinas. En consecuencia, el tratamiento de agua potable debe eliminar cianobacterias sin comprometer la integridad de la célula con el fin de degradar las toxinas intracelulares, pero también debe eliminar toxinas extracelulares contenidas en el agua cruda.

Beber agua de plantas de tratamiento de agua potable por lo general incluye una serie de procesos fundamentales y opcionales. La sucesión de estos procesos difiere radicalmente de acuerdo con la calidad del agua, además del país y de la región de donde proviene el recurso hídrico.

Por ejemplo, el tratamiento básico para un agua de calidad óptima consistiría en una filtración, seguida de una clarificación para eliminar la materia orgánica natural (MON) y por último la desinfección para desactivar los agentes patógenos. La disminución de la calidad del agua requiere de tratamientos adicionales para cumplir con los estándares de calidad del agua potable.

Los procesos de tratamiento de agua se dividen generalmente en dos categorías: 1.- Los basados en la retención de los contaminantes (clarificación, adsorción, filtración).

2.- Los basados en la degradación de los contaminantes (UV irradiación, ozonización, cloración).

Los tratamientos en base a la retención generalmente requieren la aplicación regular de un procedimiento de limpieza (retro lavado para limitar la acumulación de partículas), así como la sustitución de pseudo consumibles (carbón activado y membranas), los tratamientos basados en degradación pueden conducir a la formación de conocidos y dañinos subproductos denominados trihalometanos (THM).

II.II.II.IX.- Impactos de pre tratamientos en cianobacterias y cianotoxinas.

La entrada del agua cruda en una planta de tratamiento es inicialmente filtrada y pre oxidada, ambas medidas son conocidas a menudo como pre tratamientos.

El objetivo de la filtración es retener macro-contaminantes (hojas, bolsas de plástico) que podrían dañar las instalaciones en la planta de tratamiento ó interferir en los procesos posteriores. Sin embargo, estos procesos no afectan en gran medida a los micro contaminantes tales como las cianobacterias y sus toxinas.

El otro proceso de pre-oxidación utilizando cloro y/o ozono tiene como objetivo, mejorar la eficiencia de tratamiento en los tratamientos aguas abajo, sin embargo también afecta las membranas de las cianobacterias (Miao H, Tao W, 2009). La pre-oxidación induce la lisis celular y la liberación de toxinas intracelulares. Además la alta demanda de cloro y ozono por la alta concentración del carbono orgánico disuelto (COD) en este pre tratamiento probablemente evite la oxidación de las toxinas. En consecuencia la pre oxidación está siendo menos frecuentemente utilizada por la formación de sub productos de desinfección, y además por fuentes de agua en donde existen floraciones excesivas de cianobacterias.

II.II.II.IX Impactos de tratamientos de retención en cianobacterias y cianotoxinas.

Coagulación, Floculación y Sedimentación.

El primer paso en el tratamiento convencional del agua potable es la coagulación-floculación-sedimentación, la cual tiene como objetivo principal eliminar el material coloidal (partículas suspendidas cargadas negativamente) con el fin de disminuir la turbiedad. La adición de sales de hierro o aluminio neutraliza las cargas negativas de los coloides y evita la repulsión electrostática entre las partículas.

En consecuencia, los coloides tienden a aglomerarse y formar partículas más grandes (flóculos) retirados posteriormente por sedimentación.

Las cianobacterias son organismos microscópicos con cargas negativas en sus membranas que se pueden considerar más o menos como coloides y eliminados por coagulación-floculación-sedimentación.

Por ejemplo, se logró hasta un 90% de eliminación en Microcistina (Hall y col., 2000) agregando una dosis de coagulante que tiene que ser incrementado de acuerdo a la concentración de cianobacterias y materia orgánica en el agua cruda (Briley y Knappe, 2002; Velzeboery col., 1995).

De hecho, la mayor concentración de cianobacterias con cargas negativas lograron ser neutralizadas. Además, las cargas negativas en las membranas de las cianobacterias aumentan con la producción de polisacáridos durante el crecimiento exponencial. En consecuencia, la eliminación de las cianobacterias también depende de la edad de las células (Konno, 1993; Pieterse y Cloot, 1997).

Aunque la coagulación-floculación-sedimentación es capaz de eliminar cianobacterias, ciertas especies contienen vacuolas de gas que pueden perturbar la sedimentación mientras se conforman la formación de flóculos (Pieterse y Cloot, 1997).

Por otra parte, algunos estudios demostraron que la flotación por aire disuelto (DAF) también podría eliminar eficazmente las cianobacterias en lugar de la sedimentación (Teixeira y Rosa, 2006a; Teixeira y col., 2010).

En este caso, el aire inyectado en la parte inferior del reactor transporta las células a la superficie en donde pueden ser removidos por remoción.

Algunos estudios han concluido que la sedimentación y la flotación por aire disuelto eliminan eficientemente las toxinas intracelulares, adicionalmente pueden degradar las cianobacterias sin daños a la membrana celular o la liberación de toxinas la cual también puede ocurrir. Sin embargo, investigaciones demuestran que hasta el lodo resultante de este proceso producto del 90% de las cianobacterias pueden liberar sus toxinas en 24 horas (Drikas y col.,2001).Por lo tanto, los lodos deben ser extraídos de forma rápida con el fin de evitar cualquier contaminación de regreso al agua por las toxinas que se difunden a la fase acuosa.

En la coagulación- floculación- sedimentación y la flotación por aire disuelto, no se espera que eliminen toxinas extracelulares ya que ambos están diseñados para separar partículas. Esta afirmación fue demostrada por estudios que no muestran diferencia alguna en las concentraciones de Microcistinas extracelulares después del tratamiento. No se tiene registro en otras investigaciones del impacto de estos tratamientos en otras cianotoxinas.

II.II.II.X.-Filtración a través de arenas

Se ha demostrado que la filtración lenta en arena es eficiente para degradar las cianobacterias y sus toxinas durante el tratamiento del agua (Grützmacher y col., 2002). Por ejemplo, la eliminación de 85% a 99% de Microcistina podría lograrse al filtrar agua que contiene *Agardhii Planktotrix* pero la tasa de eliminación disminuye drásticamente a bajas temperaturas del agua.

Mientras que el proceso principal para la eliminación de Microcistina de una población de cianobacterias era la filtración física de las toxinas intracelulares (Grützmacher y col.,2002), también se demostró que las toxinas extracelulares podrían ser biodegradadas (Bourne y col., 2006; Ho y col., 2006a, 2007).

En efecto, la capa superior de los filtros de arena permite el crecimiento de microorganismos. Adicionalmente, algunas bacterias provenientes del agua cruda podrían degradar eficientemente las Microcistinas, pero puede ser necesario un período de latencia con aislamiento de microorganismos capaces de asimilar Microcistina (Ho y col.,2007, 2012a, 2012b).

La biodegradación ofrece una alternativa prometedora para la eliminación de cianotoxinas en tratamientos de agua potable. Sin embargo, los microorganismos que degradan las toxinas pueden ser incapaces de crecer en cada filtro de arena de cada planta de tratamiento de agua potable, no se han registrado aún la biodegradación de cianotoxinas distintas a las Microcistinas. Por consiguiente, la biodegradación de cianotoxinas en filtros de arena lentos no debe ser considerada aún como un tratamiento remedial por sí mismo, sino como un eslabón de la cadena de un multi-enfoque.

II.II.II.XI.-Filtración por membrana

El término filtración por membrana abarca varios procesos caracterizados por el tamaño de poro de la membrana asociada: microfiltración (0,1-10 micras), ultrafiltración (1-100 nm), nanofiltración (alrededor de 1 nm) y ósmosis inversa (0,1 nm). Estas técnicas de retención han recibido considerable atención por su potencial para eliminar microorganismos contaminantes en tratamiento de agua potable. Por ejemplo, de acuerdo con la membrana empleada, los procesos de filtración de membrana pueden eliminar eficientemente las cianobacterias y sus toxinas.

Los procesos de microfiltración y de ultrafiltración son particularmente eficientes para eliminar cianobacterias y toxinas intracelulares. Por ejemplo, ambos tipos de membranas se ha demostrado que logran la eliminación del 98% de Microcistina aeruginosa, una cianobacteria tóxica detectada con frecuencia en el agua potable (Chow y col., 1997).

Aunque la obstrucción y el rompimiento celular son las principales preocupaciones en cualquier técnica de filtración, se demostró que el daño en las membranas celulares era inexistente o limitado durante la microfiltración y la ultrafiltración, lo que impide el aumento de toxinas extracelulares en el permeado.

Por el contrario, las toxinas extracelulares no se espera que puedan ser eliminadas por membranas de microfiltración a causa del tamaño de poro. Del mismo modo, a pesar de que se presentan las membranas de ultrafiltración para eliminar Microcistinas extracelulares (Lee y Walker, 2008), pueden ser incapaces

de retener toxinas más pequeñas. Por otra parte, ambos tipos de técnicas de filtración se pueden aplicar para eliminar las toxinas extracelulares previamente adsorbido sobre carbón activado en polvo (Campinas y Rosa, 2010a; Dixon y col., 2011a).

Teóricamente, las cianobacterias deben ser removidas de manera eficiente por nanofiltración y ósmosis inversa (tamaño de poro menor en comparación con ultrafiltración), pero las células se supone que ya sean removidas por las técnicas mencionadas anteriormente.

De hecho, las cianobacterias son eliminadas por los tratamientos anteriores con el fin de evitar la obstrucción inmediata de estas membranas. Sin embargo, tanto nanofiltración y ósmosis inversa son particularmente eficientes para la retención de toxinas extracelulares. Por ejemplo, eliminación de más del 95% se pudo observar para MC-LR (Microcistina con leucina y arginina) y ANTX-A (anatoxinas) (Teixeira y Rosa, 2006b), mientras que 90 a 100% de eliminación podrían ser observado para CYL (Cilindrospermopsina) (Dixon y col ., 2010, 2011b). Además, por ósmosis inversa también se demostró la eliminación de NODs (Nodularias) (Vuori y col ., 1997) pero no hay datos publicados sobre STXS (Saxitoxinas), ANTX-a (s) (Anatoxinas S), BMAA(β -N- Metilamino-L-Alanina), APTX(Aplisiatoxina) o LBTX (Lingbiatoxinas).

Aunque la filtración de membrana parece ser una opción prometedora para eliminar tanto las cianobacterias y cianotoxinas durante el tratamiento del agua potable, la nanofiltración y ósmosis inversa son técnicas muy complejas y costosas. Su alto potencial de retención a menudo implica la posterior re-mineralización del agua tratada. Además, el costo asociado con la energía requerida por tales procesos hace inasequible para las unidades de tratamiento de agua potable.

II.II.II.XII.-Carbón activado

En el tratamiento de agua potable, el carbón activado se emplea en dos formas: en polvo (CAP) para llevar a cabo de forma simultánea con la adsorción en la clarificación y el granulado (GAC) para llevar a cabo la adsorción en unidades de percolación. Mientras que el carbón activado no tiene ningún impacto en

cianobacterias y toxinas intracelulares, se puede aplicar con éxito para eliminar Microcistinas extracelulares, CYL (Cilindrospermopsina), ANTX-a (s) (Anatoxinas S) y STXS (Saxitoxinas).

La eliminación de cianotoxinas depende principalmente del tipo de adsorbente empleado (Donati y col., 1994; Huang y col., 2007; Newcombe y Nicholson, 2004). De hecho, cuando se estudia la adsorción de Microcistina-LR con 8 carbones activados, son adsorbidos con el mayor volumen de mesoporos (diámetro de poro en el intervalo de 2-50 nm), se demostró que resultó la más eficiente (Donati y col., 1994). Sin embargo, otras cianotoxinas pueden requerir otros carbones activados. Por ejemplo, ya que son más pequeñas las STXS (Saxitoxinas) que las Microcistinas, utilizaron carbones activados microporosos recomendado para su eliminación en lugar de carbones activados mesoporosos (Newcombe y Nicholson, 2004).

II.II.II.XIII.-Impactos del tratamiento basado en la degradación de cianobacterias y cianotoxinas.

Clorinación y cloraminación

La cloración se utiliza con frecuencia para llevar a cabo la desinfección del agua potable. El cloro se prefiere a menudo con respecto al ozono o radiación UV ya que es persistente y puede prevenir la contaminación del agua potable por patógenos en la red de distribución. Del mismo modo, en el tratamiento de aguas, el cloro también puede ser reemplazado por cloraminas o dióxido de cloro. Sin embargo, el cloro y sus sustitutos son también oxidantes que pueden reaccionar con los contaminantes del agua.

Una investigación reciente sobre la cloración de cianotoxinas indica que Microcistinas, Cilindrospermopsina y Saxitoxinas se transforman rápidamente, pero la cinética de Anatoxinas era demasiado lenta para ser alterada durante el tratamiento de agua potable (Merel y col., 2010a).

Aunque las Microcistinas son altamente reactivas con cloro, la alteración de estas toxinas disminuye cuando el pH y el Carbono Orgánico Disuelto (COD) aumentan.

De hecho, el aumento de pH transformará progresivamente cloro en dióxido de cloro ClO_2 (un oxidante más débil que prevalece en el pH por encima de 8), mientras que el COD competirá con la toxina.

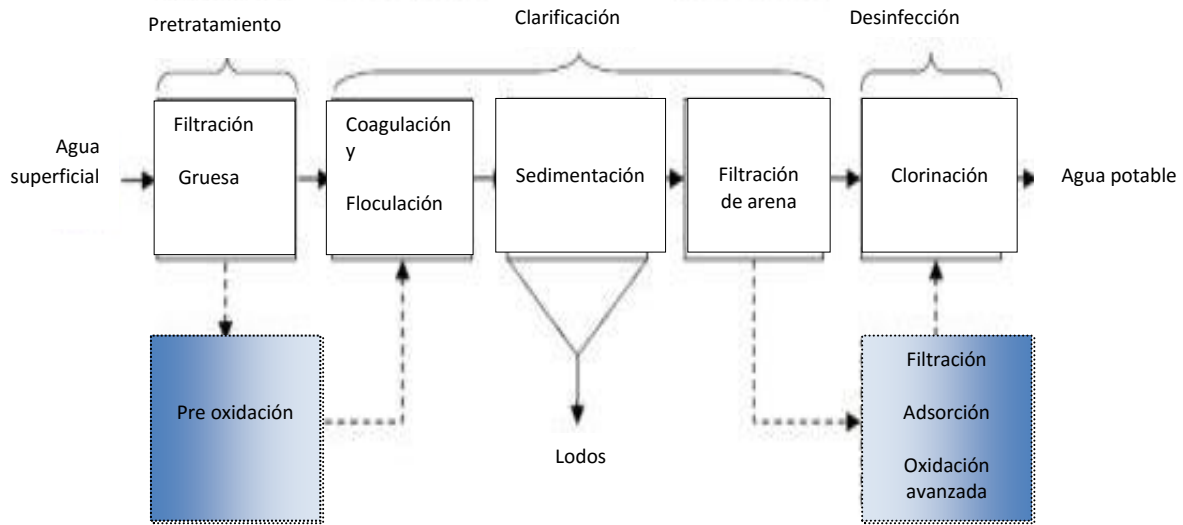
En general se considera que las Microcistinas son transformadas de manera eficiente cuando el pH se mantiene por debajo de 8 y la dosis de cloro es suficiente para asegurar 0,5 mg/l del cloro residual después de 30 min (Acero et al., 2005; Newcombe y Nicholson, 2004; Nicholson y col., 1994). Por ejemplo, con el cloro en exceso en 20 veces a pH 7, más de 99% de Microcistina-LR en agua de alta pureza puede ser transformada en 5 minutos (Merel y col., 2009). Una eficacia similar también es esperada en plantas de tratamiento de agua ya que en el peor escenario (alta concentración de la toxina con cloro residual, 20 g/l y 0,5 mg/l respectivamente) el cloro tendría que ser por lo menos 350 veces superior en comparación con Microcistinas (Merel y col., 2009).

Adicionalmente, la cloración de Microcistinas conduce a la formación de numerosos subproductos a través de múltiples procesos de hidroxilación o sustitución de cloro sobre la toxina inicial, incluyendo en el aminoácido Adda (Merel y col., 2009; Tsuiji y col., 1997). Sin embargo, varios estudios basados en bioensayos han reportado una disminución de la toxicidad después de la cloración (Merel y col., 2010a; Nicholson y col., 1994; Rodríguez y col., 2008; Tsuiji y col., 1997).

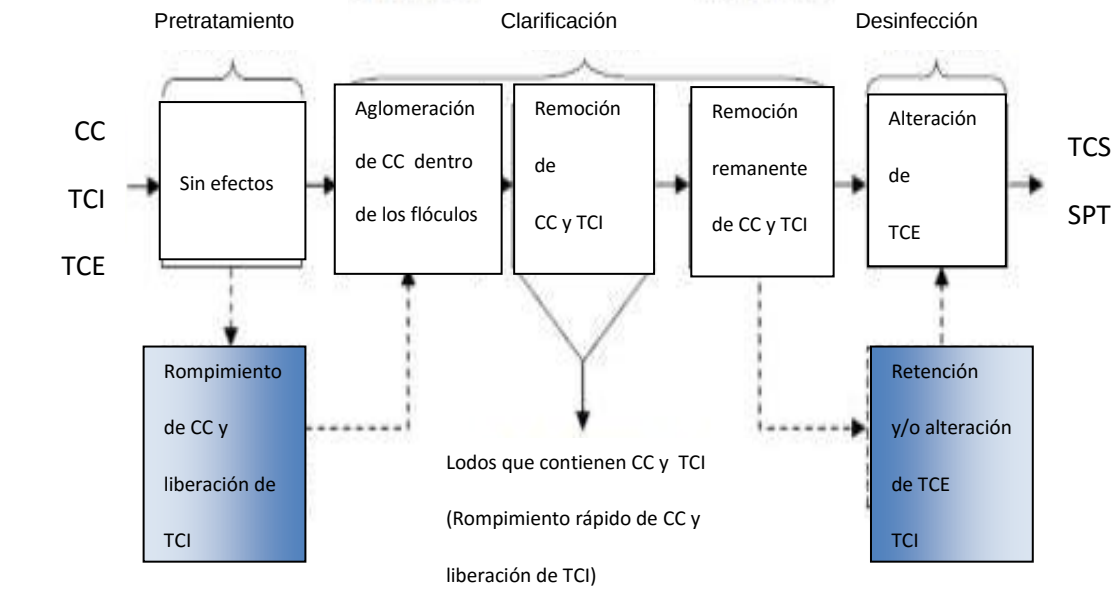
El uso de dióxido de cloro y monocloramias para eliminar cianotoxinas no se ha estudiado ampliamente. De hecho, el dióxido de cloro también transforma de manera eficiente la Microcistina-LR y disminuye la toxicidad pero su eficiencia con otras cianotoxinas es limitada o desconocida. Por ejemplo, la Cilindrospermopsina tiene una vida media de 14,4 horas cuando se expone a dióxido de cloro, pero 1,7 minutos de vida media cuando se expone al cloro (Rodríguez y col., 2007a). Del mismo modo, la monocloramina es un oxidante débil y reacciona lentamente con cianotoxinas. De hecho, las monocloramias reaccionan con Cilindrospermopsina (Banquero y col., 2001), la constante cinética es 2400 veces menor que con cloro en condiciones similares (Merel y col., 2010a; Rodríguez y col., 2007b).

En consecuencia, se considera que la cloraminación es inapropiada para eliminar metabolitos nocivos de las cianobacterias durante el tratamiento de agua potable.

Visión general del tratamiento del agua potable



Impacto global de cianobacterias y sus toxinas



Leyenda

→ → Procesos fundamentales

→ → Procesos opcionales

CC: Células cianobacteriales

TCI: Toxinas cianobacteriales intracelulares

TCE: Toxinas cianobacteriales extracelulares

TCS: Toxinas cianobacteriales estables

SBT: Sub productos de toxinas

Fig. Nº 10 Visión general del tratamiento del agua potable e impacto global de cianobacterias y toxinas

II.II.III Arrastre de aire y aireación.

El efecto beneficioso de implementar el aire para que entre en contacto con el agua ha sido reconocido desde la época de los acueductos romanos, cuando los bordes de éstos fueron intencionalmente rugosos para incrementar la turbulencia y aumentar la purificación por efecto del aire. Como proceso unitario para el tratamiento del agua, la aireación ha sido utilizada para mejorar el agradable sabor del agua ó para mejorar los aspectos económicos del tratamiento del agua. Las aplicaciones históricas de la aireación incluye la remoción de sulfuro de hidrógeno, el cual causa olor y sabor ó la remoción de dióxido de carbono que puede reducir la demanda de cal en el tratamiento de ablandamiento con cal. Recientemente la aireación ha sido utilizada para remover compuestos orgánicos volátiles del agua. Estos compuestos causan efectos adversos en la salud humana.

En muchas aplicaciones de plantas de tratamiento de agua, el aire es utilizado para remover sustancias por procesos como desorción o arrastre. Otra utilización de la aireación es la transferencia de una sustancia dentro del agua a la fase gaseosa en un proceso denominada Absorción del gas. Un ejemplo de la utilización de la aireación es inyectar oxígeno para oxidar el hierro ó el manganeso ó la adición de ozono al agua para la oxidación.

El proceso general de aireación puede ser definido como el proceso de disponer el agua en contacto con el aire a fin de acelerar la transferencia de un gas entre las dos fases (líquido-gas).

El término gas es utilizado para referirse a aquellas sustancias que técnicamente son gases en condiciones estándar de temperatura y presión, también aquellas sustancias que son técnicamente líquidos volátiles. En cualquier caso, la transferencia en sí misma es la forma gaseosa del compuesto.

El desarrollo de sistemas para llevar a cabo la transferencia de gas, el costo total de la transferencia que es posible y la velocidad a la que se logra la transferencia son la preocupación fundamental. Para que la transferencia tenga lugar, un gradiente de concentración debe existir entre la fase líquida y el aire. Este gradiente de concentración del sistema de las dos fases es indicativo del equilibrio que existe

entre el aire y el agua, si se establece el equilibrio, entonces no existe ningún gradiente y por lo tanto la transferencia neta no tendrá lugar.

Por lo tanto, es necesario considerar tanto la tasa de transferencia y el fenómeno de equilibrio, con el fin de describir la transferencia de gas (WQT, 1990).

II.II.IV Análisis costo - beneficio.

El sistema alternativo de tratabilidad con el que se aspira reemplazar el sistema convencional de tratamiento del agua potable, requirió de un estudio de rentabilidad, el cual es un indicador que determina cuanto beneficia o perjudica, el tomar una decisión de inversión, mediante la comparación de los costos y los beneficios. Esta investigación en este caso, no está motivada por la riqueza expresada en términos monetarios, sino por los efectos que pueden tener sobre el bienestar de las personas.

La evaluación social de un proyecto desde el ámbito público se diferencia de la evaluación de un proyecto generada en una empresa privada, en que se valoran las externalidades tanto positivas como negativas que ocasionará a la comunidad.

Si el efecto es provocado por producir un bien o servicio, se le denomina externalidad en la producción u oferta. Si el efecto es provocado por el uso o consumo de un bien o servicio, corresponde a una externalidad en el consumo o la demanda.

Adicionalmente a las externalidades, desde el ámbito público, se evalúan los efectos indirectos que son las afectaciones que se producen en los mercados de insumos para la producción del bien que se producirá con el proyecto o en los mercados de bienes complementarios o sustitutos del mismo. Por otra parte, los efectos intangibles que son aquellos beneficios y/o costos que son muy difíciles de medir e incluso, en ocasiones, de identificar.

Una vez presentados estos conceptos llegamos a una de las herramientas para la evaluación económica, el análisis costo-beneficio, el cual representa el marco para evaluar si en un momento determinado en el tiempo, el costo de una medida específica es mayor que los beneficios derivados de la misma.

Las etapas para ejecutar el análisis costo –beneficio se explican a continuación.

- Identificación de todas las actividades que se tiene previsto ejecutar en el marco del proyecto.
- Identificación de todas las consecuencias predecibles de cada actividad.
- Asignación de valores a cada consecuencia
- Reducción de todos estos valores sociales (positivos y negativos) a un común denominador, normalmente económico.
- Suma de todos los valores (positivos y negativos) para obtener un valor neto.

Dentro de los criterios de decisión del análisis costo-beneficio, tenemos el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR)

La fórmula para calcular el VAN; es presentada a continuación:

$$VAN = I_0 + \sum_{t=0}^n (B_t - C_t) * \frac{1}{(1+r)^t}$$

Donde: Bt: Beneficios del período t

Ct: Costos del período t

ri: Tasa de descuento

Io: Inversión inicial

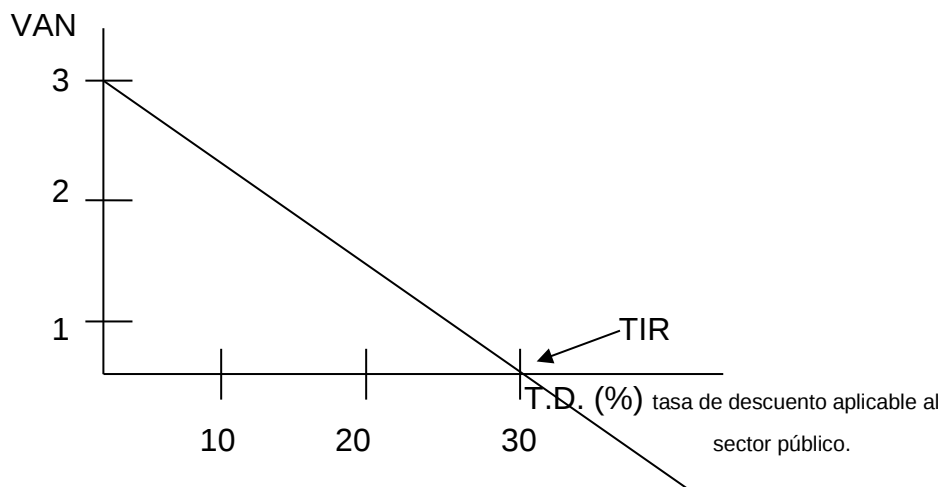
n: vida útil del proyecto

VAN > 0 se recomienda pasar a la próxima etapa del proyecto

VAN = 0 es indiferente realizar la inversión

VAN < 0 se recomienda desecharlo o postergarlo.

Por otra parte la Tasa Interna de Retorno (TIR) la cual es una tasa porcentual que indica la rentabilidad promedio anual que genera el capital que permanece invertido en el proyecto. También se define como la tasa de descuento que hace que el VAN = 0.



TIR > Costo oportunidad se recomienda pasar a la siguiente etapa

TIR = CO es indiferente invertir

TIR < se recomienda su rechazo o postergación

Gráfica N° 13 Tasa interna de retorno (Maya, 2009)

II.III Contexto referencial

II.III.I Reseña histórica

Para el año 1573 el río Catuche era la fuente principal de abastecimiento del primer Acueducto con que contó Caracas. En la esquina Caja de Agua, se recogían las aguas en un estanque, y de allí se repartía a la población por las acequias, partiendo de Caja de Agua y Luneta llegaban a las esquinas de Reducto a Miracielos. En el año 1600 la distribución del agua en Caracas, se hacía por medio de tubos de barro cocidos, unidos con morteros de cal. Las fuentes seguían siendo los ríos que se originaban en el Ávila.

Para 1874 se inaugura bajo el gobierno de Antonio Guzmán Blanco, el primer Acueducto que comenzaba a traer agua desde el Río Macarao, y estaba hecho con un canal de tierra de 46 km de largo. El caudal se estimaba en unos 400 litros por segundos, aunque por las irregularidades del terreno se estima que llegaban al calvario unos 50 litros por segundo.

Después de 17 años, en 1891, se promulga una Ordenanza Municipal en la cual se fija una cuota anual de 100 bolívars por concepto de servicio de agua, 4 años más tarde, en 1895, la operación del servicio de agua es asumida por el Estado después de haber dado en concesión en la Compañía General de las Aguas de Caracas, con sede en Bruselas / Bélgica.

La fuerte sequía de 1940-41 obliga al gobierno a designar una comisión para estudiar el problema del agua, cuyo informe fue alarmante ya que se concluyó en que los sistemas de dotación eran insuficientes e irregulares. Se crea por decreto, - ley del ejecutivo el Instituto Nacional de Obras Sanitarias (INOS) para la supervisión y coordinación de obras de la compañía extranjera que llevaba a cabo del proyecto de abastecimiento y redes cloacales para Caracas, la presidencia del INOS la asumió Carlos Peña Uslar (1943),.

El Sistema Tuy I se pone en funcionamiento en 1957, considerado como un logro de ingeniería debido a que era la primera vez que la ciudad recibiría el agua (impulsada por bombeo) de la hoya del río Tuy, a 70 km por carretera y mil metros por debajo de Caracas, con una capacidad de conducción cercana a los 5 mil litros por segundo.

Para 1967 el Sistema Tuy II comienza sus operaciones con una tubería de acero de 1,80 metros de diámetro y 36 km de longitud, con origen cerca de San Antonio de Yare y culminación en La Guairita, al este de la ciudad. Las fuentes del nuevo sistema eran el Río Tuy y el Embalse de Lagartijo, y en conjunto las dos aducciones Tuy I y Tuy II podían aportar 13 mil litro por segundo.

Se inició paralelamente la construcción del Embalse Camatagua, en la cuenca del Río Guárico al sur del Estado Aragua y a 150 km por carretera a Caracas.

Entre el Embalse de Camatagua y la serranía que separa las hoyas de los ríos Tuy y Guárico se colocó una tubería de acero de 2,16 metros de diámetro y 25 km de longitud, se construyó un túnel, denominado Las Ollas que atraviesa las montañas entre las hoyas de los dos ríos. Lo que finalmente se convertiría en el Sistema Tuy III, comprendía el bombeo de agua desde Camatagua por medio de una estación de bombeo con una capacidad de 8 mil litros por segundo.

El Sistema Tuy III constituye actualmente la columna vertebral de sistema de abastecimiento de agua de Caracas, la aducción tiene una longitud de 50 km, opera con las 3 estaciones concebidas inicialmente y desde 1993 con la estación Mamonal, entre la primera estación en Camatagua y el túnel de las Ollas, lo que ha permitido elevar la capacidad de extracción del embalse a más de 12 mil litros por segundo.

Cabe destacar la importancia de la Estación 11 (Tuy I) la cual conduce agua desde La Mariposa, del cual depende el suministro de buena parte del sur, centro y oeste de Caracas, y de la totalidad de las ciudades de Los Teques, Carrizal, y San Antonio de Los Altos. El Tuy I quedó fuera de servicio en los años 80 después de 25 años de operación, permaneció con sus transformadores, motores y bombas originales, pero con la interconexión del Tuy I con el Tuy III, entre las estaciones 11 y 12, permitió mantener funcionando hasta 4 equipos en las estaciones subsiguientes (HIDROCAPITAL, 2002).

II.III.II Embalse Camatagua

La construcción de este reservorio se inició simultáneamente con la construcción del poblado San Francisco de Cara a 24 km de Camatagua, sitio a donde fueron trasladados los habitantes de la antigua población del mismo nombre.

La presa de Camatagua se encuentra situada a 5 km al norte de la población de Camatagua, se formó por el represamiento del Río Guárico. La capacidad de almacenamiento a nivel de agua normal es de $1575 \times 10^6 \text{ m}^3$ y la cota de valle es de 250 msnm.

La presa se comenzó a construir en 1963 y se terminó en 1968 con el propósito de generar energía hidroeléctrica y para riego, sin embargo, durante la construcción se decidió un cambio de uso para abastecimiento urbano, debido al requerimiento creciente de agua para la ciudad de Caracas.

La presa de Camatagua, según el MOP (1973) y MARNR (1978) es de tierra zonificada, núcleo impermeable y espaldones de grava. El aliviadero se encuentra a 3,8 km al suroeste de la presa, sobre una estructura de la fila que separa el lago de la quebrada “El Rebalse”. El aliviadero de 33 metros de ancho permite la evacuación máxima normal de 270 l/s, lo cual indica la gran capacidad de regulación del embalse.

La torre-toma está ubicada hacia el estribo derecho de la presa, es una torre de 70,20 metros y diámetro 15,20 metros, sobre el cual van instaladas 10 compuertas rectangulares, dispuestas en espiral de 1,83 x 0,91 metros, que dan entrada a un túnel común para el suministro de agua potable y otra compuerta de tipo plano deslizante, más profunda, de emergencia de 3,00 metros x 2,70 metros, situada sobre la torre-toma, que da entrada a la tubería de descarga del embalse.

II.III.II.I Geografía y topografía de la cuenca

El río Guárico principal tributario del Embalse Camatagua nace cerca de la población de Belén, Municipio Carlos Arvelo del Estado Carabobo y desemboca en el Río Apurito. La cuenca del río Guárico abarca un área aproximada de 8000 km^2 .

La zona es montañosa, lo cual obliga al río a seguir un camino tortuoso y a excavar su propio valle, que se define como valle longitudinal y presenta poco desarrollo

lateral. Según la clasificación de Holdridge en esta parte de la cuenca se pueden definir varias zonas de vida en la parte norte se observa un predominio de Bosque Húmedo Premontano y en la parte sur predomina el Bosque Seco Tropical con predominio de vegetación herbácea (gramíneas) y arbustiva (roble, araguaney, cují, tiano, entre otros).

II.III.II.II Geología

El área que ocupa la presa está constituida por una instalación de lutitas y areniscas, en capas de espesores variables de 0,05 a 300 metros. La disposición de las areniscas y lutitas en capas intercaladas e inclinadas, ha determinado las formas topográficas dominantes en la región, es decir, elevaciones y depresiones alargadas en dirección suroeste-noroeste, las areniscas de mayor dureza que las lutitas han resistido más la erosión y controlan las formas fisiográficas existentes.

Las principales características morfométricas del embalse Camatagua se presentan a continuación(Castillo y col., 1973):

- Área de la cuenca: 8000 km²
- Área inundada A.N.: 7637 ha
- Cota A.N.: 301,66 msnm
- Área superficial del embalse: 76,48km²
- Volumen a nivel máximo: 1746 millones de m³
- Volumen a nivel normal: 1573,89 millones de m³.
- Volumen a nivel mínimo: 40 millones de m³
- Volumen muerto: 193.760 millones de m³
- Profundidad máxima: 41 metros
- Profundidad media: 28 m
- Cota nivel máximo: 304 msnm
- Cota nivel promedio: 301 msnm
- Cota nivel mínimo: 272.20 msnm
- A.N: Nivel normal del agua.



Fig. N° 11 Aspecto del embalse Camatagua

El embalse Camatagua es el principal reservorio de agua potable para la ciudad de Caracas. Los últimos estudios de carácter limnológico fueron efectuados en el año 1997 y, desde entonces, el embalse ha sufrido grandes variaciones en su nivel por las situaciones de sequía extrema, además de la demanda creciente de agua potable para la población (González y Matos, 2012). De manera adicional, el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales Taiguaiguay (Edo. Aragua), fue desviado hacia el embalse Taiguaiguay, y de allí se bombea agua hacia el río Tucutunemo para la construcción del sistema de riego hacia los valles de esta zona. Sin embargo, por no haberse completado totalmente esta obra, parte del efluente de este sistema está siendo vertido hacia el río Guárico, principal afluente del embalse Camatagua y todos estos impactos sobre la calidad de las aguas del embalse no han sido evaluados aún (González, 2015).



Imagen N° 1 Embalse Camatagua en 1997 y en 2012



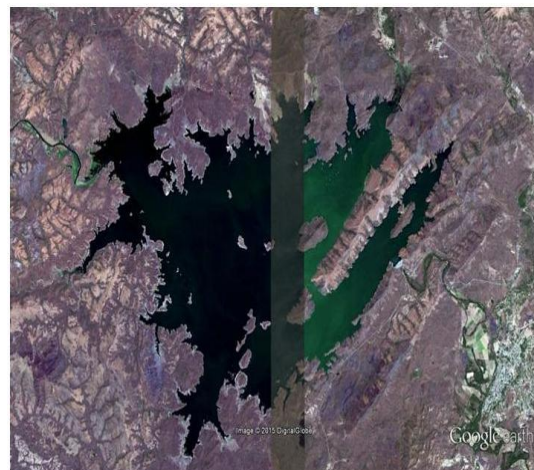
Enero de 2007



Febrero de 2007



Marzo 2011



Febrero 2012



Febrero de 2013



Abril 2014

Imágenes N° 2-6 muestran secuencialmente el proceso de eutrofización tomando como referencia el color verde de las fotografías satelitales

II.III.III Planta de tratamiento Caujarito

Ubicación

La Planta de Tratamiento Caujarito está situada a la margen derecha de la carretera “La Raisa”, que comunica La Redoma La Peñita con Santa Teresa del Tuy, Estado Miranda, aproximadamente a 1 km de la estación de bombeo 12 del Sistema Tuy I y frente a la estación 32 del Sistema Tuy III. Recibe las aguas provenientes del Embalse Camatagua para luego de ser tratadas, conducir las hacia la zona metropolitana de Caracas, mediante las estaciones de bombeo número 32 y número 33.

Descripción de la planta

La planta fue proyectada para efectuar un tratamiento completo que comprende las siguientes etapas:

- Mezcla rápida
- Mezcla lenta
- Sedimentación
- Filtración
- Estabilización
- Desinfección

Sistema de medición de entrada

Consiste de una tanquilla donde se encuentra instalado un medidor Venturi de diámetro 2.100 mm equipado con sus correspondientes conexiones, transmisor y receptor.

Válvula de entrada

La válvula principal de entrada, es del tipo aguja de diámetro 2.100 mm, está instalada en una tanquilla de concreto armado.

Canal de entrada es rectangular.

Silos de almacenamiento de sustancias químicas

La planta cuenta con seis silos de almacenamiento que son llenados directamente si el producto es suministrado a granel o simplemente volcando los sacos en la boca de los mismos. Están contruidos en concreto armado y se prevé la utilización de tres para sulfato aluminio y tres para cal viva.

Dosificación

La sala de dosificación cuenta con instalaciones para instalar siete dosificadores, tres para Sulfato de Aluminio, tres para Cal viva y uno para silicofluoruro de sodio. Los dosificadores tienen las siguientes capacidades: Sulfato de Aluminio 1500 kg/h, Cal viva 500 kg/h y Silicofluoruro de sodio de 2.000 kg/h

Cloración

La cloración se efectúa por medio de cuatro cloradores y cuatro evaporadores, de capacidad 8.000 libras/día cada uno.

Dosificación de Permanganato de Potasio

Para la dosificación de Permanganato de Potasio se cuenta con un equipo de 30 kg/h

Mezcla rápida

La mezcla rápida se efectúa en una tanquilla compuesta de tres compartimientos con sus correspondientes agitadores.

Floculación. Mezcla Lenta.

La mezcla lenta se efectúa en siete tanques de floculación. Dentro de estos tanques están instalados los agitadores lentos, de flujo horizontal y las pantallas de madera que en compartimientos separan cada uno de estos agitadores en su campo de acción en el floculador.

Cada equipo de floculación tiene dos motovariadores con sus correspondientes reguladores de velocidad, con cinco ejes accionados por cadenas y piñones en pozo seco.

Sedimentadores

Existen siete sedimentadores con sus respectivos barrelodos.

Filtración. Galería de filtros.

El sistema de filtración está constituido por 24 unidades convencionales con fondos Wheeler, repartidos en tres galerías de ocho filtros cada una.

Sala de bombas.

En esta sala existen siete unidades de bombeo, tres corresponden al llenado del estanque de lavado de filtros, dos para el lavado superficial de los mismos y dos para cloradores y dosificadores. Existen también cuatro unidades de bombeo para la recirculación del agua de lavado de los filtros.

La capacidad de la planta de tratamiento, desde un punto de vista integral, está determinada por su capacidad hidráulica para conducir el caudal desde el ingreso hasta la salida, y por su habilidad para corregir las características indeseables que presenta el agua cruda para producir así agua potable. La planta de Caujarito se diseñó para tratar un caudal de 15 mil l/s, provenientes del embalse Camatagua (12 mil l/s) y del Río Tuy (3 mil l/s) (CALTEC, 1991).

II.III.IV Planta piloto “Caujarito”. Sistema alternativo propuesto.

Para investigar el empleo de la flotación en la planta Caujarito, se ha diseñado una Planta Piloto que modela los procesos de flotación y filtración que se proponen implementar durante la rehabilitación de la Planta. En particular, se quiere estudiar el tiempo de floculación, diferentes combinaciones y dosificaciones de químicos floculantes, el comportamiento del material flotado y su remoción, el comportamiento de la bomba saturadora y el emisor de agua saturada en la cámara de reacción.



Imagen N° 7 Visión general de la planta piloto

II.III.IV.I Entrada

Se ha instalado una bomba auto-cebante dentro del recinto de la Planta Piloto para la extracción de agua cruda, bien desde la tubería de entrada ó desde el canal de mezcla rápida de la Planta Caujarito.

Dicha bomba envía contra una válvula de globo que permite la regulación del caudal enviado hacia la Planta, aguas abajo de la cual se ha instalado un medidor para la indicación del caudal tratado.



Imagen Nº 8 Medidor del volumen de entrada de agua

Dicho medidor indica en galones por minuto (GPM) y el caudal de diseño de la Planta de 2 l/s corresponde a 32 GPM; cuando se modifica a 1,5 l/s el caudal tratado indicado por el medidor es de 24 GPM.

Inmediatamente aguas abajo del medidor se introduce el coagulante que viene desde un bidón mediante una bomba dosificadora de membrana, marca Milton Roy con ajuste de carrera y de velocidad. Aguas abajo del punto de inyección, el tubo da una serie de vueltas para emular la mezcla rápida y de allí entra en el tanque de floculación.



Imagen N° 9 Mezcla rápida

II.III.IV.II Tanque de floculación

Este tanque está modelado con dos etapas de floculación del tipo “Alabama” que consiste en entradas con codos con boca vertical y reductor de diámetro para dar la intensidad de mezcla igual que en la Planta grande. Asimismo, cada compartimiento ha sido diseñado para dar un tiempo de retención de 4 minutos. Posteriormente se instaló una plancha para permitir que la celda N° 2 “Floc 2” se pueda ajustar su volumen, de manera que se pueda bajar el tiempo de retención del floculador a 4 minutos. Desde el tanque de floculación el caudal es dirigido al tanque de flotación.



Imagen N° 10 Medición de profundidad del manto flotado

II.III.IV.III Tanque de flotación

El Tanque de flotación consiste de 2 compartimientos, uno pequeño donde se introduce el agua floculada y así mismo, se introduce el agua saturada a través de una válvula reductora de presión ajustable. Dicha válvula es de la marca Kunckle y es simplemente una válvula de alivio graduable mediante una varilla en la superficie del tanque, de manera que se puede ajustar la presión de alivio de la válvula y experimentar presiones de saturación.

La mezcla de agua cruda con agua saturada sube y cruza hacia el compartimiento de flotación mediante una abertura de 30 cm. de ancho y 20 cm. de altura. El tanque de flotación tiene 1,20 m. de largo y 0,30 m. de ancho y 1,5 m. de profundidad.

En el fondo de dicho tanque hay dos (2) tubos de PVC ranurados para la recolección del agua flotada que comunican con una pequeña caja de regulación de nivel de agua en el tanque de flotación y mediante el desborde por una tubería de salida de 3" con un anillo de ajuste de nivel. Dentro del mismo tanque de flotación y al lado externo opuesto de la entrada se ha instalado otra caja, que es la caja para la decantación de lodos cuya salida es controlada por una válvula en la parte de afuera del tanque.

II.III.IV.IV Filtro

Desde la caja de regulación de nivel se deriva un caudal hacia un filtro de arena, el cual consiste de un 1,20 m. de arena de igual tamaño al que se propone usar en la rehabilitación de la Planta Caujarito, y así mismo, es de 15 cm. x 15 cm. interno con una cara hecha en lámina plástica transparente.



Imagen N° 11 Filtro de arena

El filtro tiene una instalación de retrolavado y un mecanismo para compensar la obstrucción mediante un cabezal con aireación en la salida para ajustar la pérdida de carga en el mismo. Cada tanque tiene llaves de drenaje y hay un punto de muestra en la salida del filtro.

II.III.IV.V Agua Saturada

Desde la caja de salida se deriva una tubería de 1 ½" hacia la bomba de saturación marca Edur. Dicha bomba permite succionar aire de la atmósfera en su conexión de succión, cuyo volumen es controlado para emular exactamente el volumen de aire que se requiere para la saturación del agua. Desde la bomba se envía el agua saturada hacia una trampa de burbujas, que separa las burbujas de la bomba dentro

de un separador de burbujas tipo cilíndrico vórtice y desde allí el agua saturada sigue hacia la válvula reductora de presión que produce la saturación del agua cruda dentro de la celda de reacción del tanque de flotación.



Imagen N° 12 Bomba de saturación

El vacío de succión y la presión de saturación aparecen en dos manómetros y el caudal de aire en un rotámetro.



Imagen N° 13 Manómetros de presión de saturación y vacío de succión, rotámetros caudal aire

II.IV Bases legales

A continuación será presentado el marco jurídico nacional que sustenta la investigación, dentro de ellas podemos citar inicialmente la Constitución Nacional, adicionalmente dos leyes orgánicas y dos leyes ordinarias.

II.IV.I Constitución Nacional de la República Bolivariana de Venezuela

El texto constitucional aborda el tema ambiental de forma transversal, así pues, desde el preámbulo expresa: "...el equilibrio ecológico y los bienes jurídicos ambientales como patrimonio común e irrenunciable de la humanidad...", podemos citar a De los Ríos (2008), "el ambiente debe ser ecológicamente equilibrado, lo que supone su funcionamiento de acuerdo a sus propias leyes naturales, sin perturbaciones que produzcan el agotamiento o el exceso de alguno de sus elementos, sin alteraciones sensibles en sus componentes, sean en su cantidad, sean en su calidad", adicionalmente la misma autora diserta sobre el reconocimiento del ambiente como un bien jurídico, "El reconocimiento es de suyo sustancial, al tomar el ambiente como digno de tutela penal. Algunas críticas se han levantado al respecto, pretendiendo que tal declaratoria disminuye el concepto de ambiente, pues le otorga simplemente rango de bien económico. Por supuesto, esta observación no resiste ningún análisis, pues, todo lo contrario, la mención de bien jurídico que hace, elimina cualquier posibilidad de considerarlo simplemente como un bien con valor económico, es decir, como bien en su sentido civilista, para considerarlo con un valor *per se*, jurídicamente protegido".

El Título III, Capítulo IX "De los derechos ambientales", Artículo 127, tipifica: "...Es una obligación fundamental del Estado, con la activa participación de la sociedad, garantizar que la población se desenvuelva en un ambiente libre de contaminación, en donde el aire, el agua, los suelos, las costas, el clima, la capa de ozono, las especies vivas, sean especialmente protegidos, de conformidad con la ley."

II.IV.II Ley Orgánica del Ambiente. Gaceta Oficial Extraordinaria N° 5.833 del 22 de diciembre de 2006.

En el título V “De los recursos naturales y la diversidad biológica”, Capítulo III “De los demás elementos del ambiente” específicamente el artículo 55 referido a la “Gestión integral del agua” menciona; “La gestión integral del agua está orientada a asegurar su conservación, garantizando las condiciones de calidad, disponibilidad y cantidad en función de la sustentabilidad del ciclo hidrológico”, el artículo 56 orientado al Ciclo hidrológico tipifica: “Para asegurar la sustentabilidad del ciclo hidrológico y de los elementos que intervienen en él; se deberán conservar los suelos, áreas boscosas, formaciones geológicas y capacidad de recarga de los acuíferos” y el artículo 57 estipula la conservación de la calidad del agua: “Para la conservación de la calidad del agua se tomarán en consideración los siguientes aspectos:

1. La clasificación de las aguas atendiendo a las características requeridas para los diferentes usos a que deba destinarse.
2. Las actividades capaces de degradar las fuentes de aguas naturales, los recorridos de éstas y su represamiento.
3. La reutilización de las aguas residuales previo tratamiento.
4. El tratamiento de las aguas.
5. La protección integral de las cuencas hidrográficas.
6. El seguimiento continuo y de largo plazo de la calidad de los cuerpos de agua.
7. El seguimiento continuo de los usos de la tierra y sus impactos sobre las principales cuencas hidrográficas, que abastecen de agua a las poblaciones humanas y los sistemas de riego de las áreas agrícolas.”

Ley Orgánica para la Prestación de los Servicios de Agua Potable y de Saneamiento. Gaceta Oficial N° 5.568 extraordinario de fecha 31 de diciembre de 2001.

El Título I “Disposiciones fundamentales”, específicamente el artículo 3 menciona los principios que rigen los servicios, a continuación son citados.

- a. La preservación de la salud pública, el recurso hídrico y el ambiente;

- b. El acceso de todos los ciudadanos a la provisión de los servicios de agua potable y de saneamiento;
- c. El equilibrio entre la protección de los derechos y obligaciones de los suscriptores y la de los prestadores de los servicios;
- d. La calidad de los servicios públicos materia de esta Ley;
- e. La adopción de modelos de gestión basados en criterios de calidad, eficiencia empresarial, confiabilidad, equidad, no discriminación y rentabilidad;
- f. La transparencia en las decisiones e imparcialidad de tratamiento a todos los prestadores de los servicios y suscriptores.

Por su parte el artículo 6 define el servicio público de agua potable como; la entrega de agua a los suscriptores o usuarios mediante la utilización de tuberías de agua apta para el consumo humano, incluyendo su conexión y medición, así como los procesos asociados de captación, conducción, almacenamiento y potabilización; y se entiende por servicio público de saneamiento, la recolección por tuberías de las aguas servidas de los domicilios, incluyendo su conexión, así como los procesos asociados de conducción, tratamiento y disposición final de dichas aguas servidas.

El Título V “De la prestación de los servicios”, capítulo I “Disposiciones generales”, referidos a los “Alcances de la Prestación de los Servicios de Agua Potable y de Saneamiento” en el artículo 35: “Los procesos asociados a la prestación de los servicios de Agua Potable y de Saneamiento, a las cuales se refiere la presente Ley, son los siguientes:

- Producción: incluye la captación de agua, ya sea a partir de cursos superficiales, de embalses, de lagos o acuíferos, su subsiguiente potabilización y su conducción hasta las redes de distribución;
- Distribución de Agua Potable: incluye el suministro de agua potable a través de las redes de distribución, hasta su entrega a las conexiones de los usuarios finales;
- Recolección de Aguas Servidas: incluye la recolección de las aguas servidas desde los puntos de conexión con los usuarios hasta los puntos de entrega para su tratamiento o disposición final;
- Disposición de Aguas Servidas: incluye el tratamiento o depuración de las aguas residuales y su posterior conducción hasta los sitios de descarga.

En el Capítulo V, “De la Empresa de Gestión Nacional”, el artículo 60 indica, “Para producir y vender agua cruda o agua potable en bloque y para tratar aguas residuales en los sistemas donde lo determine la Oficina Nacional de los Servicios de Agua Potable y de Saneamiento como responsabilidad del Poder Ejecutivo Nacional, se constituirá la Empresa de Gestión Nacional de Agua Potable y de Saneamiento, adscrita al Ministerio de la Producción y el Comercio, y su funcionamiento estará sometido a la regulación que para el caso establezca la Superintendencia Nacional de los Servicios de Agua Potable y de Saneamiento.

Parágrafo Único: El Poder Ejecutivo Nacional por razones de interés nacional y de índole técnica se reserva el manejo de los Sistemas denominados "de Producción Tuy I, Tuy II, Tuy III y Tuy IV", "Regional del Centro", "Turimiquire" y "Tulé-Manuelote" y "Sistema Regional del Táchira", así como las plantas de potabilización de esos sistemas”.

Ley de Aguas. Gaceta Oficial N° 38.595 de fecha 02 de Enero de 2007.

En el Título IV, “De las Regiones y Cuencas Hidrográficas e Hidrogeológicas” en su Capítulo II “De las Regiones Hidrográficas”, en el Artículo 17, numeral 5, definen la Región Hidrográfica objeto de estudio “5.-Central: Cuencas hidrográficas de los ríos Tuy, Guapo, Cúpira, Capaya y las que drenan al litoral de los estados Vargas, Miranda y Aragua”.

Ley Penal del Ambiente. Gaceta Oficial N° 39.913 del 2 de mayo de 2012.

En el Título III, De los Delitos Contra el Ambiente, Capítulo V “Degradación Alteración, Deterioro y Demás Acciones Capaces de Causar Daños a las Aguas”, En el artículo 57 relativa a la interrupción del servicio de agua: “La persona natural o jurídica que ilegalmente interrumpa el servicio de agua a un centro poblado, será sancionada con prisión de dos a cinco años o multa de dos mil unidades tributarias (2.000 U.T.) a cinco mil unidades tributarias (5.000 U.T.)”.

Adicionalmente el artículo 58 del uso ilícito de aguas menciona: “La persona natural o jurídica que utilice aguas ilícitamente o en cantidades superiores a las que las normas técnicas sobre su uso racional le señalen, será sancionada con arresto de

dos a cuatro meses o multa de doscientas unidades tributarias (200 U.T.) a cuatrocientas unidades tributarias (400 U.T.).

Si el uso ilícito o en cantidades superiores a las permitidas impide o entorpece a centros poblados el aprovechamiento de las mismas aguas, la sanción será de arresto de cuatro a seis Meses o multa de cuatrocientas unidades tributarias (400 U.T.) a seiscientas unidades tributarias (600 U.T.). Si el uso ilícito o en cantidades superiores a las que hubieren sido autorizadas se realiza con motivo de la ejecución de actividades industriales, agrícolas, pecuarias, mineras, urbanísticas o cualesquiera otras de explotación económica, la sanción será de prisión de seis meses a un año o multa de seiscientas unidades tributarias (600 U.T.) a un mil unidades tributarias (1.000 U.T.).”.

En el mismo Título III del Capítulo VIII “Delitos contra la calidad ambiental”, sección primera: envenenamiento, contaminación y demás acciones capaces de alterar la calidad de las aguas, en el artículo 83 de la Corrupción y Envenenamiento de Aguas de Uso Público, tipifica: “La persona natural o jurídica que contamine o envenene las aguas destinadas al uso público o a la alimentación pública, poniendo en peligro la salud de las personas, será sancionada con prisión de dieciocho meses a cinco años o multa de un mil ochocientas unidades tributarias (1.800 U.T.) a cinco mil unidades tributarias (5.000 U.T.)”, el artículo 84 del vertido de materiales degradantes en cuerpos de agua, refiere: “La persona natural o jurídica que vierta o arroje materiales no biodegradables, sustancias, agentes biológicos o bioquímicos, efluentes o aguas residuales no tratadas según las disposiciones técnicas dictadas por el Ejecutivo Nacional, objetos o desechos de cualquier naturaleza en los cuerpos de aguas, sus riberas, cauces, cuencas, mantos acuíferos, lagos, lagunas o demás depósitos de agua, incluyendo los sistemas de abastecimiento de aguas, capaces de degradarlas, envenenarlas o contaminarlas, será sancionada con prisión de uno a dos años o multa de un mil unidades tributarias (1.000 U.T.) a dos mil unidades tributarias (2.000 U.T.)”.

II.V Sistemas de variables

Objetivos específicos	Variables	Definición
- Caracterizar las aguas del Embalse Camatagua, en la época de invierno y verano.	Parámetros físico químicos.	Determinar las concentraciones de parámetros físico químicos en las dos épocas del año en el Embalse Camatagua.
- Caracterizar las aguas del Río Guárico, en la época de invierno y verano.	Parámetros físico químicos.	Determinar las concentraciones de parámetros físico químicos en las dos épocas del año en el Embalse Camatagua.
-Analizar los datos históricos correspondientes a parámetros físico químicos y plantónicos del Embalse Camatagua.	Estudios estadísticos: correlaciones entre parámetros físico químicos, épocas del año, eventos de intervención de la cuenca.	Mediante herramientas estadísticas establecer correlaciones que permitan evaluar el comportamiento del Embalse Camatagua históricamente
- Comparar la eficiencia de remoción del plancton en el sistema de aire por flotación respecto al sistema convencional coagulación / floculación / sedimentación. En la planta piloto Caujarito y la planta de tratamiento de agua potable Caujarito.	Estudios de porcentajes de remoción de plancton en el sistema propuesto en la planta piloto y el sistema convencional.	Estudio la eficiencia de remoción de plancton que presenta la Planta Piloto de Caujarito con respecto a la Planta de Tratamiento Convencional.
- Establecer el análisis de costos de las sustancias químicas utilizadas en el sistema de aire por flotación y en la coagulación / floculación / sedimentación. En la planta piloto Caujarito y la planta de tratamiento de agua potable Caujarito.	Estudios de costos del cloro y coagulantes utilizados en el sistema propuesto en la planta piloto y el sistema convencional.	Realizar análisis de costos a fin de verificar el menor gasto de sustancias químicas en la Planta Piloto con respecto a la Planta de Tratamiento Caujarito.

II.V.I Operacionalización de las variables

Variables	Dimensión	Indicador	Instrumentos
Parámetros físicos químicos.	Calidad del agua	Concentraciones de distintos parámetros físico químicos; fósforo, nitrógeno, entre otros; clorofila, transparencia con disco secchi	Sonda multiparametrica, Espectrofotómetros, Cromatografos, Colorímetros.
Estudios estadísticos: correlaciones entre parámetros físico químicos, épocas del año, eventos de intervención de la cuenca.	Comportamiento histórico del cuerpo de agua.	Herramientas estadísticas descriptivas e inferenciales ANOVA, Coeficientes de correlación, Análisis de componentes principales, entre otras.	Aplicación estadística IBM SPSS Versión 22.
Estudios de porcentajes de remoción de plancton en el sistema propuesto en la planta piloto y el sistema convencional.	Eficiencia del tratamiento aire por flotación.	Concentraciones de clorofila del efluente de la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento Caujarito.	Dispositivos de filtración para la determinación de clorofila.
Estudios de costos del cloro y coagulantes utilizados en el sistema propuesto en la planta piloto y el sistema convencional.	Ahorro de costos de sustancias químicas	Consumos kg/día de cloro (en su forma determinada).	Cálculo de gastos de materia prima utilizada en el tratamiento del agua potable.

III.- MARCO METODOLÓGICO

III.I Tipo de investigación

La investigación desarrollada fue descriptiva específicamente del tipo correlacional, su finalidad es determinar el grado de relación o asociación (no causal) existente entre dos o más variables. En estos estudios, primero se miden las variables y luego, mediante pruebas de hipótesis correlacionales y la aplicación de técnicas estadísticas, se estima la correlación. Aunque la investigación correlacional no establece de forma directa relaciones causales, puede aportar indicios sobre las posibles causas de un fenómeno.

La utilidad y el propósito principal de los estudios correlacionales es saber cómo se puede comportar un concepto o variable conociendo el comportamiento de otras variables relacionadas.

Es decir, intentar predecir el valor aproximado que tendrá una variable en un grupo de individuos, a partir del valor obtenido en la variable o variables relacionadas (Arias, 2006).

En particular, en esta investigación fueron correlacionadas entre otras; las concentraciones de los parámetros físico químicos en las épocas de invierno y verano en el Embalse Camatagua y Río Guárico, las eficiencias de remoción del fitoplancton en la Planta Piloto de Caujarito y la Planta de Tratamiento de Agua Potable Caujarito, la relación costo-beneficio referido a la dosificación de sustancias químicas en ambos sistemas de tratamiento.

III.II Diseño de la investigación

El diseño de esta investigación fue experimental, longitudinal, específicamente de tendencia.

En ocasiones el interés del investigador es analizar cambios a través del tiempo de determinadas categorías, conceptos, sucesos, variables, contextos o comunidades; o bien, de las relaciones entre éstas. Incluso, a veces ambos tipos de cambios. Entonces disponemos de los diseños longitudinales, los cuales recolectan datos a través del tiempo en punto o períodos, para hacer inferencias respecto al cambio, sus determinantes y consecuencias.

Los diseños de tendencia (trend) son aquellos que analizan cambios a través del tiempo (en categorías, conceptos, variables o sus relaciones), dentro de alguna población en general. Su característica distintiva es que la atención se centra en una población (Arias, 2006).

III.III.- Población y muestra

La población, o en términos más precisos población objetivo, es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. Ésta queda delimitada por el problema y por los objetivos del estudio (Arias, 2006).

Por otra parte, la muestra es un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible. En este caso la muestra correspondió a los resultados obtenidos en las diferentes captaciones, además de los datos históricos de los parámetros físicos, químicos y biológicos.

El muestreo fue del tipo probabilístico, es un proceso en el que se conoce la probabilidad que tiene cada elemento de integrar la muestra.

A continuación será presentada la ejecución de los diferentes muestreos, así como el tipo de muestreo a realizar.

Lugar de captación	Períodos de muestreo
Río Guárico	En el año 2015 se realizaron 4 muestreos (06 de enero, 21 de enero, 30 de abril y 02 de julio), además se recopilaron y procesaron los datos históricos de los últimos 4 años.
Embalse Camatagua	En el año 2015 se realizaron 12 muestreos (1 por mes), además se recopilaron y procesaron los datos históricos de los últimos 20 años.
Planta de Tratamiento Caujarito	En el año 2015 fueron captadas muestras del efluente de esta planta, durante el último trimestre del año (29/09/15, 27/10/2015) y el primer semestre del año 2016 (08/01/2016, 12/02/2016, 27/05/2016)
Planta Piloto	En el año 2015 fueron captadas muestras del efluente de esta planta, durante el último trimestre del año (29/09/15, 27/10/2015) y el primer semestre del año 2016 (08/01/2016, 12/02/2016, 27/05/2016)

Tabla N° 4 Período de muestreo para los 4 sitios de captación en la investigación

Las muestras captadas en el río Guárico fueron instantáneas, estas muestras reflejan las características del cuerpo de agua, corrientes de proceso o aguas residuales en el momento de su captación, se captan muestras instantáneas cuando las características de la corriente son relativamente constantes COVENIN 2709, 2002).

Las muestras del embalse Camatagua; correspondieron a muestras captadas en perfil vertical; las cuales son una serie de muestras captadas a diferentes profundidades de una masa de agua, en un lugar específico (COVENIN 2709, 2002).

Para el caso de la planta de tratamiento Caujarito y la planta piloto fueron efectuados muestreos compuestos. Las muestras compuestas representan las características promedio del cuerpo de agua, corriente o agua residual durante el período de captación, para la preparación de la muestra compuesta, se captaron sub muestras

instantáneas durante el período que se desea evaluar. Antes de la combinación de las sub muestras, debe verificarse que los parámetros de interés no varíen significativamente durante el período de muestreo. La composición de la muestra puede ser: A volumen constante; es decir; cuando la variación de caudal no es significativa o no se pueda medir el caudal, las sub muestras se captan a intervalos regulares de tiempo. La muestra compuesta se prepara mezclando volúmenes iguales de las sub muestras (COVENIN 2709, 2002).

Frecuencia de muestreo			
Horas por día que opera el proceso generador de la descarga	Número de muestras simples	Intervalo entre toma de muestras simples (horas)	
		Mínimo N.E.	Máximo N.E.
Menor que 4	Mínimo 2	-	-
De 4 a 8	4	1	2
Mayor que 8 y hasta 12	4	2	3
Mayor que 12 y hasta 18	6	2	3
Mayor que 18 y hasta 24	6	3	4

Tabla N° 5 Frecuencia de muestreo para captar muestras compuestas. Tomado de la Norma Mexicana 1996- SEMARNAT.

III.IV.- Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se entiende por técnica, el procedimiento o forma particular de obtener datos o información, las técnicas son particulares y específicas de una disciplina, por lo que sirven de complemento al método científico, el cual posee una aplicabilidad general. Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivos o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información (Arias, 2006).

En esta investigación la técnica fundamental para la recolección de datos fue la aplicación de las técnicas analíticas para obtener los resultados físico químicos y biológicos en el Embalse Camatagua, Río Guárico, Planta Piloto, Planta de Tratamiento de Agua Potable Caujarito, por otra parte como instrumentos para recolectar datos se dispuso de los reportes de calidad del agua, registros históricos de

datos físico químicos y planctónicos, imágenes satelitales y fotográficas, paquete estadístico IBM SPSS versión 22 (para el procesamiento estadístico de datos) y datos de costos de sustancias químicas como gas cloro, sulfato de aluminio líquido, sulfato de aluminio sólido, además de los respectivos consumos de estos.

A continuación serán presentadas las características de las técnicas analíticas a determinar en esta investigación. Las metodologías están estandarizadas y referenciadas del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, edition 20th

Parámetro	Metodología	Técnica empleada
pH	4500 H + B	Potenciometría
Conductividad Específica	2510-B	Potenciometría
Oxígeno Disuelto	4500- O G	Potenciometría
Temperatura	2550-C	Potenciometría
Turbiedad	2130-B	Espectrofotometría
Color aparente	2120-B	Comparación Visual
Color verdadero	2120- B	Comparación Visual
Cloruro	4110-B	Cromatografía iónica
Sulfato	4110-B	Cromatografía iónica
Fluoruro	4110-B	Cromatografía iónica
Nitrato	4110-B	Cromatografía iónica
Nitrito	4500-NO ₂ -B	Colorimetría
Nitrógeno amoniacal	4500-NH ₃ -D	Potenciometría
Dureza total	2340-C	Volumetría
Dureza cálcica	2340-C	Volumetría
Alcalinidad total	2320	Volumetría
Fósforo total	4500-P E	Espectrofotometría
Fósforo reactivo disuelto	4500-P E	Espectrofotometría
Fósforo disuelto total	4500-P E	Espectrofotometría
Sílice reactiva	4500- SiO ₂ - E	Colorimetría
Hierro total	3500-Fe-B	Colorimetría
Manganeso total	3500- Mn- B	Colorimetría
Aluminio	3500 Al- B	Colorimetría
Calcio	2340-C	Volumetría
Magnesio	2340-C	Volumetría
Clorofila α	10200-H	Espectrofotometría
Caracterización planctónica	10200-F	Microscopía óptica

Tabla N ° 6 Parámetros físico químicos y biológicos con la técnica analítica para su determinación.

Por otra parte fueron aplicadas para el tratamiento de los datos, estadística descriptiva, con parámetros básicos dentro de los que se pueden mencionar, medias,

medianas, rangos, máximos, mínimos y desviación estándar además para los casos de la estadística inferencial fueron utilizadas pruebas tales como Regresiones lineales y múltiples, Análisis de Componentes Principales, Análisis de Varianza (ANOVA), Medidas de asociación (aplicación del Coeficiente de Correlación de Pearson y Spearman con sus respectivos niveles de significancia). A continuación serán presentadas las explicaciones de cada una de las pruebas estadísticas utilizadas.

Dentro de los estudios de regresión lineal y múltiple aplicados fueron estimados y presentados aquellos modelos con un comportamiento estadísticamente apropiado, es decir, los modelos cuya regresión representan una estimación cercana o aproximada al fenómeno natural o las variables físico químicas evaluadas.

Los modelos de regresión tomados en consideración fueron: lineal, logarítmico, exponencial y cuadrático. Para seleccionar alguno de ellos se basó en las siguientes premisas: Coeficiente de Determinación lineal (Coeficiente de Correlación de Pearson) y los Coeficientes de Correlación Múltiples o R^2 aceptable (es decir cercano a 1), por otra parte la uniformidad o concordancia en el gráfico de dispersión y por último el nivel de significancia que arroja el modelo (p valor $< 0,05$).

Para el Análisis de Componentes Principales (ACP), es una técnica de reconocimiento de patrones que intenta interpretar la varianza dentro de un gran conjunto de variables inter-correlacionadas y convertir estas en un conjunto más pequeño de variables independientes.

La prueba ACP proporciona información sobre los parámetros más significativos, se utiliza para describir todo el conjunto de datos, además reduce datos y para resumir la correlación entre los constituyentes del agua con una mínima pérdida de información original. Esta técnica utiliza una matriz de correlación de los datos, reordenados, para explicar la estructura del conjunto de datos subyacente

Y así identificar las relaciones existentes, en este caso de los parámetros físico químicos. (Modificado de Zho, *col.*, 2012).

Adicionalmente la comparación de medias (T de student) y el Análisis de Varianza (ANOVA); a fin de realizar la prueba estadística comparación de medias, T de Student, serán ejecutados 5 pasos, los cuales son listados a continuación:

1.- **Planteamiento de hipótesis**, planteando la H_0 (hipótesis nula) y la H_1 (hipótesis alternativa), si es aceptada la H_0 , no existe diferencia significativa, es decir no hay relación entre los parámetros físico químicos con la época climática del año 2015, por otra parte si se acepta la H_1 existe diferencia estadísticamente significativa, hay relación entre el parámetro físico químico y la época climática.

2.- **Determinar el valor alfa**, 0,05 (porcentaje de error 5%).

3.- **Elección de la prueba estadística**, en este caso T de Student.

4.- **Análisis del p-valor**, primeramente se estudió la Normalidad, para este parámetro estadístico fue realizada la Prueba de Kolmogorov-Smirnov utilizada para muestras grandes (mayor de 30 individuos) ó la Prueba de Shapiro Wilk para muestras pequeñas (menor de 30 individuos).

Así pues, para un p-valor mayor que alfa (0,05) tendremos una distribución normal del parámetro físico químico estudiado y para un p-valor menor que alfa los datos no provienen de una distribución normal.

Por otra parte se estudió la Igualdad de Varianzas (ANOVA) mediante la prueba de Levene, el cual indica que un p (valor) mayor a 0,05 significa varianzas iguales y un p (valor) menor a 0,05 indica que existe diferencia significativa entre las varianzas.

5.- **Calcular la prueba T de Student para comparar medias**. Son planteadas las hipótesis de acuerdo al paso 1; p (valor) $> 0,05$ (Se acepta H_0) es decir, no existe diferencia significativa entre el comportamiento del parámetro físico químico y la época climática. Por otra parte si p (valor) $< 0,05$ (Se acepta H_1) es decir, existe diferencia significativa entre el comportamiento del parámetro físico químico y la época climática. Por último, para el análisis de costo se utilizaron datos como: consumos de sustancias químicas (coagulantes y desinfectantes), caudales de entrada y salida, costos de luz eléctrica, costos de sustancias químicas.

III.V.- Validez y confiabilidad de los instrumentos de medición

La validez, en términos generales, se refiere al grado en que un instrumento realmente mide la variable que pretende medir. La validez es un concepto del cual pueden tenerse diferentes tipos de evidencia: evidencia relacionada con el contenido, evidencia relacionada con el criterio y evidencia relacionada con el constructo.

Debido a que los instrumentos de recolección de datos a utilizar en este trabajo de investigación son fundamentalmente técnicos la validez será referida a parámetros estadísticos propios de cada técnica analítica.

La confiabilidad de un instrumento de medición se refiere al grado en que su aplicación repetida al mismo sujeto u objeto produce resultados reproducibles.

III.VI.- Consideraciones éticas

El agua representa un bien natural de gran importancia, dentro de los lineamientos estratégicos trazados por la Hidrológica de la región capital, Hidrocapital, se encuentran cinco grandes vertientes de acción para cumplirlas como año límite el 2019, a continuación se listan: - la cobertura del servicio agua potable, la - frecuencia del servicio agua potable, - el tratamiento de las aguas servidas,- la participación popular y - la sostenibilidad ambiental, así pues, la investigación propende coadyuvar en alguna medida a concretar algunas de estas líneas estratégicas, resaltando la sostenibilidad ambiental como la más resaltante.

Por otra parte, con esta investigación se propuso aportar sustentos técnicos, a fin de determinar aspectos inherentes a las actividades de tratamiento de las aguas que surten a gran parte de la población de la región capital, con el objetivo primordial de llevar a todos los hogares el vital líquido con la calidad apropiada evitando así afecciones y enfermedades, es decir, para promover el bienestar humano.

Adicionalmente, el principal reservorio de agua que abastece a la ciudad de Caracas, el embalse Camatagua, brinda un servicio ambiental por el cual debemos velar. Entendiendo la relevancia estratégica para los habitantes del Distrito Capital, esta investigación resultará a futuro en informaciones claves para entender el comportamiento estacional, las propiedades físico-químicas y planctónicas y las consecuencias de las intervenciones de la cuenca que surte al embalse Camatagua.

A manera de síntesis, el trabajo de investigación aportó instrumentos para incrementar el bienestar humano, ya que con las mejoras en la tratabilidad del agua potable (una vez se inicié el rehabilitación de la Planta de Tratamiento Caujarito) se disminuirán las afecciones y enfermedades para los habitantes de la Gran Caracas, además con el estudio del reservorio (Embalse Camatagua) deben tomarse medidas preventivas y

correctivas para disminuir la influencia antrópica sobre esta cuenca de fundamental importancia para el ambiente y por último, el ahorro en la inversión de productos químicos que representará para la empresa HIDROCAPITAL con la puesta en marcha de este sistema alternativo de tratabilidad de agua potable.

III.VII.- Aspectos administrativos

Según Fidias (2006), los aspectos administrativos se encuentran en un capítulo en el cual se expresan los recursos y el tiempo necesario para el desarrollo o ejecución de la investigación. Está integrado por:

- Recursos materiales: Los cuales comprenden equipos de computación, accesorios y materiales de oficina.
- Recursos humanos: Tales como los asistentes de investigación, encuestadores o cualquier otro personal de apoyo.
- Recursos financieros: El cual está representado por un presupuesto.

Recursos materiales	Equipos de computación, incluyendo todos sus periféricos. Materiales de oficina. Equipos de medición de parámetros físico químicos.
Recursos humanos	Investigador, Tutores, Apoyo de investigadores de instituciones colaboradoras. Trabajadores de la empresa HIDROCAPITAL.
Recursos financieros	Esta investigación se enmarcó en las actividades rutinarias que ejecuta la empresa HIDROCAPITAL por esta razón los recursos financieros son aportados fundamentalmente por la misma empresa.

Tabla Nº 7 Recursos materiales, humanos y financieros para desarrollar la investigación

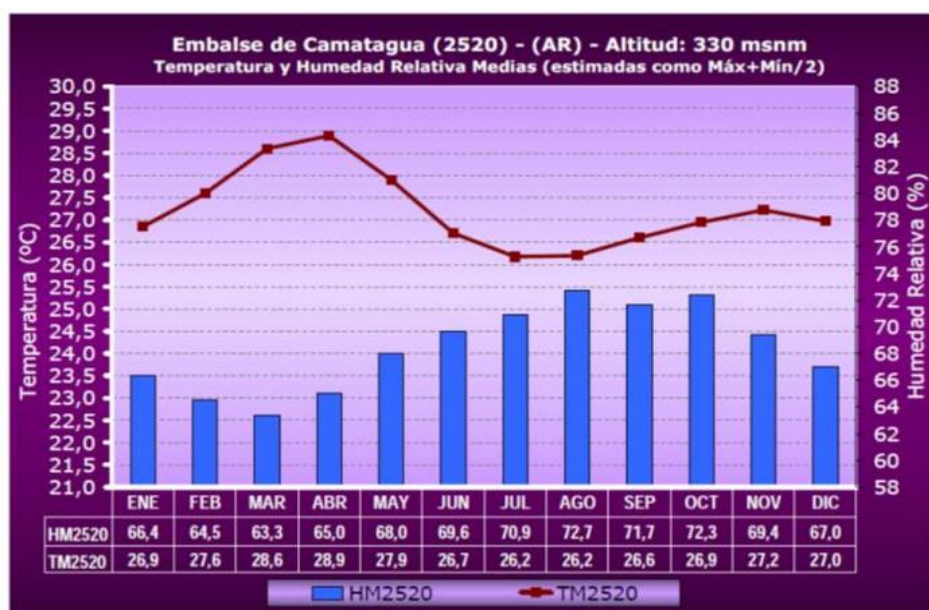
IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la caracterización de los cuerpos de agua estudiados, Embalse Camatagua y su principal tributario Río Guárico, fue necesario establecer dos variables de agrupación, las cuales son mencionadas a continuación: 1.- Épocas climáticas que influyen en los cuerpos de agua y 2.- Profundidades de captación de muestras en las tomas selectivas del perfil vertical del Embalse Camatagua.

IV.I.- Épocas climáticas influyentes en los cuerpos de agua.

El embalse Camatagua muestra una estacionalidad relativamente bien definida en su comportamiento térmico. Presenta un período de estratificación que comprende los meses de abril a noviembre, abarcando toda la época de lluvias y un período de circulación parcial que probablemente se inicia en diciembre y se prolonga hasta marzo, período que coincide con la época seca (Matos, 1992).

Además de este antecedente nacional, donde es expuesta la temporalidad de las épocas climáticas, serán presentadas estadísticas correspondientes al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH) que reafirman este planteamiento.



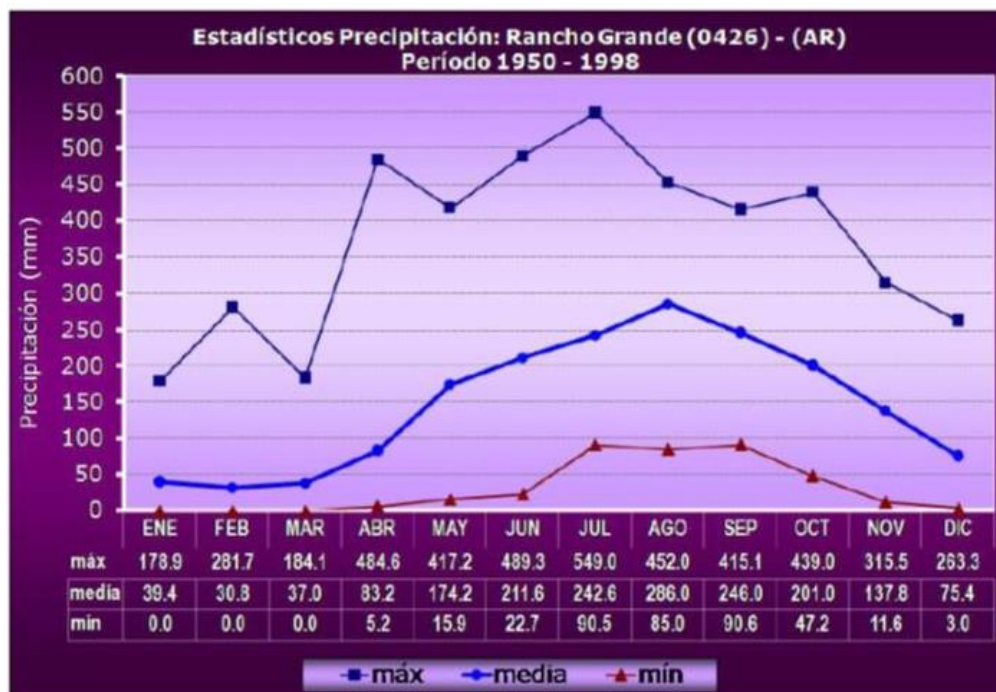
Gráfica N° 14 Valores promedio de Temperatura (°C) y Humedad Relativa del aire (%) en el Embalse Camatagua. Tomado de INAMEH <http://www.inameh.gob.ve/web/climatologia/estadistica.php>

El gráfico presenta el promedio de las temperaturas (línea roja), observándose una disminución de la temperatura a partir del mes de abril con un leve aumento a partir del mes de noviembre incrementándose desde enero hasta marzo. Para el caso de la Humedad Relativa (barras azules) se evidencia un comportamiento antagónico respecto a la temperatura, la Humedad relativa aumenta desde el mes de abril hasta octubre y empieza a disminuir desde noviembre hasta marzo. Es importante mencionar que estos datos corresponden al período comprendido desde 1970 hasta 1998.

Adicionalmente el INAMEH presenta los datos de precipitaciones en el estado Aragua, dos estaciones de muestreo La Urbina-Quebrada Seca y Rancho Grande en el período que abarca desde 1950 hasta 1998, estas estaciones no están ubicadas en el Embalse Camatagua, como la estación de medición correspondiente a la Temperatura media y Humedad Relativa presentada anteriormente, sin embargo funciona como referencia para extrapolar el comportamiento de las precipitaciones en el reservorio.



Gráfica N°15 Valores promedio, máximos y mínimos de las precipitaciones en la estación La Urbina-Quebrada Seca. Tomado de INAMEH (<http://www.inameh.gob.ve/web/climatologia/estadistica.php>)



Gráfica N°16 Valores promedio, máximos y mínimos de las precipitaciones en la estación Rancho Grande. Tomado de INAMEH (<http://www.inameh.gob.ve/web/climatologia/estadistica.php>)

Con estos datos del comportamiento climático-estacional, quedan establecidas las dos épocas climáticas que fueron consideradas para el trabajo de investigación en ambos cuerpos de agua embalse Camatagua y Río Guárico. De esta manera, la “Época de Verano” está constituida por los meses desde Diciembre hasta Marzo y la “Época de Invierno” está compuesta por los meses desde Abril hasta Noviembre.

IV.II.- Profundidades de captación de muestras en las tomas selectivas del perfil vertical del Embalse Camatagua.

Para caracterizar química y biológicamente el embalse Camatagua, y otros cuerpos de agua con funciones similares (aguas para consumo humano), es necesario establecer las profundidades de captación de muestras, debido al comportamiento que presentan los parámetros físico químicos y biológicos en las tomas selectivas. El proceso de toma de decisión para abrir las diferentes compuertas (10) que componen la estructura de la Torre Toma del embalse Camatagua, guarda estrecha relación con las características de los parámetros físico químicos y biológicos en las diferentes profundidades del cuerpo de agua, al momento que estas aguas arriben a la planta de

tratamiento, en este caso Caujarito, deben ajustarse algunas variables operativas y químicas, para que el proceso de tratamiento sea el óptimo.

En este sentido fueron segmentadas las profundidades de acuerdo al histórico de este cuerpo de agua, se establecieron los siguientes intervalos: “Superficie”, “De 1 a 5 metros”, “De 6 a 10 metros”, “De 11 a 15 metros”, “De 16 a 20 metros”, “De 21 a 25 metros”, “De 26 a 30 metros”, “De 31 a 35 metros”, “De 36 a 40 metros”, “De 41 a 45 metros”, “De 46 a 50 metros” y “De 51 a 55 metros”



Fig N° 12 Estructura de un embalse con su correspondiente torre toma. Imagen modificada de http://www.abc.es/espana/madrid/abci-torres-gemelas-para-extraer-energia-embalse-valmayor-201603102233_noticia.html.

Al caracterizar el embalse Camatagua es preciso indicar que las captaciones se realizaron aproximadamente a 500 metros de distancia de la torre toma, en el año 2015, y para el caso de la evaluación del comportamiento histórico se tomaron en cuenta los datos físico químicos y biológicos obtenidos en esta zona del embalse.

Para el principal tributario del embalse el río Guárico las captaciones se realizaron en la desembocadura del río.

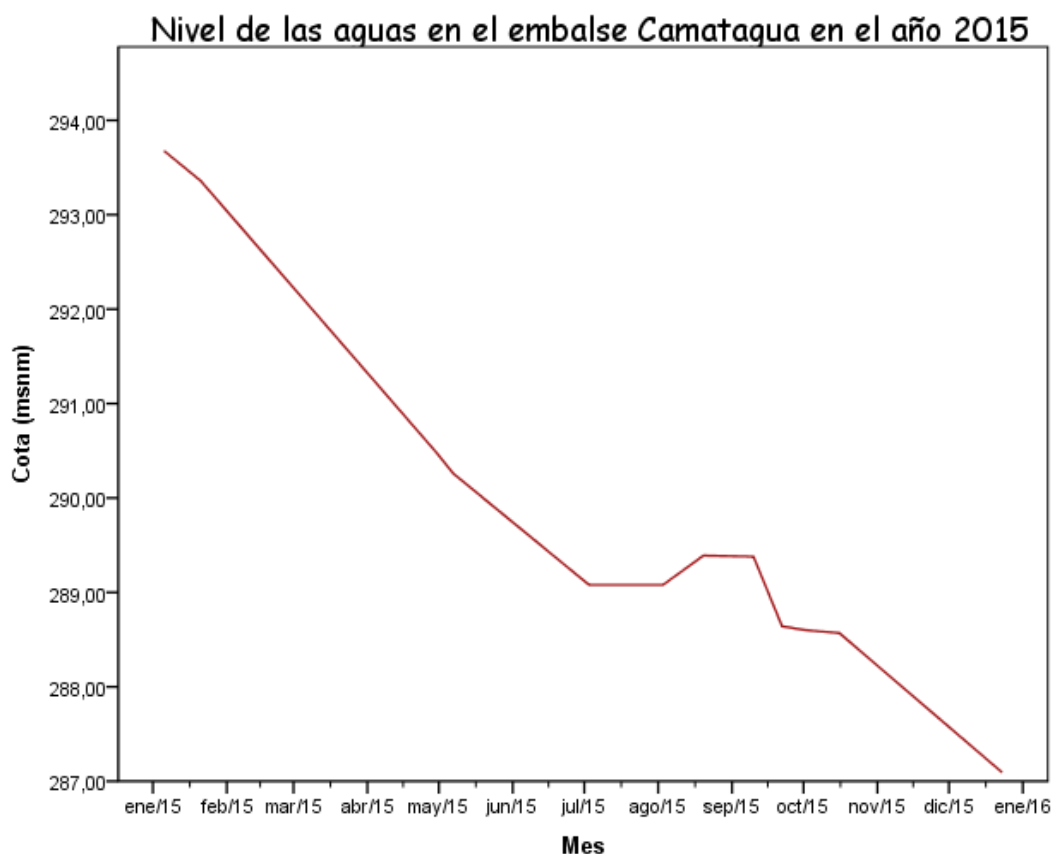
IV.III.-Caracterización del embalse Camatagua en las dos épocas climáticas, invierno y verano del año 2015. Objetivo específico N° 1.

A continuación serán reflejados los resultados físico químicos de los 12 muestreos realizados en el año 2015, en la siguiente tabla es presentada la estadística descriptiva, compuesta por: número de datos evaluados, valores mínimos, máximos y medias, además de la desviación estándar de los parámetros físico químicos analizados.

	Número de datos	Mínimo	Máximo	Media		Desviación estándar
	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Error estándar	Estadístico
Transparencia Disco Secchi (m)	12	0,1	0,7	0,367	0,0565	0,1958
Cond específica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	76	276	513	349,82	4,066	35,445
Color Aparente (U Pt-Co)	70	10	100	39,43	3,009	25,174
Color Verdadero (U Pt-Co)	70	1	20	9,40	0,552	4,620
Turbiedad (NTU)	70	2,00	53,00	14,73	1,32	11,05
Alcalinidad total *	70	112	170	147,23	1,94	16,30
Dureza Total *	56	114	156	133,11	1,253	9,380
Índice de saturación Langelier	56	-0,4	1,5	0,273	0,06	0,49
pH	76	6,1	9,4	7,87	0,06	0,60
Aluminio*	37	0,00	0,06	0,025	0,002	0,016
Hierro Total*	70	0,00	0,60	0,092	0,012	0,102
Manganeso Total *	59	0,00	0,52	0,207	0,020	0,155
Calcio*	56	17,6	37,6	26,69	0,52	3,90
Magnesio*	56	11,2	19,7	15,99	0,24	1,84
Sodio*	26	10,2	25,6	15,323	0,9601	4,89
Potasio*	26	0,8	9,7	4,9	0,579	2,95
Cloruro*	45	10,20	60,70	17,24	1,94	13,05
Sulfato*	45	0,6	47,1	10,294	1,437	9,642
Bicarbonato*	56	107	207	176,48	3,334	24,949
Fluoruro*	52	0,00	0,18	0,100	0,005	0,038
Sílice Reactiva*	56	4,0	33,2	18,279	0,751	5,622
Dióxido de Carbono Libre*	63	0	21	4,84	0,570	4,523
Nitrato *	59	0,000	1,700	0,042	0,030	0,232
Nitrito *	70	0,000	0,230	0,013	0,004	0,039
Nitrógeno amoniacal *	63	0,00	5,27	1,91	0,17	1,37
Fosforo Total *	75	0,000	1,232	0,268	0,021	0,184
Fosforo Disuelto Total *	75	0,000	0,712	0,198	0,016	0,146
Fosforo Reactivo Disuelto *	76	0,000	0,396	0,132	0,013	0,116

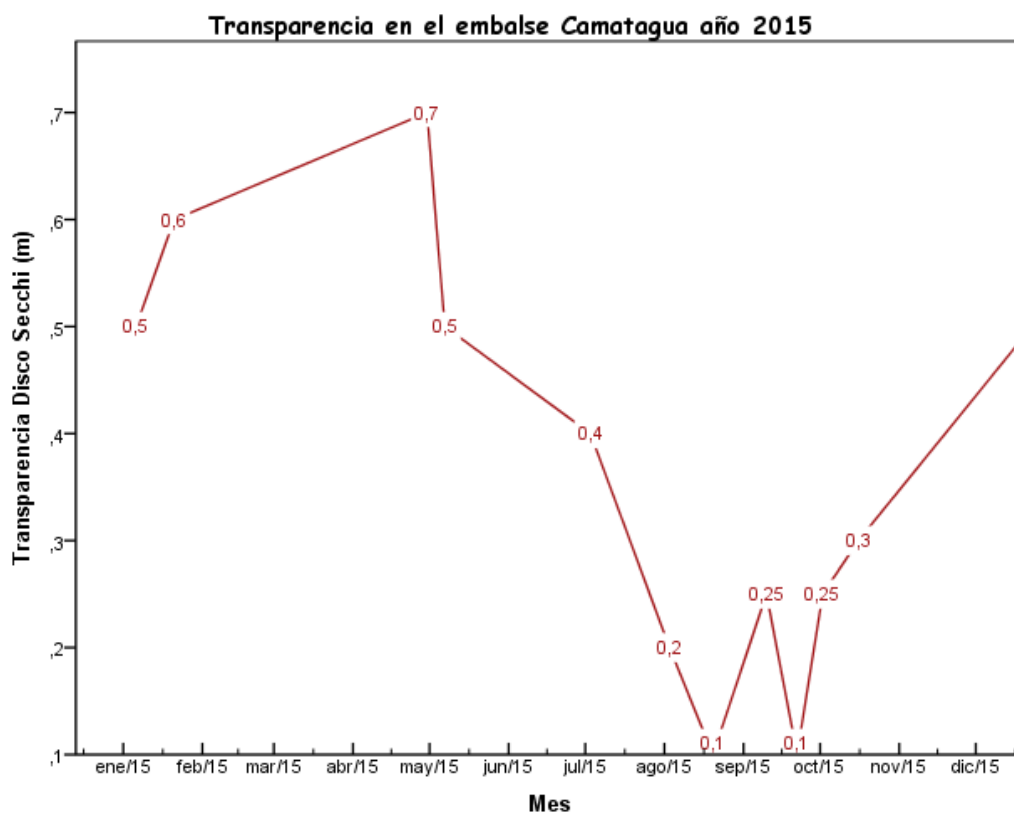
Tabla Nº 8 Parámetros físico químicos con estadísticos descriptivos en el año 2015 para el embalse Camatagua * mg/L

Es importante mencionar que los estadísticos presentados en la tabla anterior reflejan valores a lo largo de toda la columna de agua del embalse Camatagua, sin estratificar por las 2 variables de agrupación: 1.- Épocas climáticas que influyen en los cuerpos de agua y 2.- Profundidades de captación de muestras en las tomas selectivas del perfil vertical del Embalse Camatagua.



Gráfica N° 17. Nivel de las aguas en el embalse Camatagua en el año 2015

La gráfica N ° 17 presenta la disminución progresiva del nivel de las aguas del embalse Camatagua para el año 2015, el fenómeno climático “El Niño” sin duda ocasionó este desnivel en la cota del reservorio. En la gráfica se aprecia una disminución de 6 metros en la cota del cuerpo de agua.

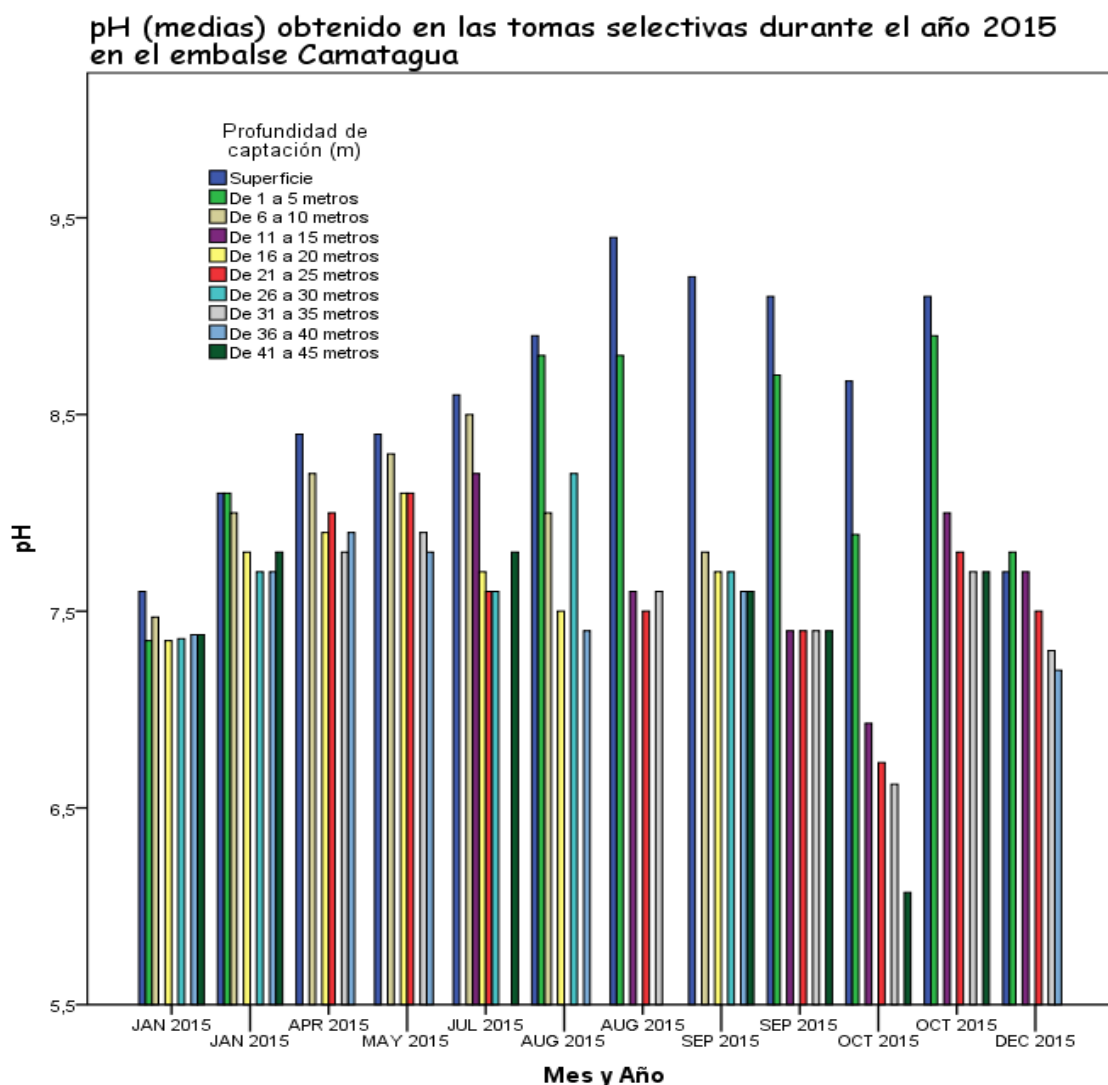


Gráfica N° 18 Transparencia en el año 2015 en el embalse Camatagua.

Al estudiar la Transparencia del reservorio durante el 2015, se observa para el primer semestre del 2015 transparencia de hasta 0,7 metros, luego una drástica disminución en los meses que van desde agosto a noviembre, para aumentar nuevamente en diciembre. De esta manera se puede interpretar que en Época de Verano, la transparencia tiende a aumentar, mientras que para la Época Invernal la transparencia disminuye. No obstante, aún los valores de transparencia durante todo el año que presenta el reservorio, no reflejan desde el punto de vista organoléptico un síntoma de calidad de agua óptima.

Cabe destacar que la transparencia a pesar de ser un parámetro de poca complejidad para su medición, aporta información valiosa, sobre los estados tróficos de los cuerpos de agua.

IV.III.I.-Estudio de los parámetros físico químicos, incluyendo las dos variables de agrupación, 1.- Épocas climáticas que influyen en los cuerpos de agua y 2.- Profundidades de captación de muestras en las tomas selectivas del perfil vertical del Embalse Camatagua.

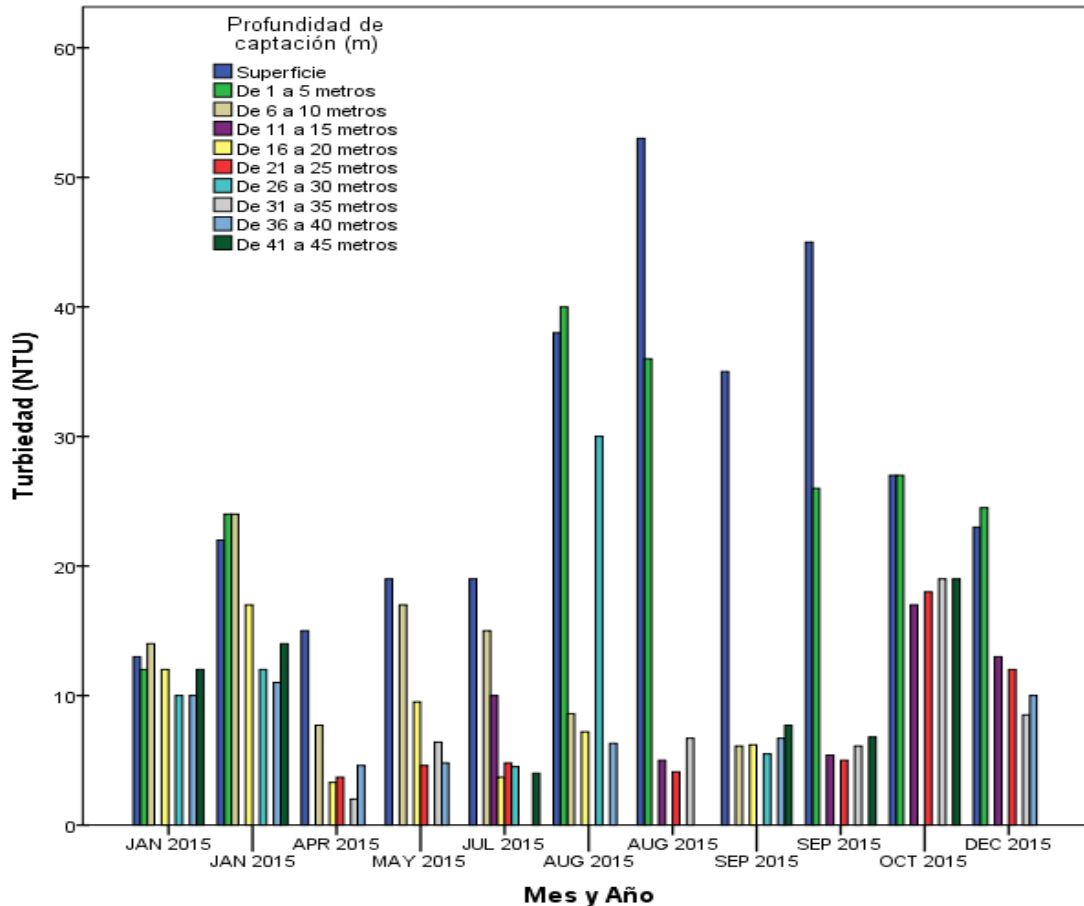


Gráfica N° 19 pH (medias) obtenido en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.

En promedio los valores de pH a lo largo de toda la columna de agua tienden a valores alcalinos, al observar la tabla N° 8 el valor medio de pH fue de 7,87.

Por otra parte en los estratos superiores del cuerpo de agua “Superficie”, “De 1 a 5 metros” los valores de pH tienden a la alcalinidad debido a la fijación del CO_2 producto de la fotosíntesis del fitoplancton, situación contraria ocurre para las mayores profundidades por la liberación del CO_2 lo cual promueve acidez en las aguas. Para el mes de agosto Época de Invierno se aprecia el mayor valor de pH.

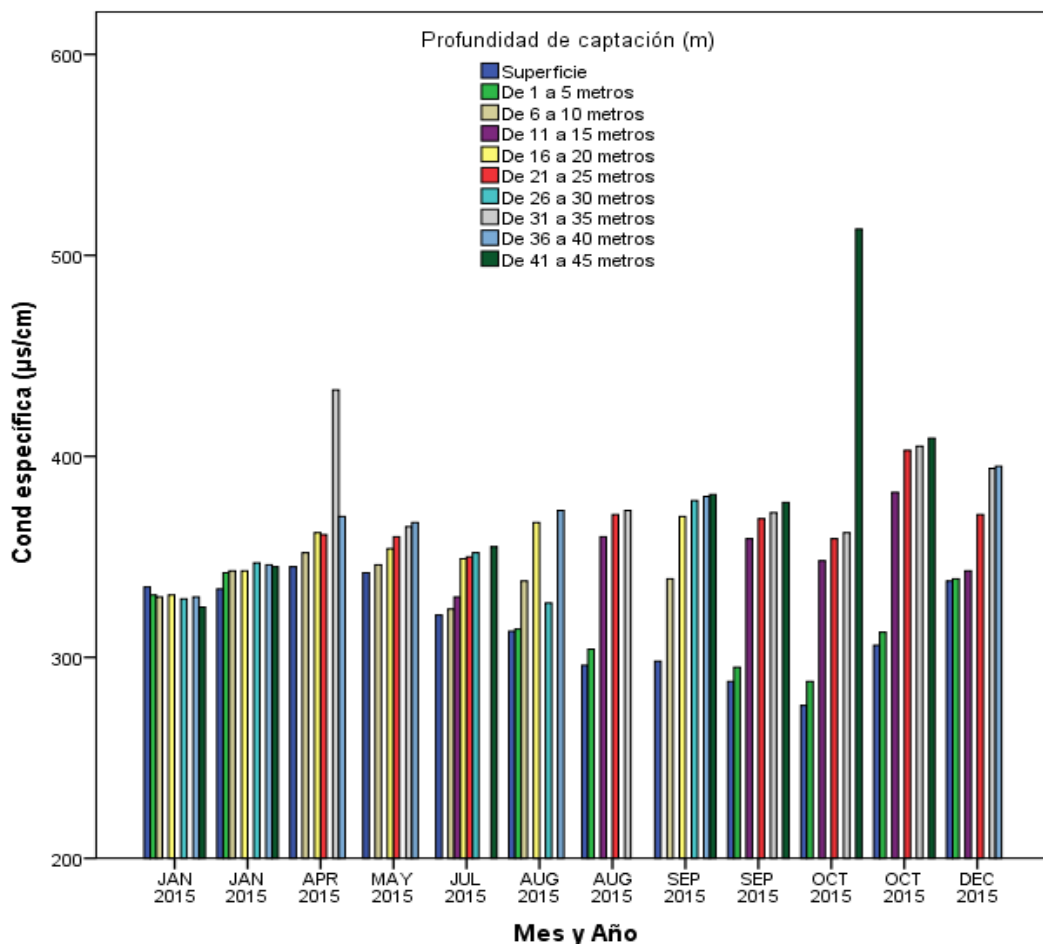
Turbiedad (medias) obtenida en todas las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.



Gráfica N°20 Turbiedad (medias) obtenida en todas las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.

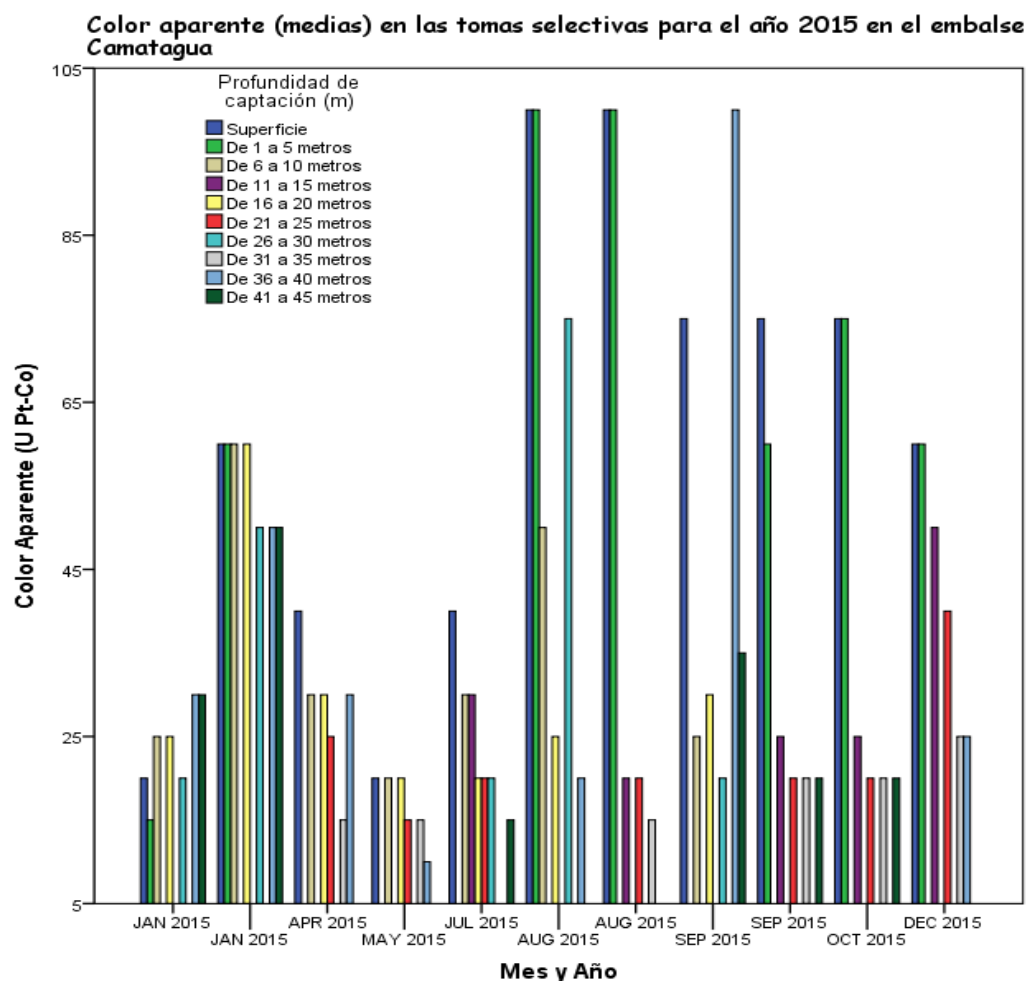
En torno a la Turbiedad, al igual que para el parámetro pH en el mes de agosto presento su mayor valor, este hecho podría explicarse por el leve aumento en el nivel de las aguas que experimento el reservorio, al observar la gráfica N° 17 del nivel de las aguas se puede constatar esta explicación. La mayor escorrentía y descarga de mayor volumen de sedimentos de los tributarios, principalmente el río Guárico explica esta magnitud en la Turbiedad para este mes.

Conductividad específica (medias) obtenido en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua



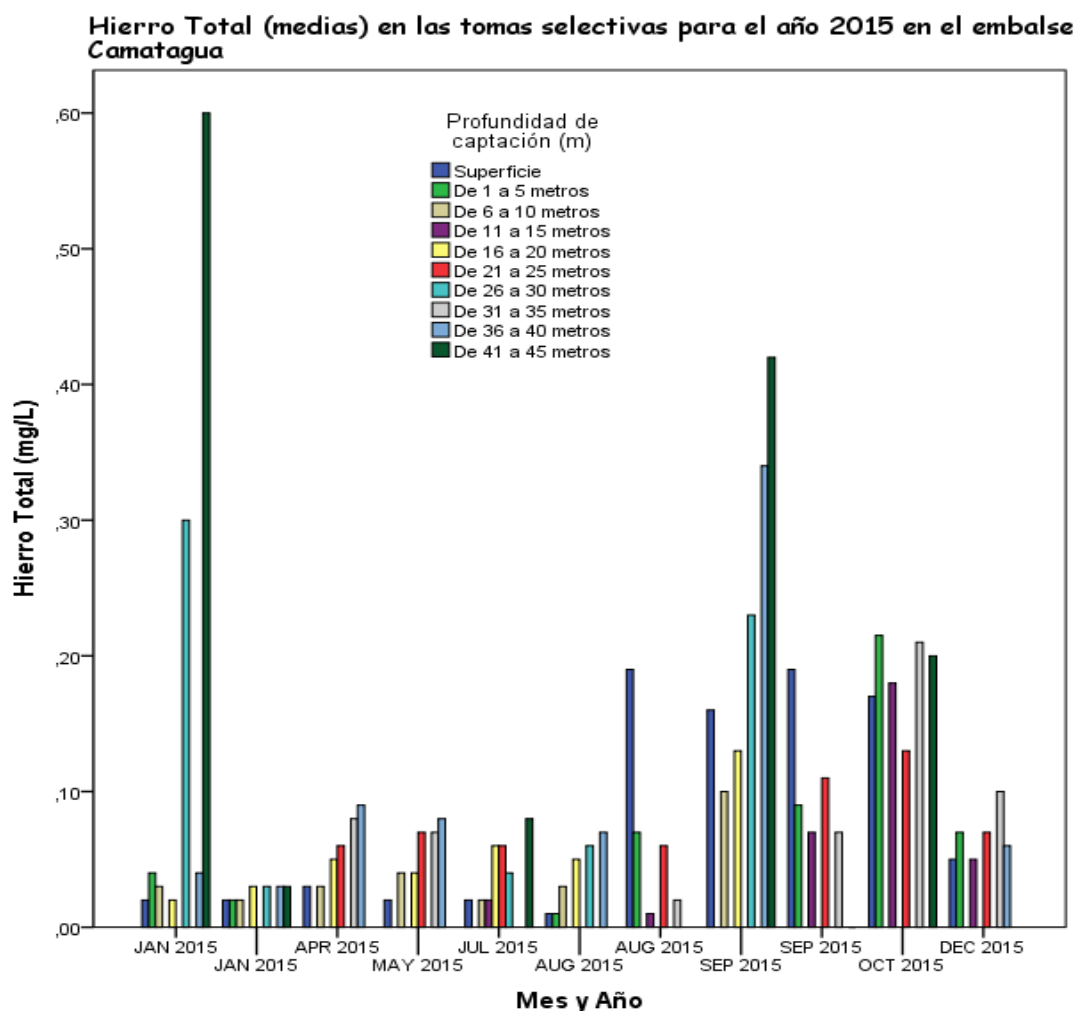
Gráfica N° 21 Conductividad específica (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.

A lo largo del año 2015 el parámetro Conductividad Específica no evidenció cambios notables en su comportamiento, en la tabla N° 5 es presentado su valor medio el cual corresponde a 349 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se aprecia en la gráfica N° 21 dos valores anormalmente altos, en el mes de abril “De 31 a 35 metros” y en el mes de octubre “De 41 a 45 metros” podría deberse a alguna corriente de fondo en el momento de la medición provoco este valor anómalo.



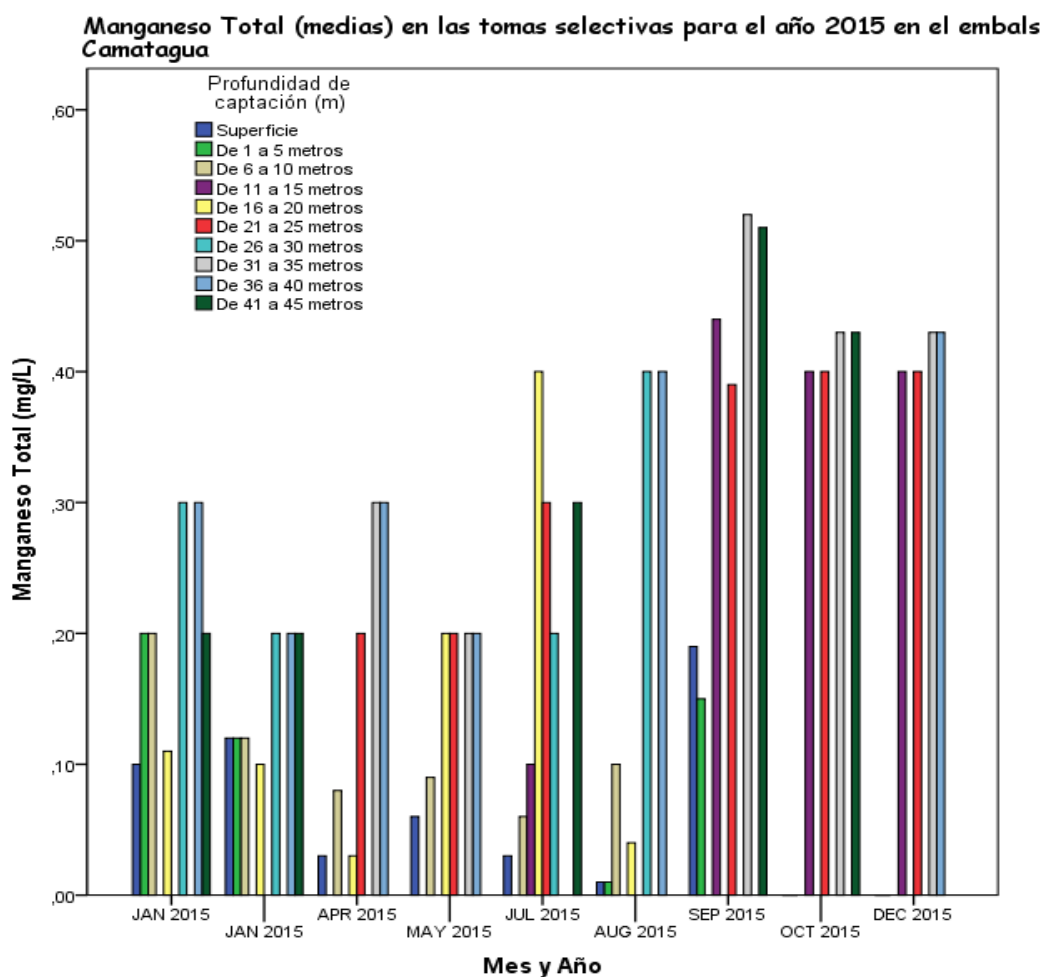
Gráfica N° 22 Color Aparente (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.

En cuanto al valor del Color Aparente, en los 4 muestreos realizados en el mes de agosto (2 muestreos) y septiembre (2 muestreos), justamente es observado el mismo evento que para el parámetro Turbiedad, en los mismos meses, Época de Invierno”, promovido por el leve aumento en el nivel de las aguas del embalse.



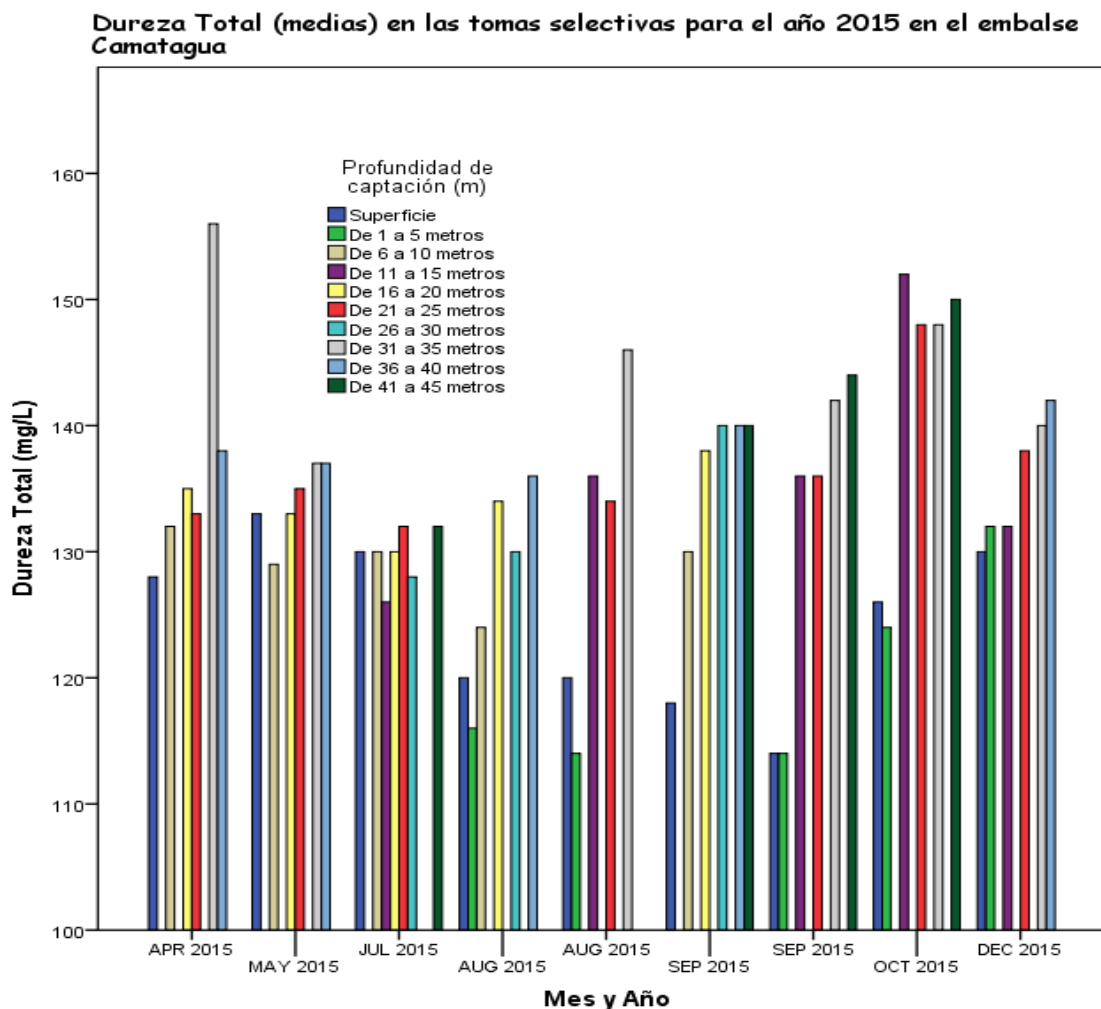
Gráfica N° 23 Hierro Total (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.

Para el parámetro Hierro Total no existe una tendencia evidente en su comportamiento químico para el 2015. Se observa un valor de alta concentración con respecto a todas las concentraciones reflejadas en la gráfica N° 23, en el mes de enero “Época de Verano” y en la profundidad “De 41 a 45 metros”. Sin embargo, para los meses de septiembre y octubre es apreciable un leve aumento en las concentraciones.



Gráfica N° 24 Manganeso Total (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.

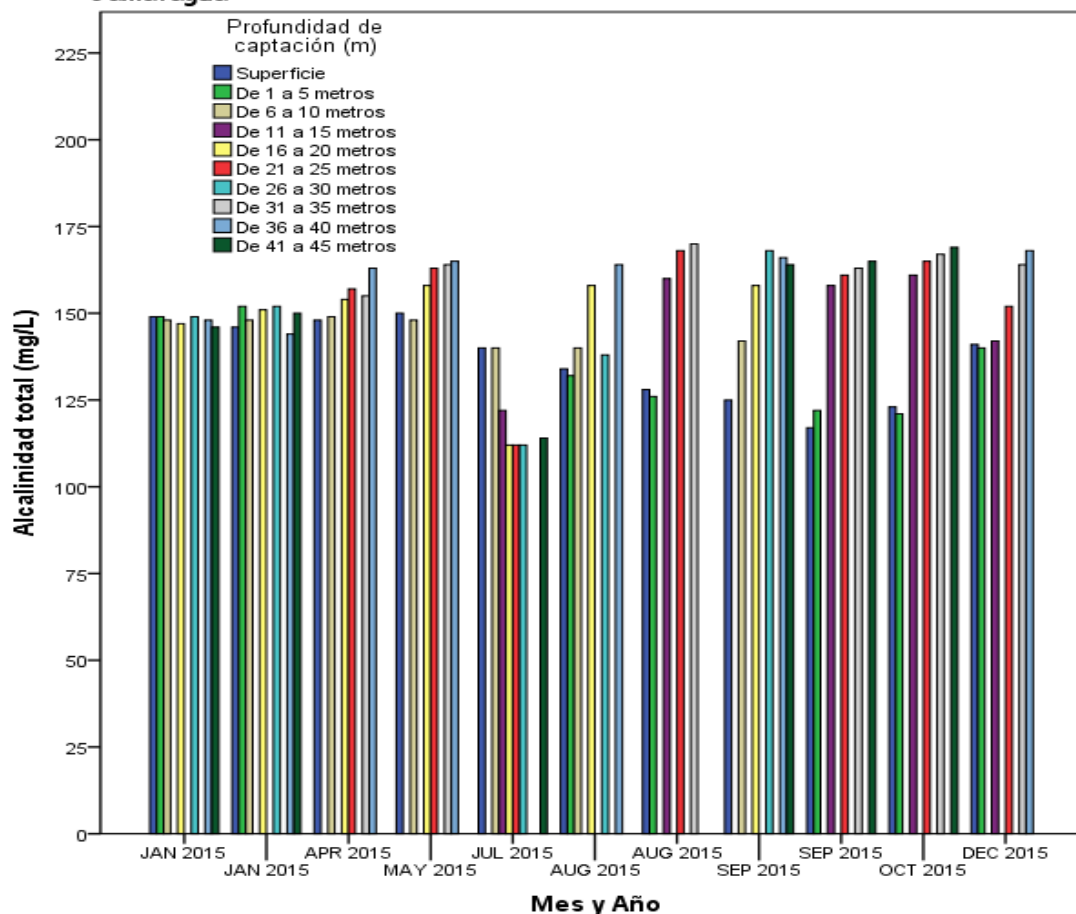
El Manganeso es una especie química que tiene comportamiento similar al Hierro Total, en sus forma de migración y distribución, en el mes de septiembre y octubre “Época de Invierno” y en las últimas profundidades “De 36 a 40 metros” y “De 41 a 45 metros” se obtuvieron las mayores concentraciones de este metal.



Gráfica N° 25 Dureza Total (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.

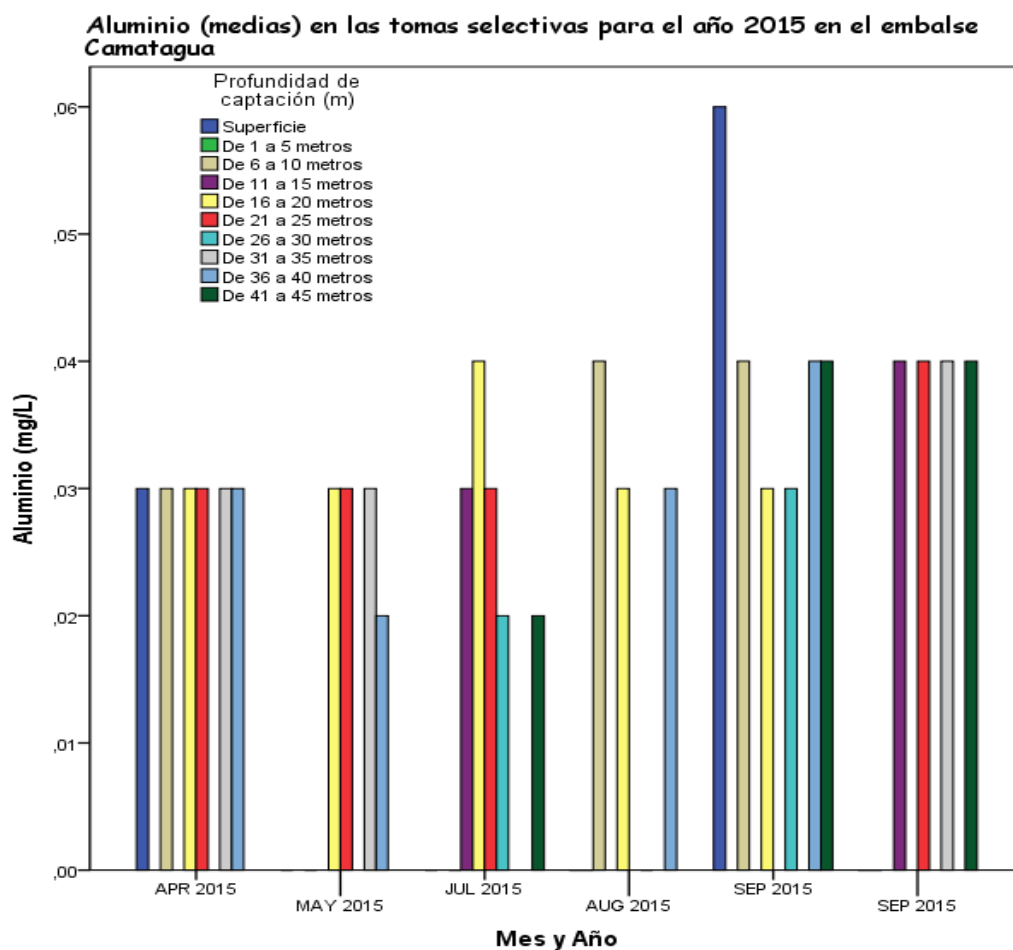
La Dureza Total no mostró diferencias notables estacionalmente ni en las concentraciones obtenidas a diferentes profundidades, en promedio el valor de este parámetro es 133 mgCaCO₃/l lo cual indica aguas con una dureza de moderada a alta.

Alcalinidad Total (medias) en las tomas selectivas para el año 2015 en el embalse Camatagua



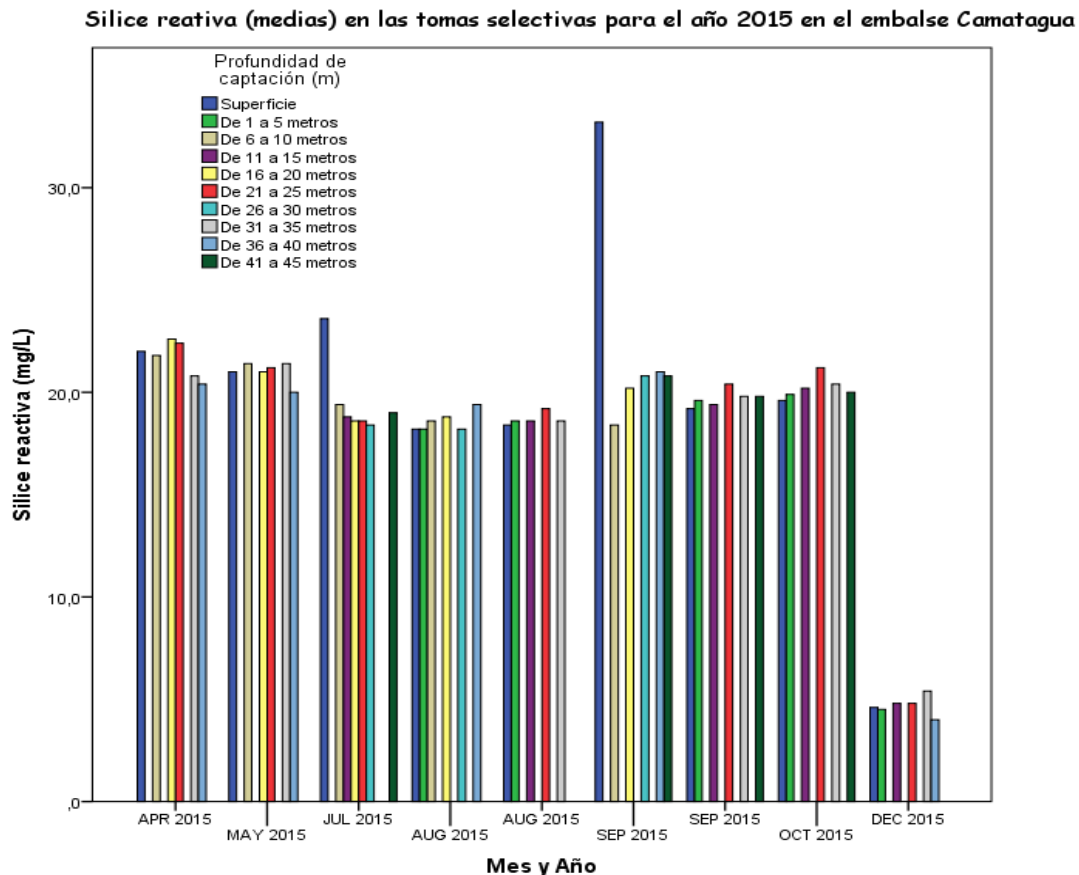
Gráfica N° 26 Alcalinidad Total (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.

El parámetro Alcalinidad Total presentó un valor medio de 147 mgCaCO₃/l y se presenta en la gráfica sin variaciones drásticas en su comportamiento químico en todo el año 2015. Por esta concentración se puede inferir que las aguas del embalse Camatagua en el año 2015 presentaron una capacidad media para neutralizar ácidos.



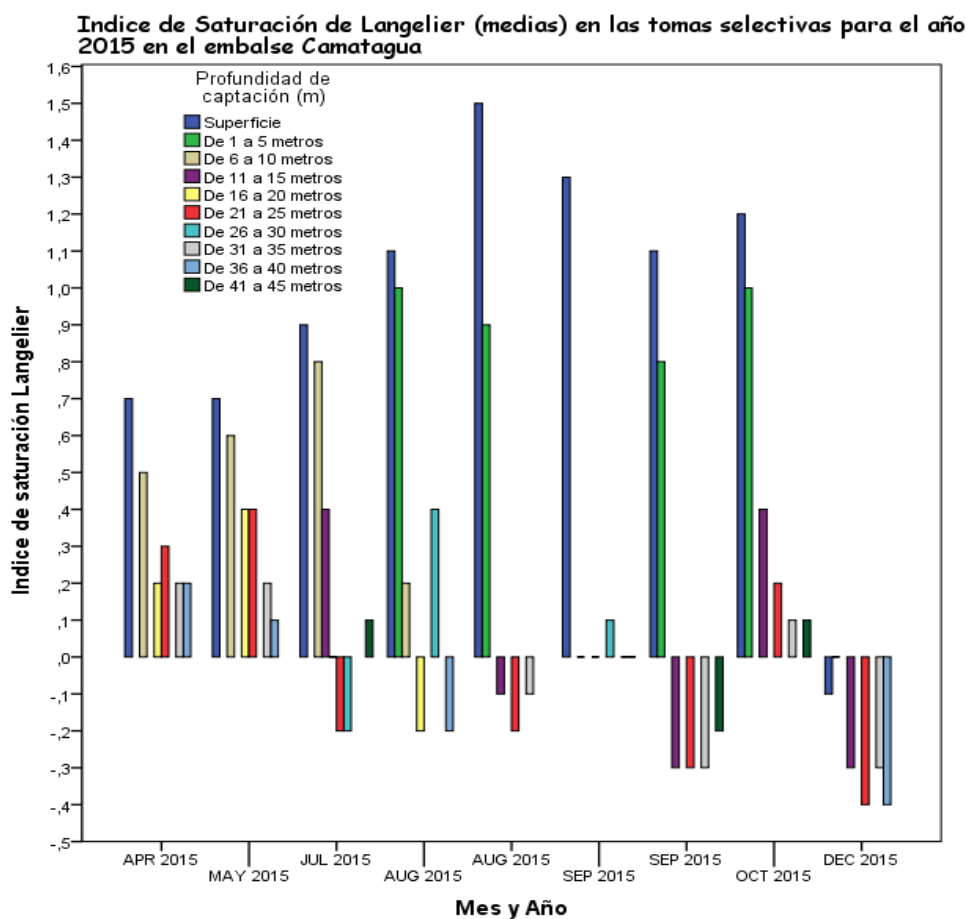
Gráfica N° 27 Aluminio (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.

Para el metal Aluminio no se obtuvieron diferencias químicas destacables en el año 2015, probablemente generado por los pocos datos procesados. El valor medio de este parámetro físico químico fue 0.025 mg/l.



Gráfica N° 28 Sílice reactiva (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.

El parámetro físico químico Sílice reactiva, mostró una disminución notable para el mes de diciembre, sin embargo a lo largo del año presentó tendencias uniformes en cuanto a su concentración. Es importante mencionar que el mes de enero y diciembre de 2015 por observaciones *in situ* en la captación de muestras el reservorio estaba atravesando un “Bloom”, es decir, sobre crecimiento del plancton, esta inferencia se realiza inicialmente por el color verde intenso que presentaba el epilimnio (estrato superior), y la disminución de esta concentración podría deberse a la relación inversamente proporcional que existe entre las diatomeas y la sílice reactiva, nutriente esencial de esta especie.

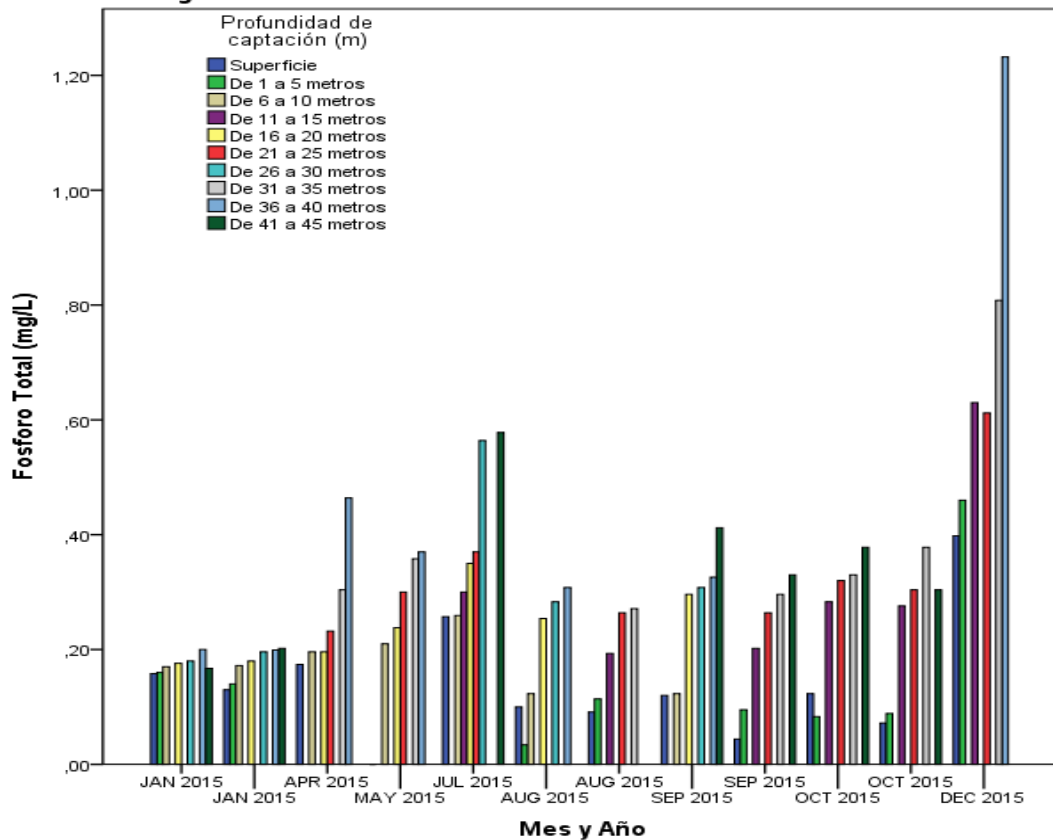


Gráfica N° 29 índice de Saturación Langelier (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.

El Índice de Saturación de Langelier, es un valor calculado que indica la tendencia del agua a precipitar o disolver carbonato de calcio, en promedio las aguas del embalse Camatagua presenta un índice de + 0.27, es decir con tendencia precipitar carbonato de calcio, tendencia incrustante.

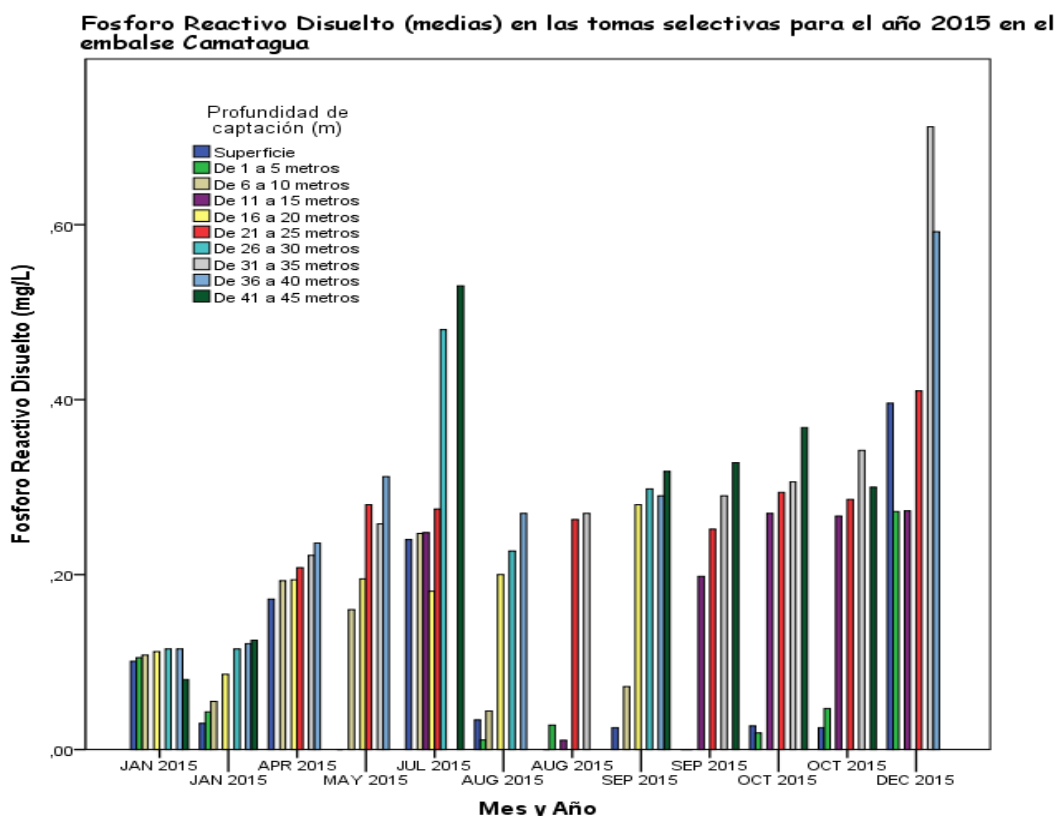
Los valores de los parámetros ya anteriormente estudiados como el pH, Alcalinidad y Dureza Total fortalecen la interpretación de este resultado.

Fosforo Total (medias) en las tomas selectivas para el año 2015 en el embalse Camatagua



Gráfica N° 30 Fósforo total (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.

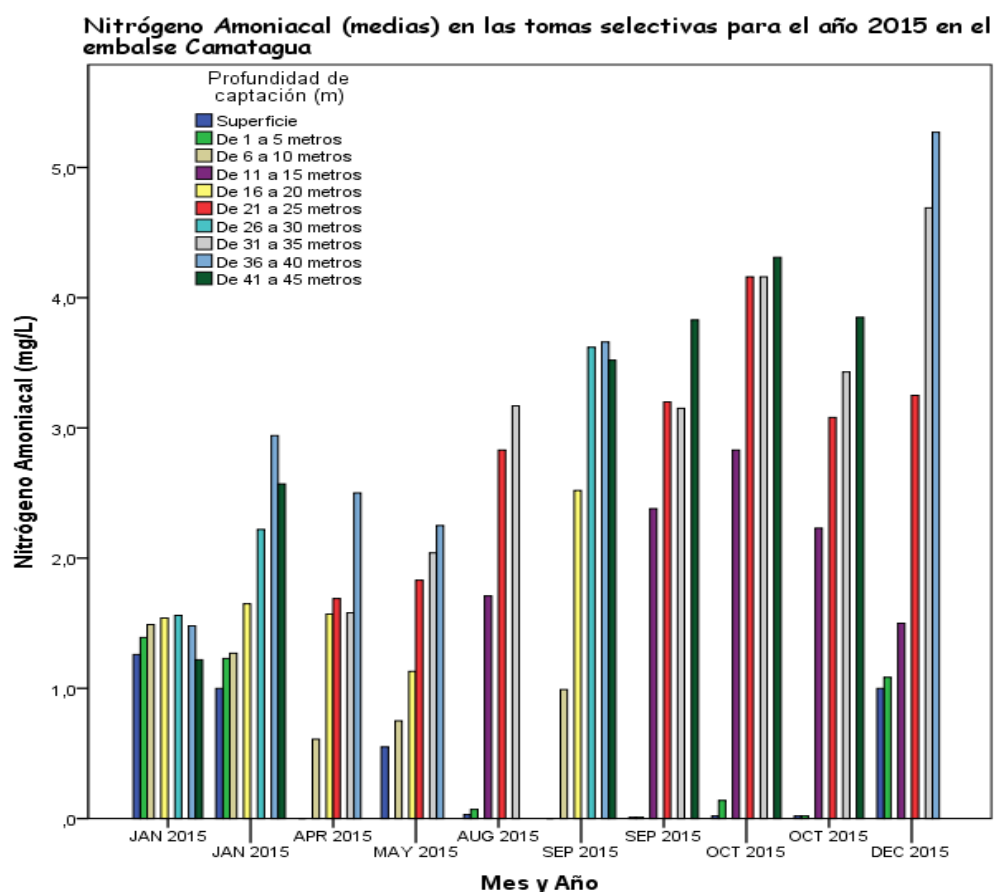
El Fósforo nutriente esencial para el crecimiento planctónico, en el año 2015 tuvo un valor medio de 0.268 mg/l. En este caso el fosforo total mostró bajas concentraciones con respecto al resto del año 2015, debido al evento Bloom en el reservorio con la consecuente disminución de este parámetro químico pero principalmente de su forma reactiva disuelta. Sin embargo, la forma Fósforo Total es un indicador para inferir el comportamiento relativo al Bloom.



Gráfica N° 31 Fósforo reactivo total (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.

El Fósforo Reactivo Disuelto, el cual constituye la especie de ortofosfato inmediatamente disponible para la biota, evidenció un comportamiento similar al Fósforo Total, reafirmando la hipótesis del sobre crecimiento algal en el mes de enero. El valor medio de esta especie se ubicó en 0.132 mg/l.

El Fósforo Total y Reactivo Disuelto tiende a homogeneizarse entre enero y marzo en la columna de agua, según González 2015 producto de la circulación de las aguas en el embalse.

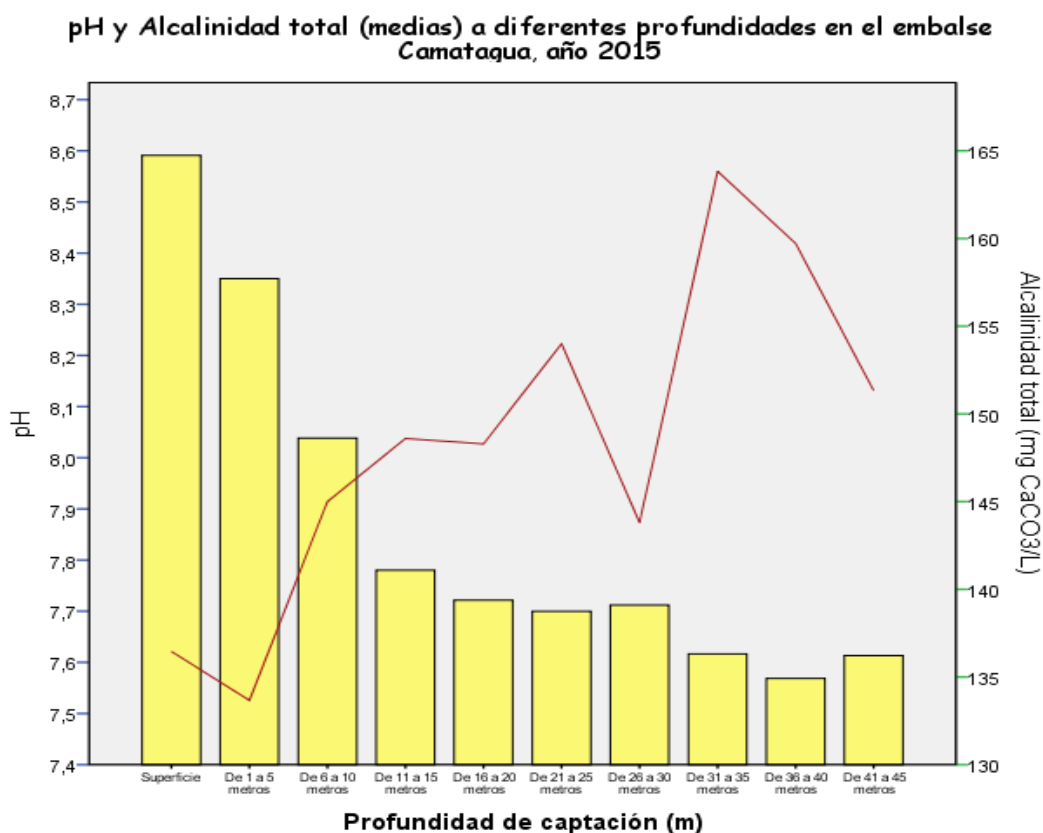


Gráfica N° 32 Nitrógeno amoniacal (medias) obtenida en las tomas selectivas durante el año 2015 en el embalse Camatagua.

Otra especie química fundamental para el estudio del sobre crecimiento planctónico por su característica de nutriente, especie reducida del nitrógeno se presenta el Nitrógeno Amoniacal, se puede destacar el mismo comportamiento que para el Fósforo Total y Reactivo Disuelto, es decir uniformidad a lo largo de toda la columna de agua en el mes de enero, situación que reafirma la hipótesis de las circulación de las aguas por acción de los vientos en el periodo entre enero y marzo, “Época de Verano”.

IV.III.II- Estudio de parámetros físico químicos, de acuerdo a la variable de agrupación “Profundidades de captación de muestras en las tomas selectivas del perfil vertical del Embalse Camatagua”.

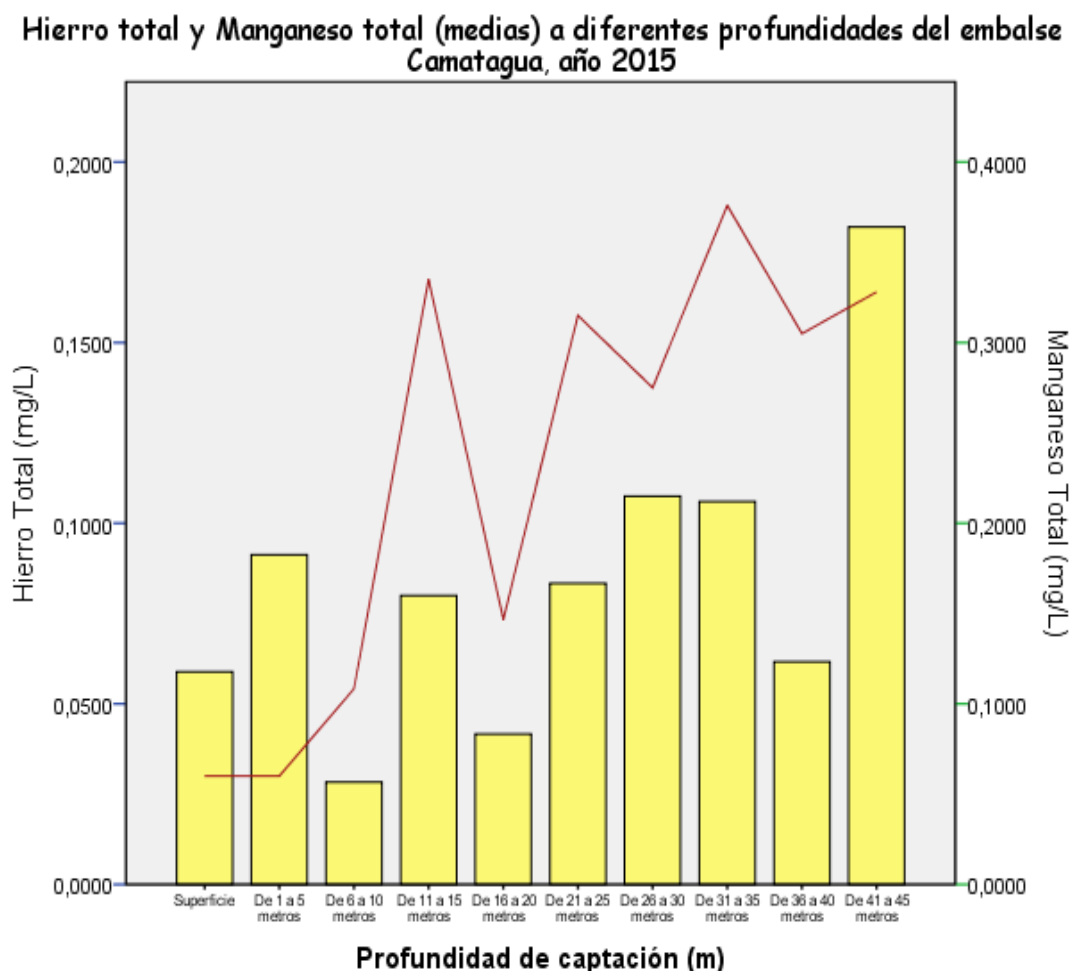
A fin de confirmar algunos comportamientos de los parámetros físico químicos estudiados son expuestas algunas gráficas para ilustrar las distribuciones químicas y las relaciones entre algunas especies químicas, en este apartado fue evaluada únicamente la variable de agrupación “Profundidades de captación de muestras en las tomas selectivas del perfil vertical del Embalse Camatagua” sin incluir la variable de agrupación Época climática.



Gráfica N° 33 pH y Alcalinidad total (medias) a diferentes profundidades en el embalse Camatagua, año 2015

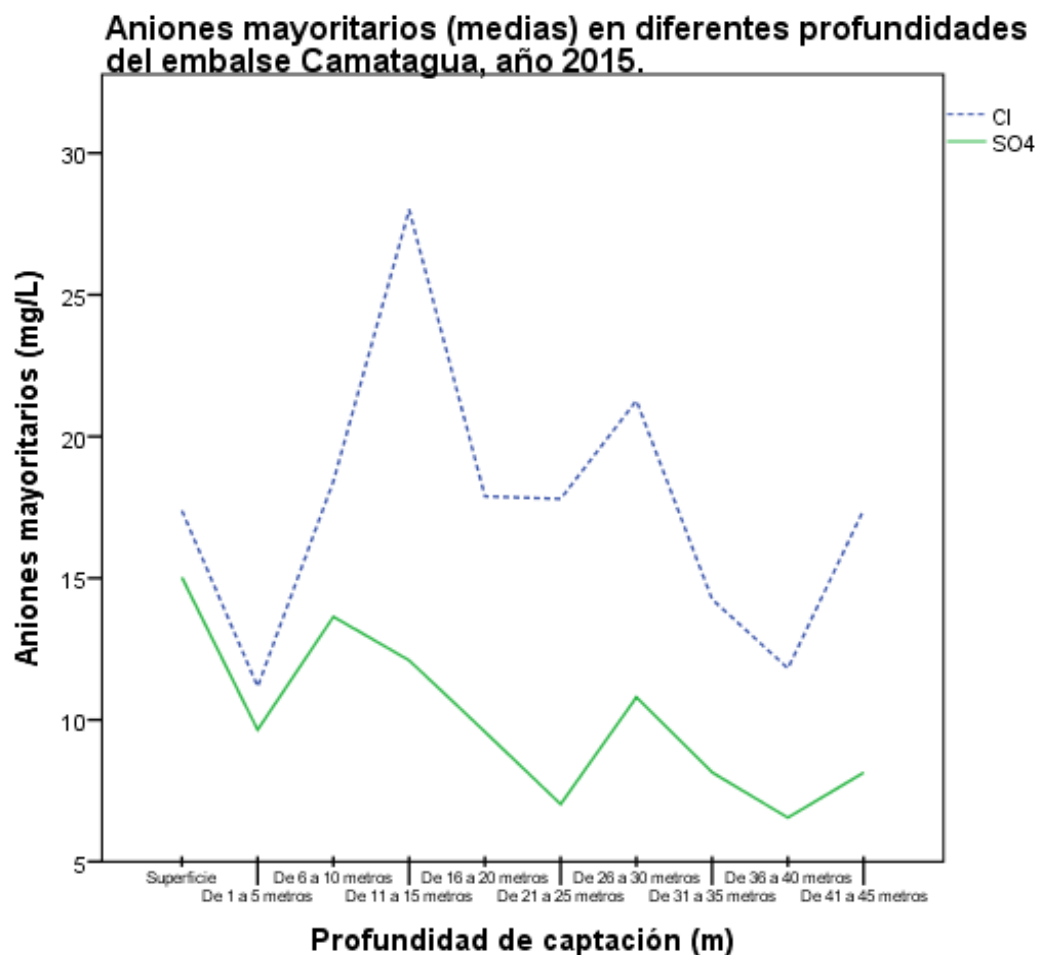
En la gráfica N°33 de ejes dobles se aprecia la relación a diferentes niveles de profundidad en el año 2015, entre el parámetro pH (representado por las barras de color amarillo) y Alcalinidad Total (línea roja), en este sentido la tendencia a medida que aumenta el pH es a disminuir la Alcalinidad Total. En el nivel de profundidad “Superficie” el pH registra el valor más elevado en el 2015 mientras que en los

mayores niveles de profundidad “De 36 a 40 metros” hasta “De 41 a 45 metros” son reportados los valores más bajos en este parámetro, situación contraria ocurre para el comportamiento de la Alcalinidad Total.



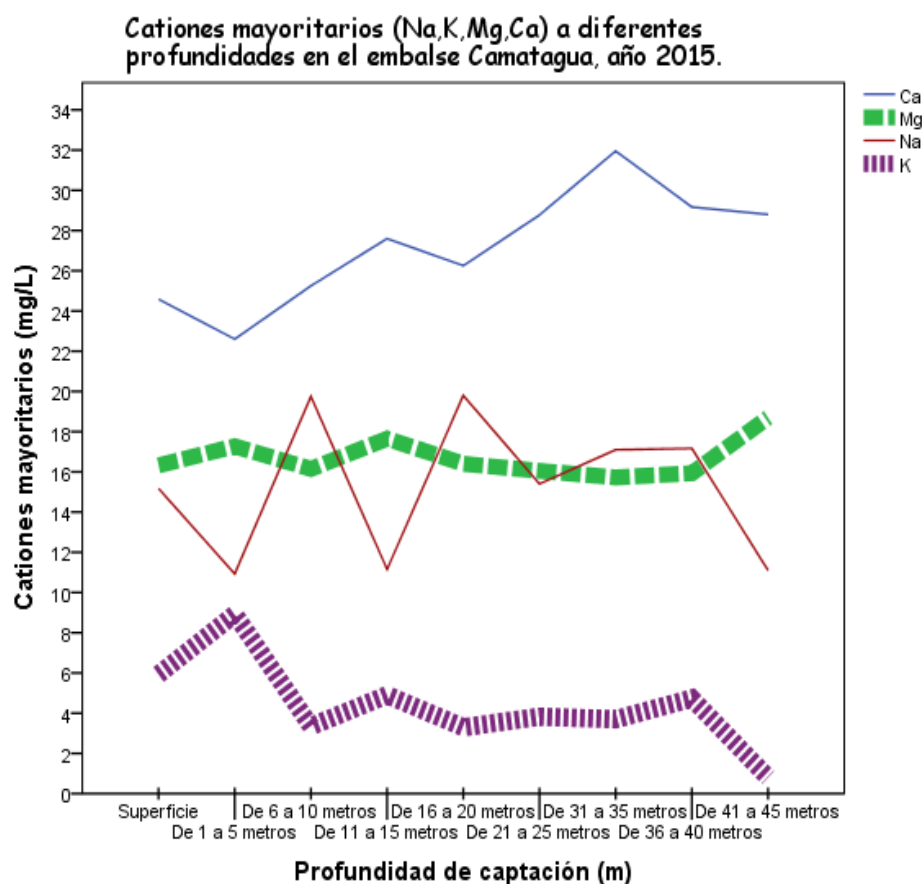
Gráfica N° 34 Hierro total y Manganeseo total (medias) a diferentes profundidades del embalse Camatagua, año 2015.

Con respecto a los metales Hierro Total (representado por las barras de color amarillo) y Manganeseo Total (representado por las líneas rojas) gráfica N°34, ha sido registrado un comportamiento similar en su migración a lo largo de toda la columna de agua, de esta manera es apreciable el incremento en ambas especies químicas conforme aumenta el nivel de profundidad, específicamente en la profundidad “De 41 a 45 metros”, por otra parte “De 16 a 20 metros” se puede visualizar una disminución de ambos parámetros de manera uniforme.



Gráfica N° 35 Aniones mayoritarios (medias) en diferentes profundidades del embalse Camatagua, año 2015.

Al estudiar los aniones mayoritarios Cloruros (representada por la línea punteada azul) y Sulfatos (representada por la línea continua verde), si bien las concentraciones no siguen un patrón de tendencia definido de acuerdo a las profundidades, se puede afirmar que entre estos dos aniones existe una tendencia proporcional de acuerdo a la magnitud en la que varía su concentración en la columna de agua, resultando evidente la mayor proporción del anión cloruros.



Gráfica N° 36 Cationes mayoritarios (Na,K, Mg,Ca) a diferentes profundidades en el embalse Camatagua, año 2015.

Por último es presentada la relación correspondiente al Sodio (línea roja continua), Calcio (línea azul continua), Magnesio (línea de cuadros verdes) y Potasio (línea discontinuas moradas). En este caso, no resulta clara alguna relación al observar el gráfico, ni desde el punto de vista de las proporcionalidades en las concentraciones propias de cada catión respecto a otro y tampoco relativo a la distribución de cada especie química en toda la columna de agua.

IV.III.III- Estudio de los parámetros físico químicos utilizando la variable de agrupación Época climática (Verano, Invierno), por medio de comparación de medias (T de student) y ANOVA.

La explicación de la técnica estadística utilizada fue presentada en el marco metodológico. La siguiente tabla presenta el resumen de las pruebas estadísticas.

Parámetro Físico químico	Normalidad						Varianzas			
	Prueba de Normalidad (cálculo del p valor)		Contraste con p (valor) y α (0,05)		¿Se distribuye normal?		Prueba de Levene (Homogeneidad)		¿Varianzas iguales?	
	Kolmogorov- Smirnov (mayor de 30 datos)	Shapiro Wilk (menor de 30 datos)	p> α	p< α	SI	NO	p> α (0,05)	p< α (0,05)	SI	NO
Transparencia		0,00		✓		V	✓		✓	
Conductividad Específica	0,015			✓		I		✓		✓
Color Aparente	0,00			✓		I		✓		✓
Color Verdadero	0,00			✓		I	✓		✓	
Turbiedad	0,00			✓		I		✓		✓
Alcalinidad total	0,00			✓		I		✓		✓
Dureza Total		0,346 .V	✓			V	✓		✓	
Índice de Saturación Langelier		0,106 .V	✓			V		✓		✓
pH		0,195 .V	✓			V		✓		✓
Aluminio		0,00		✓						
Hierro total	0,00			✓			✓		✓	
Manganeso total		0,64 .V	✓			V	✓		✓	
Calcio		0,306 .V	✓			V	✓		✓	
Magnesio		0,892 .V	✓			V	✓		✓	
Sodio		0,496 .V	✓			V		✓		✓
Potasio		0,304 .V	✓			V	✓		✓	
Cloruro		0,315 .V	✓			V		✓		✓
Sulfato		0,432 .V	✓			V		✓		✓
Bicarbonato		0,369 .V	✓			V		✓		✓
Fluoruro		0,140 .V	✓			V	✓		✓	
Sílice reactiva		0,595 .V	✓			V	✓		✓	
Nitrato	0,00			✓			✓		✓	
Nitrito	0,00			✓				✓		✓
Nitrógeno amoniaco	0,026			✓		I		✓		✓
Fósforo total	0,085 (I)		✓			I		✓		✓
Fósforo disuelto total	0,008			✓		I	✓		✓	
Fósforo reactivo disuelto	0,00			✓		I		✓		✓

Tabla N° 9 Comparación de medias y ANOVA, V=Verano, I= Invierno

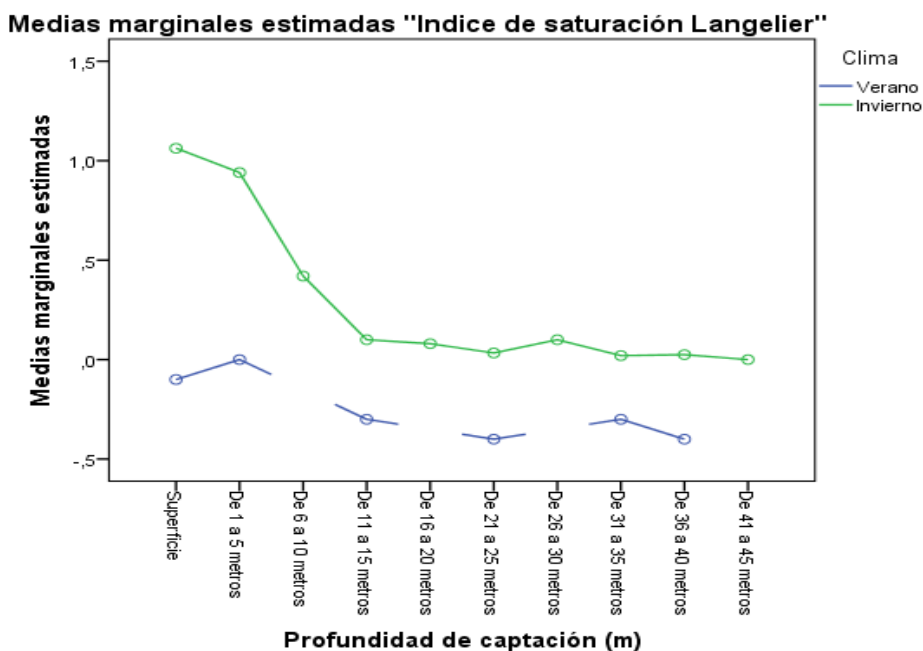
Parámetro Físico químico	Prueba T Student (Comparación de medias)	
	p>α (0,05)	p<α (0,05)
Transparencia	✓	
Conductividad Específica	✓	
Color Aparente	✓	
Color Verdadero		✓
Turbiedad	✓	
Alcalinidad total	✓	
Dureza Total	✓	
Índice de Saturación		✓
Langelier		✓
pH		✓
Aluminio	✓	
Hierro total	✓	
Manganeso total	✓	
Calcio	✓	
Magnesio	✓	
Sodio		✓
Potasio		✓
Cloruro		✓
Sulfato	✓	
Bicarbonato	✓	
Fluoruro	✓	
Sílice reactiva		✓
Nitrato	✓	
Nitrito	✓	
Nitrógeno amoniacal	✓	
Fósforo total	✓	
Fósforo disuelto total	✓	
Fósforo reactivo disuelto	✓	

Tabla N° 10 Prueba T de student

De los parámetros físico químicos evaluados sólo 3 se enmarcaron en la hipótesis planteada, es decir, existen diferencias estadísticamente significativas con las Épocas climáticas. En este sentido los parámetros físico químicos pH, Índice de Saturación de Langelier y Cloruros cumplieron con las premisas establecidas: 1.- Se distribuyen de manera normal (Normalidad), 2.- Presentan varianzas estadísticamente significativas (Prueba de Levene), es decir, su comportamiento no obedece a la aleatoriedad y 3.- Al comparar medias (Prueba *T* de Student), el valor de significancia obtenido (*p*-valor) fue menor a 0,05 por ende se cumple la hipótesis alternativa H_1 del paso 1 (Planteamiento de hipótesis) existen diferencias significativas en los parámetros pH Índice de Saturación de Langelier y Cloruros con la Época Climática.

Para sintetizar, el pH, el Índice de Saturación de Langelier y los Cloruros presentan un comportamiento que se relaciona con la época de verano en el embalse Camatagua, no son aleatorios los resultados obtenidos en estos parámetros para la mencionada época climática.

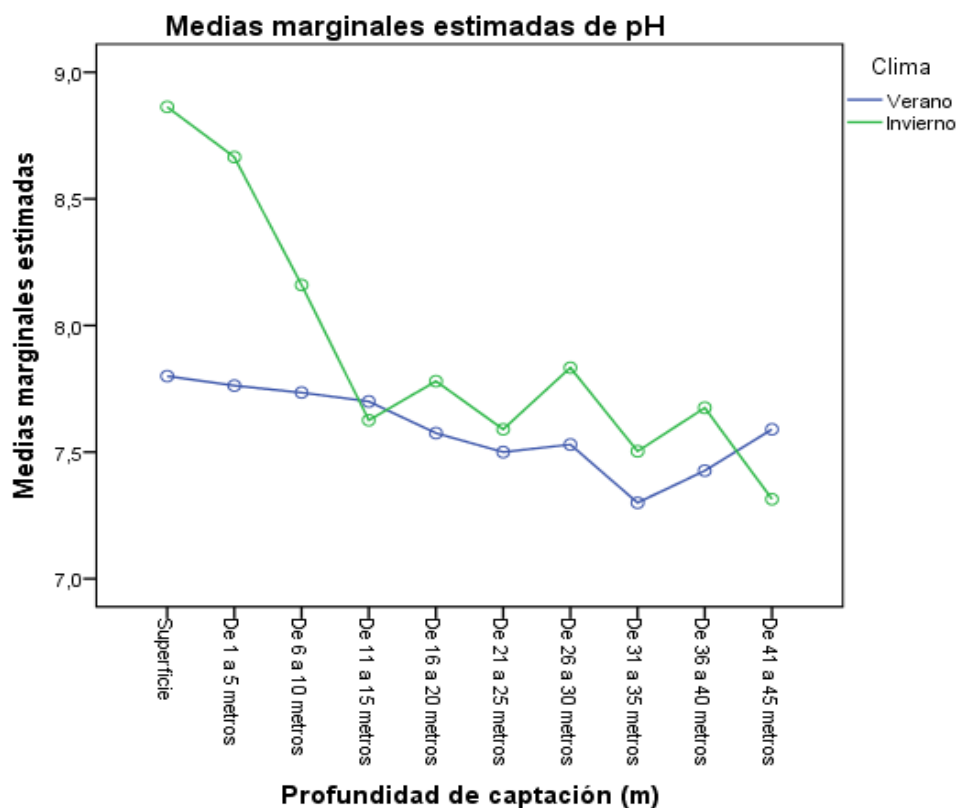
La aplicación de ANOVA se aplicó a los parámetros que no responden a aleatoriedades, dando como resultados las siguientes gráficas de análisis de varianzas.



Las medias no estimables no se trazan.

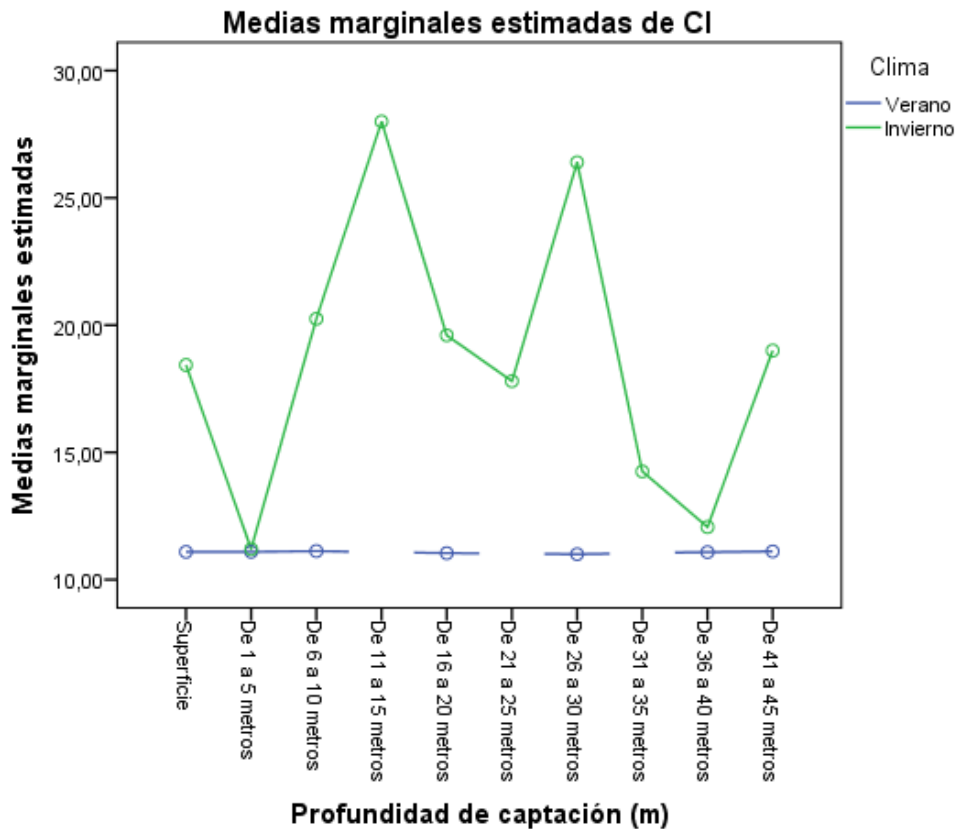
Gráfica N° 37 Medias marginales estimadas Índice de Saturación de Langelier

El ANOVA para el Índice de Langelier, se aprecia con tendencias de incremento y disminución en los diferentes niveles de profundidad en ambas épocas climáticas, por otra parte fueron registradas algunas medias no estimables, las cuales el software estadístico omite.



Gráfica N° 38 Medias marginales estimadas pH

Para el caso del pH, las medias marginales estimadas presentaron para la época de verano una leve disminución hasta aproximadamente el nivel “De 26 a 30 metros”, no así para la Época de Invierno donde comportamiento fue más disperso.



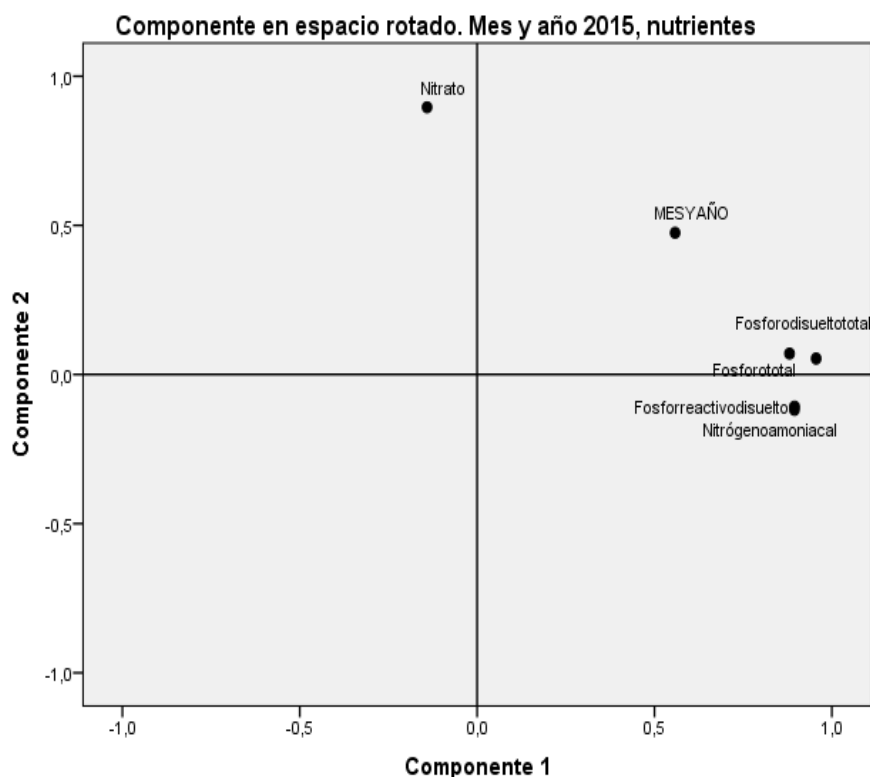
Las medias no estimables no se trazan.

Gráfica N° 39 Medias marginales estimadas Cloruros

Para concluir, el Cloruro presentó linealidad en su comportamiento durante la época de verano, lo cual reafirma la hipótesis planteada en apartados anteriores, situación contraria es apreciada para la Época de Invierno, de acuerdo a los distintos niveles de profundidad.

IV.III.IV.- Estudio de los parámetros físico químicos utilizando el modelo de análisis factorial, Análisis de Componentes Principales (ACP).

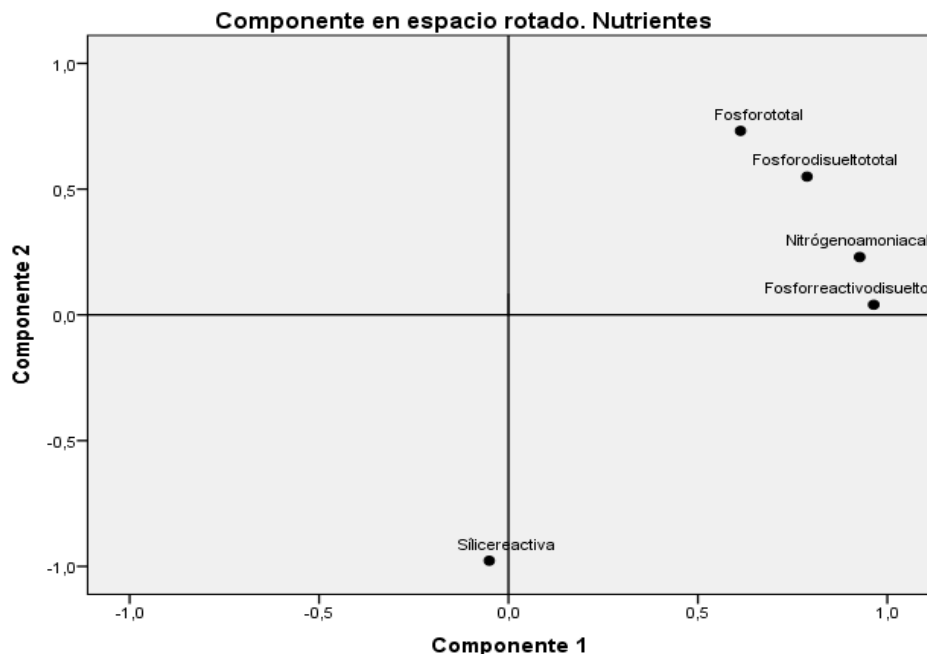
La explicación de la técnica estadística utilizada fue presentada en el marco metodológico.



Gráfica N° 40 Componentes en espacio rotado. Mes y año 2015, nutrientes.

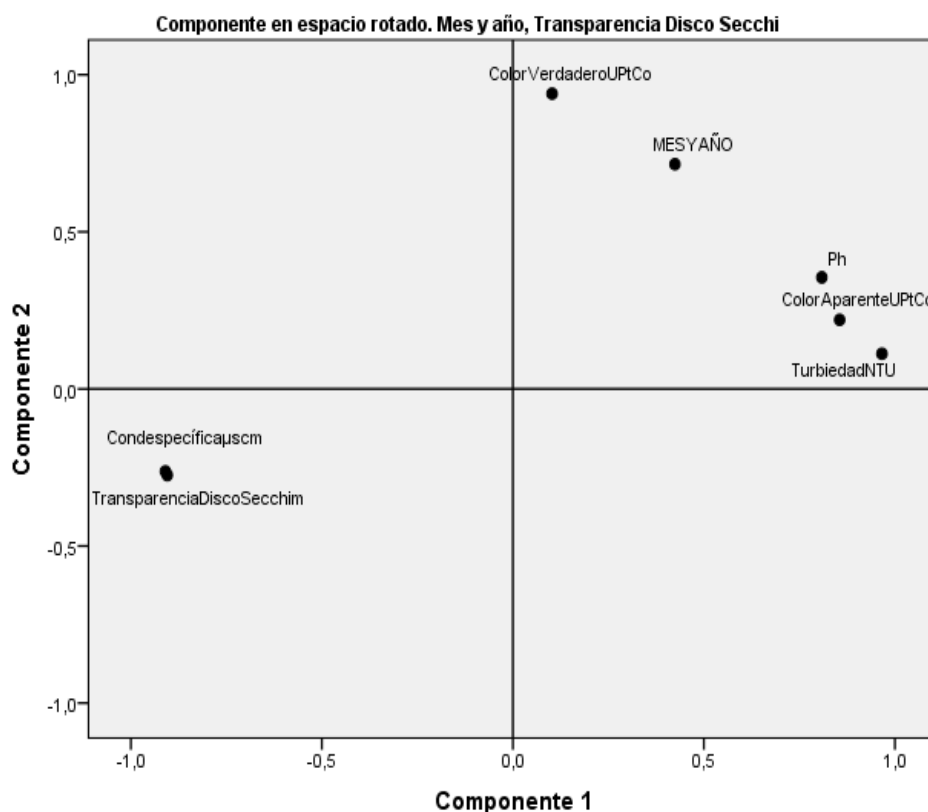
En la gráfica N°40 de ACP fueron obtenidos dos componentes principales para agrupar (Componente 1 y Componente 2). La reducción de variables en este caso fue basada en agrupar y observar el comportamiento de las especies que son utilizadas como nutrientes en el cuerpo de agua (Nitratos, Nitrógeno Amoniacal, Fósforo Total, Fósforo Disuelto Total y Fósforo Reactivo Disuelto) en base a la estacionalidad climática (Época de Invierno y Época de Verano). Es apreciable la cercanía existente entre el Nitrógeno Amoniacal, Fósforo Total, Fósforo Disuelto Total y Fósforo Reactivo Disuelto, como nutrientes agrupados, el Nitrato un poco más alejado de este grupo y resaltando la similitud en distancia euclidiana (distancia utilizada en esta técnica estadística) entre la variable “Mes y Año”, es decir la estacionalidad climática y los nutrientes objeto de estudio. Es importante mencionar que tanto la Sílice Reactiva como el Nitrito (que pueden formar parte de nutrientes) fueron incluidos en el ACP, sin

embargo el agrupamiento estadístico no los categorizo dentro de estos grupos. Para explicar dicho comportamiento aplicamos la técnica, pero sin incluir la estacionalidad climática, cuya gráfica es mostrada a continuación.



Gráfica Nº 41 Componentes en espacio rotado. Nutrientes

El comportamiento de los nutrientes Nitrógeno Amoniacal, Fósforo Total, Fósforo Disuelto Total y Fósforo Reactivo Disuelto resulta similar al gráfico anterior, sin embargo, es destacable la inclusión de la Sílice Reactiva, alejada en distancia de los nutrientes anteriormente mencionados pero insertada en la agrupación. Adicionalmente la técnica estadística excluyó los parámetros Nitratos (que estuvo presente cuando evaluamos la estacionalidad climática) y Nitritos, en este último se puede inferir que no representa una característica notable al evaluar los nutrientes en el cuerpo de agua.

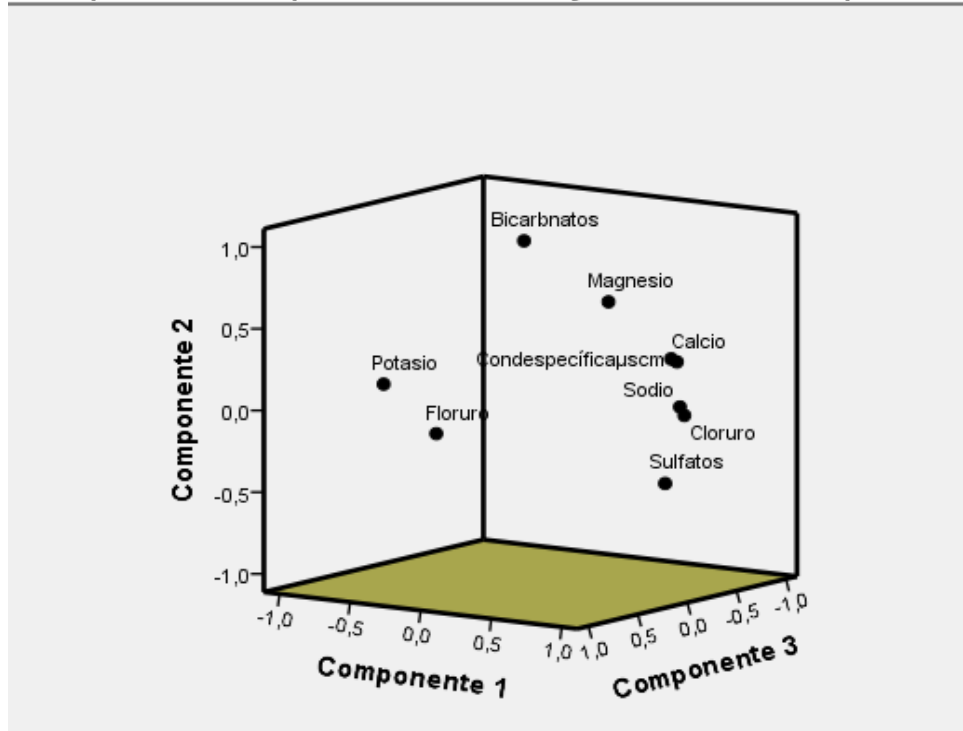


Gráfica N° 42 Componentes en espacio rotado. Mes y año, Transparencia Disco Sechhi

Para esta agrupación bidimensional fueron incluidos los parámetros organolépticos (pH, Color Aparente, Color Verdadero y Turbiedad) además de la Conductividad Específica y la Transparencia, fue obtenida una relación estrecha entre la Conductividad Específica y la Transparencia, la densidad de iones en solución en los estratos superiores del embalse (ya que la Transparencia es medida en la superficie) puede restar Transparencia en alguna proporción y ocasionar la interposición en el Análisis de Componentes Principales. Por otra parte los parámetros organolépticos se encuentran apareados muy cercanos (según la distancia euclidiana) a la estacionalidad climática.

Debido al comportamiento presentado por la Conductividad Específica fue realizado el análisis con las especies iónicas que están relacionadas con este parámetro, las cuales corresponden a: Cloruros, Sulfatos, Sodio, Potasio, Fluoruro, Bicarbonato, Magnesio y Calcio, resultando en la siguiente gráfica.

Componente en espacio rotado. Iones y Conductividad específica



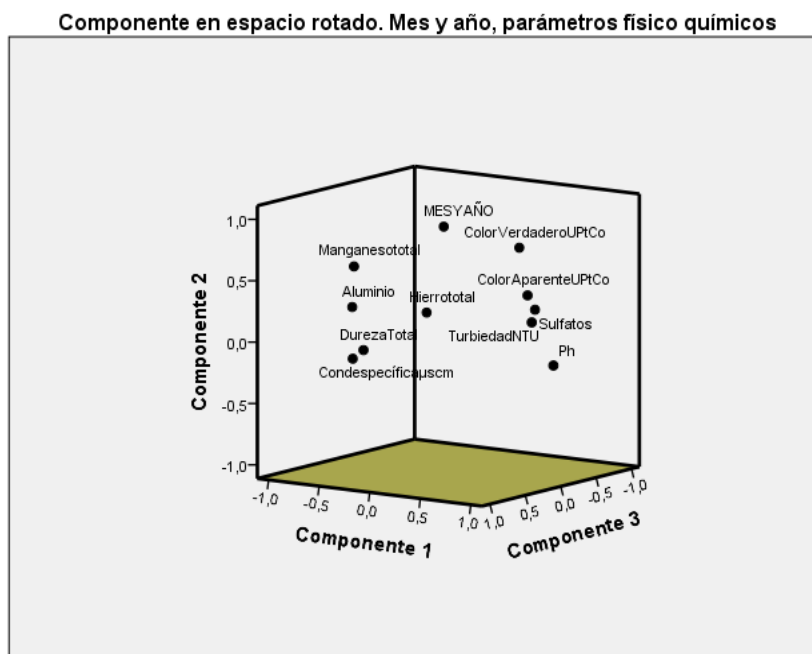
Gráfica N° 43 Componente en espacio rotado. Iones y Conductividad específica

La agrupación tridimensional (gráfica N°43) presenta relaciones que pueden explicarse químicamente mediante reacciones, la Conductividad Específica interpuesta con el Calcio, este catión mayoritario aporta magnitud al parámetro Conductividad Específica, por otra parte se observa el solapamiento entre el Cloruro y el Sodio, los cuales podrían estar relacionados por la Disolución de Halita (cloruro de sodio), con la reacción presentada a continuación: $NaCl = Na^{+} + Cl^{-}$, adicionalmente el ión bicarbonato que junto al carbonato controla los equilibrios de precipitación y/o disolución del carbonato de calcio, mediante la siguiente reacción química: -Disolución del carbonato $CaMg(CO_3)_2 + 2H^{+} = Ca^{+2} + Mg^{+2} + 2HCO_3^{-}$

Y por último especies minoritarias agrupadas al extremo izquierdo de la gráfica como el Fluoruro y Potasio.

Seguidamente será presentada la gráfica N° 44 tridimensional incluyendo la variable estacionalidad climática con todos los parámetros organolépticos, variando con respecto al gráfico bidimensional N° 42, ya que no fue incluida la Transparencia (en la gráfica N° 44), ya que este parámetro es para caracterizar el embalse *in situ* y no tiene

repercusiones directas en la salud humana como los parámetros estudiados en este gráfico, los cuales comprenden: Color Verdadero, Color Aparente, Manganeseo Total, Hierro Total, Aluminio, Sulfato, Turbiedad, Conductividad Específica (no es un parámetro organoléptico) y pH.



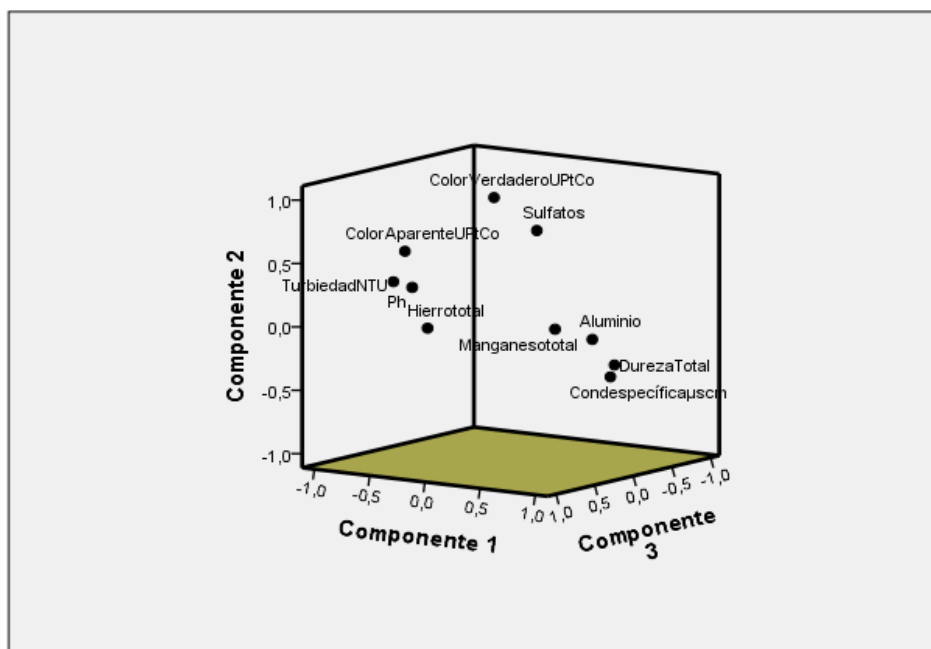
Gráfica N° 44 Componente en espacio rotado. Mes y Año y Parámetros físico químicos

Se pueden distinguir dos grupos claramente definidos, hacia el extremo izquierdo Manganeseo Total, Conductividad Específica, Dureza Total y Aluminio, para el extremo derecho Color Verdadero y Aparente, pH, Sulfatos y Turbiedad y en la mitad la variable de agrupación referida a la estacionalidad climática, al igual que el parámetro Hierro Total.

Para culminar el ACP, es presentado la gráfica N° 45 sin incluir la variable de agrupación estacionalidad climática, lo cual se traduce en exponer los parámetros organolépticos estipulados en la Norma Sanitaria de Calidad del Agua Potable, a fin de observar sus tendencias de agrupación.

Al visualizar el gráfico se pueden establecer tres grupos principales constituidos por Manganeseo Total, Conductividad Específica, Dureza Total y Aluminio (parte inferior derecha), Color Aparente, Turbiedad, Hierro Total y pH (parte izquierda) y Color Verdadero y Sulfatos (en la parte superior).

Componente en espacio rotado. Componentes Organolépticos, según NSCAP



Gráfica N° 45 Componente en espacio rotado. Componentes Organolépticos, según NSCAP

IV.III.V.-Caracterización del Río Guárico en las dos estaciones climáticas, invierno y verano en el año 2015. Objetivo específico N° 2.

A continuación serán reflejados los resultados físico químicos de los 4 muestreos realizados en el año 2015, en la siguiente tabla es presentada la estadística descriptiva, compuesta por: número de datos evaluados, valores mínimos, máximos y medias, además de la desviación estándar de los parámetros físico químicos analizados.

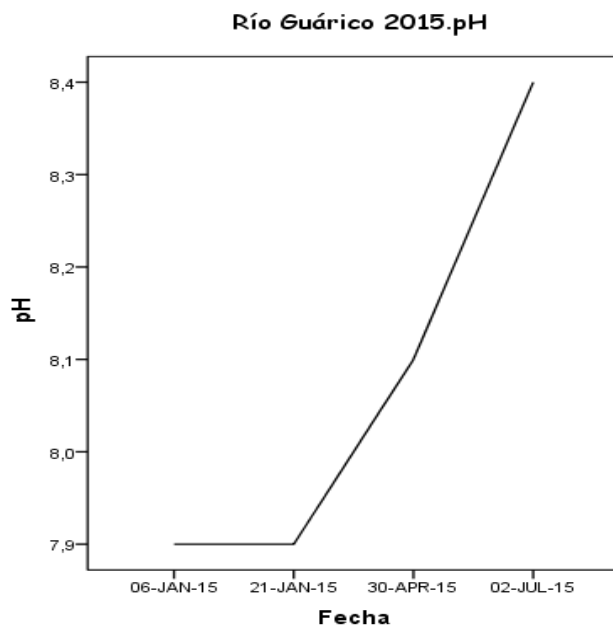
La cantidad de muestras obtenidas (4) sólo permitió realizar un estudio estadístico descriptivo, más allá de la estadística multivariada que podría haberse llevado a cabo con un número mayor de captaciones.

Las captaciones fueron realizadas en las siguientes fechas: 06 de enero, 21 de enero, 30 de abril y 02 de julio. Para los fines investigativos de este estudio, definimos, como se ha hecho en apartados anteriores la Época de Verano y la Época de Invierno. Así pues tenemos las dos fechas del mes de enero como la Época de Verano y el mes de abril y julio como la Época de Invierno. Es importante precisar que las captaciones en el Río Guárico son realizadas en el nivel “Superficie”, por esta razón el estudio de la variable de agrupación “Profundidades de Captación”, para este caso, queda descartado.

Río Guárico 2015. Estadísticos descriptivos.

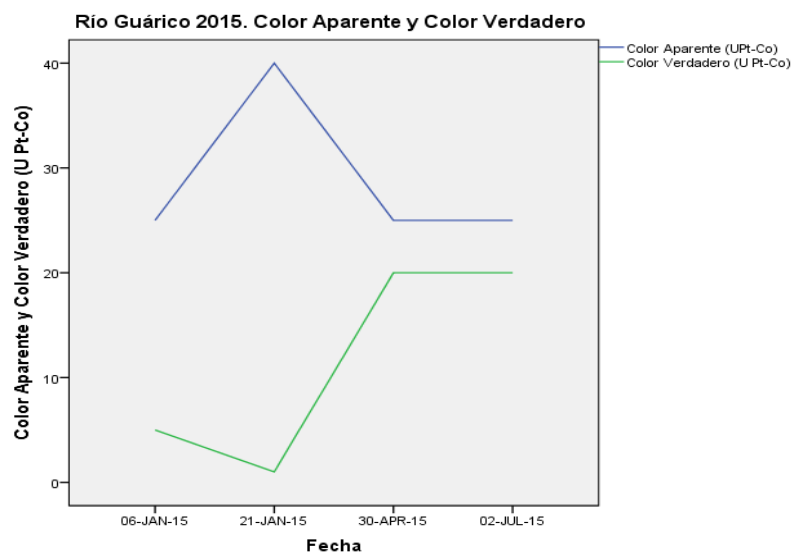
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Alcalinidad fenolftaleínica *	4	0,00	180,00	45,00	90,000
Alcalinidad total *	4	167,00	211,00	188,75	19,259
Aluminio *	2	0,02	0,03	0,03	0,007
Bicarbonatos *	4	204,00	257,00	229,00	23,986
Calcio *	2	37,00	54,40	45,70	12,304
Carbonatos *	3	0,00	2,00	0,67	1,155
Cloruros *	3	11,10	67,40	33,37	29,938
Color Aparente (U Pt-Co)	4	25,00	40,00	28,75	7,500
Color Verdadero (U Pt-Co)	4	1,00	20,00	11,50	9,950
Conductividad Específica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4	443,00	600,00	514,75	75,110
Dureza Total *	2	172,00	176,00	174,00	2,828
Fluoruro *	3	0,02	0,17	0,11	0,078
Fosforo Disuelto Total *	3	0,47	1,50	0,84	0,573
Fosforo Reactivo Disuelto*	3	0,25	1,45	0,73	0,639
Fosforo Total *	3	0,47	2,22	1,20	0,910
Hierro Total *	4	0,09	1,40	0,48	0,613
Índice de Langelier	2	0,60	1,10	0,85	0,354
Magnesio *	2	9,60	19,00	14,30	6,647
Manganeso Total *	4	0,02	0,10	0,07	0,036
Nitratos *	4	0,08	4,20	1,54	1,861
Nitrito *	4	0,02	0,33	0,13	0,143
Nitrógeno Amoniacal *	3	0,00	0,46	0,15	0,266
pH	4	7,90	8,40	8,08	0,236
Potasio *	1	3,70	3,70	3,70	.
Sílice Reactiva *	2	17,60	24,40	21,00	4,808
Sodio *	1	22,90	22,90	22,90	.
Sulfatos *	3	9,40	70,00	35,00	31,375
Turbiedad (NTU)	4	3,50	90,00	28,08	41,629

Tabla Nº 11 Parámetros físico químicos con estadísticos descriptivos en el año 2015 para el río Guárico *(mg/L)



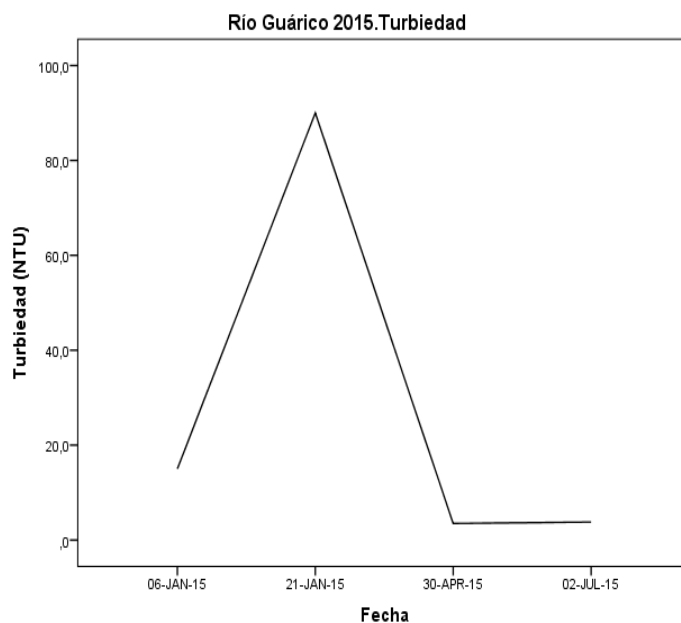
Gráfica N° 46 pH en el río Guárico año 2015

En la gráfica N° 46 en el parámetro pH se observa un incremento de este valor en las dos últimas campañas de muestreo, que corresponden a la Época de Invierno, además que es apreciable un pH alcalino en las 4 campañas de muestreo, esta tendencia de pH básico es un reflejo de los valores que han sido obtenidos en la superficie del embalse.



Gráfica N° 47 Color Verdadero y Color Aparente en el río Guárico año 2015

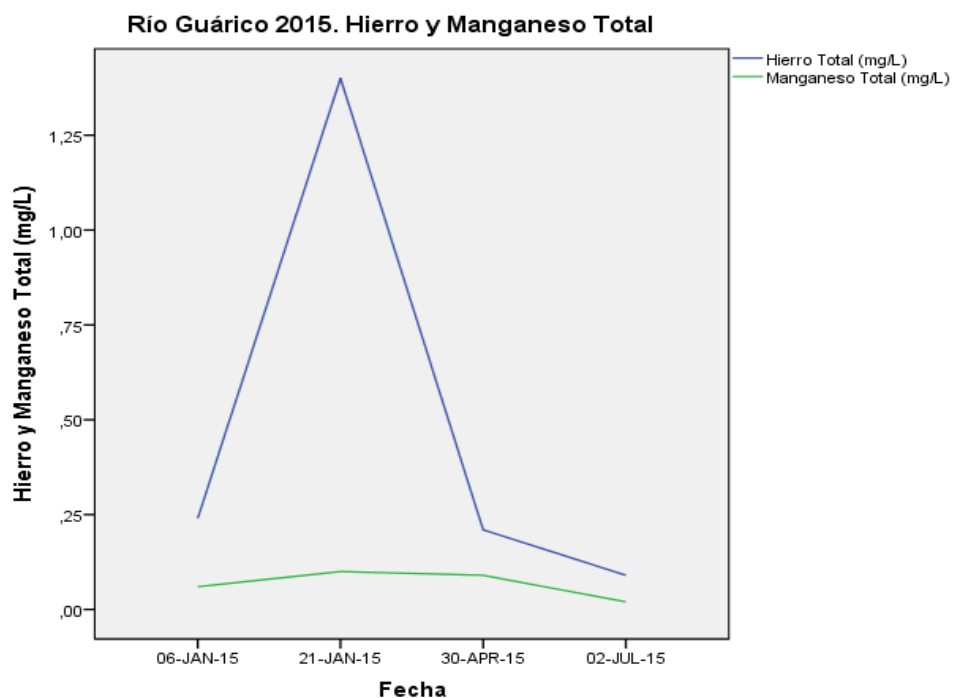
Para el caso del Color Aparente y Color Verdadero, es destacable el incremento en el valor del Color Aparente para la fecha del 21 de enero y la continuidad en los valores para las tres fechas restantes. Más adelante al observar las gráficas de Turbiedad y Hierro Total, justamente para esta fecha se aprecia un incremento respecto a las otras tres captaciones con lo se podría inferir una mayor carga y/o arrastre de sedimentos.



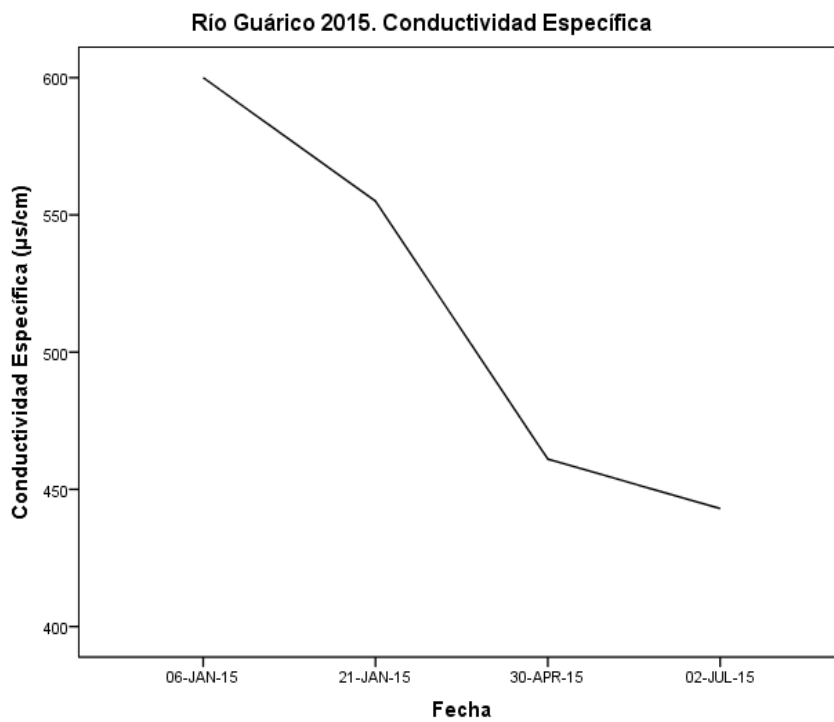
Gráfica N° 48 Turbiedad en el río Guárico año 2015

En la gráfica N° 48 de Turbiedad el alto valor reflejado para el 21 de enero pudo ser debido a un evento puntual de precipitación, ya que el mes de enero corresponde a la Época de Verano.

La situación se repite para la concentración de Hierro Total determinada para esta misma fecha. La especie oxidada del hierro (+3) en un ambiente oxidante evita la reducción del hierro a su estado soluble, es decir, +2, como ocurre en sistemas anóxicos y/o hipóxicos, por lo tanto la especie determinada mayoritariamente en estos tipos de ambiente (superficie del Río Guárico) supone la explicación de este hecho.



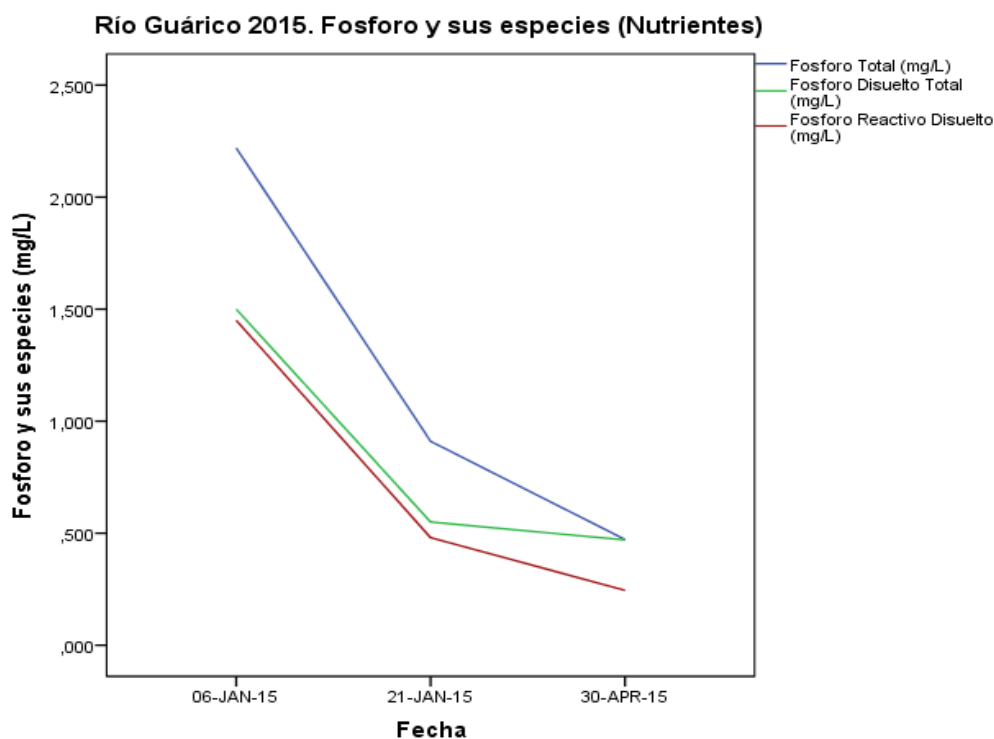
Gráfica N° 49 Hierro y Manganeseo Total en el río Guárico año 2015



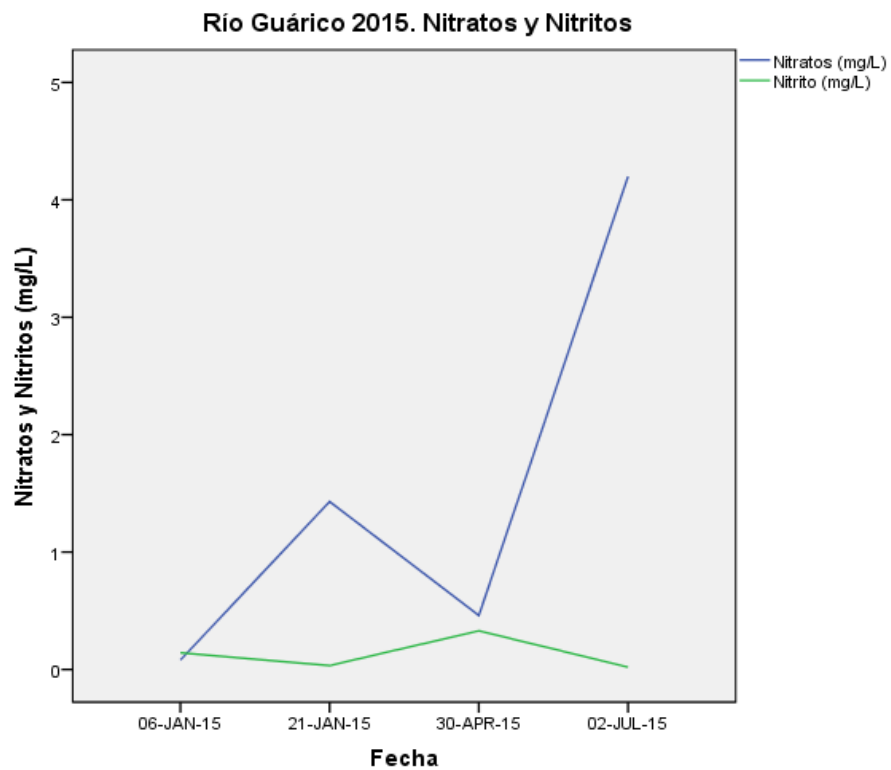
Gráfica N° 50 Conductividad específica en el río Guárico año 2015

El valor promedio de la Conductividad Específica en estas 4 campañas de captación corresponde a 515 $\mu\text{S}/\text{cm}$ valor superior a los 349 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que encontramos en el Embalse Camatagua donde fue realizada esta investigación, aproximadamente a 500 metros de la Torre Toma. Este fenómeno podría deberse a 3 causas: 1.- Se deben promediar estos valores de Conductividad Específica anualmente y no sólo por 4 meses a fin de obtener valores más cercanos al del reservorio, 2.- El efecto dilución y/o dispersión de iones en solución que pueda estar produciéndose en los aproximadamente 3 km de distancia desde la desembocadura del Río Guárico y la Torre Toma y 3.- Las constantes precipitaciones que disminuyen los valores de este parámetro.

A continuación son presentados las especies de Fósforo y Nitrógeno (gráficas N° 51 - 52) que aportan como nutrientes a la biomasa del embalse. Para el caso del Fósforo en sus tres especies, Fósforo Total, Fósforo Disuelto Total y Fósforo Reactivo Disuelto es apreciable su disminución conforme avanza el tiempo. Para el Nitrógeno en sus especies Nitratos y Nitritos no se observan tendencias claras conforme transcurren las campañas de muestreo.



Gráfica N° 51 Fósforo Total, Fósforo Disuelto Total y Fósforo Reactivo Disuelto en el río Guárico año 2015



Gráfica N° 52 Nitratos y Nitritos en el río Guárico año 2015

IV.III.VI.-Comportamiento histórico del embalse Camatagua, para evaluar la intervención antrópica al que fue sometido desde su construcción. Objetivo específico N°3.

Para este conjunto de datos, específicamente 599, de diversos parámetros físico químicos fueron aplicadas técnicas estadísticas descriptivas, multivariadas y factoriales, explicadas en el marco metodológico.

El período de estudio del Embalse Camatagua corresponde a 20 años desde el año 1995 hasta el año 2015, fue realizado el estudio integral para el período de 20 años, sin embargo en el año 2006 el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales Taiguaiguay (Edo. Aragua), fue desviado hacia el embalse Taiguaiguay, y de allí se bombea agua hacia el río Tucutunemo para la construcción del sistema de riego hacia los valles de esta zona. Sin embargo, por no haberse completado totalmente esta obra, parte del efluente de este sistema está siendo vertido hacia el río Guárico, principal afluente del embalse Camatagua. Por esta razón, el año 2006 fue un año de referencia para delimitar el antes y después de la intervención antrópica.

En algunos parámetros físico químicos, no fue procesado estadísticamente el total de muestras (599) el cual pudo deberse a diversidad de factores; parámetro no analizado para la época específica, falta de muestra, falta de reactivos químicos para su determinación, entre otros.

Embalse Camatagua 1995-2015 (20 años).

Parámetro Físico Químico	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Alcalinidad fenolftaleínica *	487	0,000	66,00	2,509	7,936
Alcalinidad total *	549	98,00	194,00	133,91	15,308
Aluminio *	321	0,00	0,668	0,015	0,042
Bicarbonatos *	411	20,00	236,00	162,392	25,929
Calcio *	455	17,00	46,40	25,466	4,040
Carbonatos *	411	0,00	65,00	2,513	7,857
Cloruros *	394	0,00	60,70	7,417	5,963
Color Aparente (U Pt-Co)	581	3,00	450,00	26,608	36,426
Color Verdadero (U Pt-Co)	587	1,00	250,00	9,532	14,753
Cond específica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	556	215,00	546,00	290,574	41,585
Dióxido de Carbono *	456	0,00	27,00	6,643	5,769
Dureza Total *	436	89,000	216,000	123,819	14,213
Fluoruro *	382	0,00	0,350	0,136	0,051
Fosforo Disuelto Total *	520	0,00	0,890	0,092	0,110
Fosforo Total *	571	0,00	1,232	0,124	0,128
Fosforo Reactivo Disuelto *	562	0,00	0,825	0,057	0,090
Hierro Total *	568	0,00	20,20	0,215	0,972
Índice de Saturación Langelier	436	-0,90	1,50	-0,016	0,431
Magnesio *	429	3,00	24,00	14,483	1,853
Manganeso Total *	545	0,00	0,612	0,101	0,125
Nitrato *	495	0,00	1,70	0,085	0,136
Nitrito *	549	0,00	0,35	0,008	0,034
Nitrógeno Amoniacal *	542	0,00	5,27	0,615	0,938
Nitrógeno Orgánico *	324	0,00	1,76	0,531	0,293
Nitrógeno Total Kjeldhal *	362	0,03	2,74	0,744	0,410
pH	470	6,07	9,40	7,786	0,464
Potasio *	351	0,80	9,70	2,463	1,122
Sílice Reactiva *	442	4,00	33,20	18,791	4,408
Sodio *	351	6,60	25,60	11,838	3,046
Sulfatos *	481	0,60	47,10	7,414	4,173
Transparencia Disco Secchi (m)	82	0,10	4,00	1,633	0,98
Turbiedad (NTU)	588	0,15	253,00	8,478	19,76

Tabla N° 12 Parámetros físico químicos con estadísticos descriptivos desde el año 1995 hasta 2015 para el embalse Camatagua,

*(mg/L)

Embalse Camatagua 1995-2005 (10 años). Antes de la intervención antrópica "AIA"

Parámetro Físico Químico	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Alcalinidad fenoltaleinica *	190	0,00	17,00	1,426	3,429
Alcalinidad total *	237	98,00	158,00	123,084	8,816
Aluminio *	119	0,00	0,01	0,003	0,005
Bicarbonatos*	113	99,00	193,00	149,34	15,195
Calcio *	170	17,00	40,00	23,256	3,631
Carbonatos *	113	0,00	20,00	1,673	4,184
Cloruros *	164	2,00	8,10	5,272	0,851
Color Aparente (U Pt-Co)	270	3,00	300,00	19,441	28,734
Color Verdadero (U Pt-Co)	269	1,00	40,00	6,729	5,763
Cond específica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	232	216,00	311,00	260,418	16,966
Dióxido de Carbono *	151	0,00	23,00	6,728	6,373
Dureza Total *	164	89,00	146,00	114,329	11,776
Fluoruro *	145	0,05	0,35	0,143	0,057
Fosforo Disuelto Total *	208	0,00	0,20	0,044	0,048
Fosforo Total *	254	0,00	0,316	0,065	0,054
Fosforo Reactivo Disuelto *	249	0,00	0,145	0,021	0,032
Hierro Total *	269	0,00	20,20	0,286	1,373
Índice de Saturación Langelier	151	-0,90	0,90	-0,13	0,409
Magnesio *	157	3,00	16,50	13,476	1,717
Manganeso Total *	269	0,00	0,45	0,07	0,103
Minerales Disueltos Calculados *	151	140	192	159	11,573
Nitrato *	238	0,00	0,50	0,109	0,107
Nitrito *	238	0,00	0,35	0,006	0,037
Nitrógeno Amoniacal *	232	0,00	1,30	0,189	0,271
Nitrógeno Orgánico *	211	0,00	1,76	0,522	0,32
Nitrógeno Total Kjeldhal *	249	0,03	2,74	0,677	0,398
pH	152	7,00	8,70	7,773	0,444
Potasio *	146	1,00	3,00	2,138	0,305
Sílice Reactiva *	170	8,80	29,00	17,78	4,408
Sodio *	146	7,90	17,00	11,003	2,091
Sulfatos *	238	2,50	20,00	7,860	3,368
Transparencia Disco Secchi (m)	34	1,00	4,00	2,406	0,772
Turbiedad (NTU)	270	0,40	160,00	5,080	14,660

Tabla Nº 13 Parámetros físico químicos con estadísticos descriptivos desde el año 1995 hasta 2005 para el embalse Camatagua, Antes de la Intervención Antrópica *(mg/L)

Embalse Camatagua 2006-2015 (9 años). Después de la intervención antrópica. "DIA"

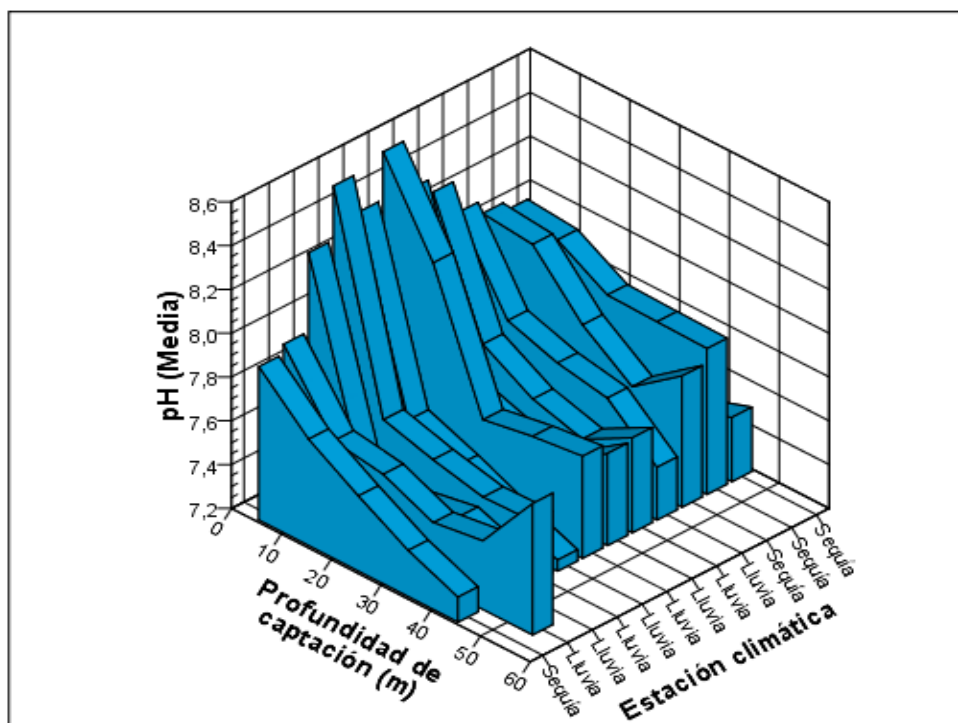
Parámetro Físico Químico	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Alcalinidad fenolftaleínica *	297	0	66,00	3,202	9,729
Alcalinidad total *	312	104	194,00	142,125	14,033
Aluminio *	202	0,00	0,67	0,023	0,052
Bicarbonatos *	298	20	236,00	167,319	27,431
Calcio *	285	17,6	46,40	26,784	3,685
Carbonatos *	298	0	65,00	2,832	8,846
Cloruros *	230	0,00	60,70	8,947	7,407
Color Aparente (U Pt-Co)	311	5	450,00	32,830	41,018
Color Verdadero (U Pt-Co)	318	1	250,00	11,903	19,025
Cond específica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	324	215	546,00	312,167	40,55
Dióxido de Carbono *	305	0	27,00	6,60	5,457
Dureza Total *	272	97	216,00	129,54	12,389
Fluoruro *	237	0,00	0,31	0,132	0,047
Fosforo Disuelto Total *	312	0,00	0,89	0,125	0,126
Fosforo Total *	317	0,00	1,23	0,172	0,148
Fosforo Reactivo Disuelto *	313	0,00	0,83	0,086	0,109
Hierro Total *	299	0,00	3,56	0,150	0,303
Índice de Saturación Langelier	285	-0,8	1,50	0,04	0,431
Magnesio *	272	10,4	24,00	15,064	1,672
Manganeso Total *	276	,000	0,61	0,132	0,137
Minerales Disueltos Calculados	191	141	245,00	179,016	15,36
Nitrato *	257	0,00	1,70	0,063	0,155
Nitrito *	311	0,00	0,33	0,01	0,032
Nitrógeno Amoniacal *	310	0,00	5,27	0,933	1,116
Nitrógeno Orgánico *	113	0,12	1,22	0,548	0,232
Nitrógeno Total Kjeldhal *	113	0,36	2,46	0,892	0,396
pH	318	6,1	9,40	7,792	0,474
Potasio *	205	0,8	9,70	2,694	1,402
Sílice Reactiva *	272	4,0	33,20	19,424	4,296
Sodio *	205	6,6	25,60	12,432	3,458
Sulfatos *	243	0,6	47,10	6,977	4,800
Transparencia Disco Secchi (m)	48	0,1	3,00	1,085	0,706
Turbiedad (NTU)	318	0,15	253,00	11,363	22,858

Tabla N° 14 Parámetros físico químicos con estadísticos descriptivos desde el año 2006 hasta 2015 para el embalse Camatagua, Después de la Intervención Antrópica *(mg/L)

IV.III.VII.- Caracterización físico química del embalse Camatagua durante el período completo de estudio, 20 años (1995-2015), tomando las variables de agrupación “Estación climática” y “Profundidades de captación de muestras en las tomas selectivas del perfil vertical del embalse Camatagua”.

En este apartado fueron estudiados los parámetros físico químicos incluyendo sus respectivos comportamientos en las dos variables de agrupación: Estación Climática y Profundidades de captación de muestras en las tomas selectivas del perfil vertical del embalse Camatagua. Es importante mencionar para el caso de la variable Estación Climática, serán observados en el eje Z (correspondiente a la variable Estación Climática) 12 puntos establecidos en Lluvia y Sequía, esto corresponde a los 12 meses que fueron caracterizados de acuerdo a la Estación Climática predominante, así pues desde enero hasta marzo será Estación Climática “Sequía” desde abril hasta noviembre “Lluvia” para terminar en diciembre de nuevo con Sequía. En este sentido, el mes de diciembre será el más próximo al valor 60 metros de “Profundidad de Captación” (ubicado en el eje y), lógicamente el otro extremo corresponderá al mes de enero.

**Valores promedio de pH, Profundidad de captación, Estación climática.
20 años (1995-2015)**

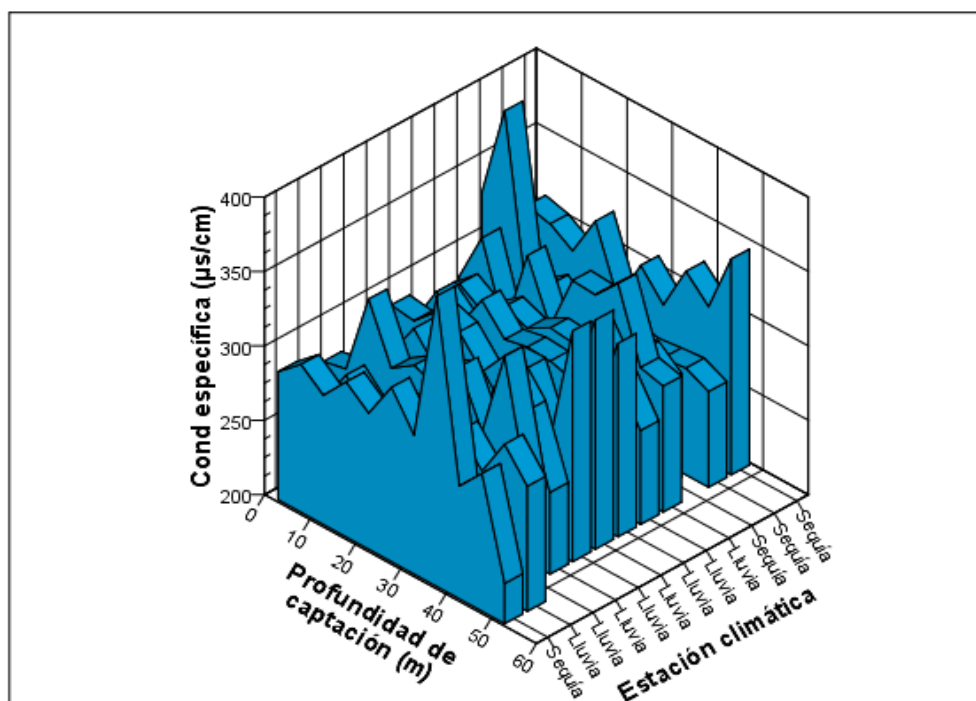


Gráfica N° 53 pH (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015)

Durante los 20 años de estudio (1995-2015) es apreciable la tendencia de incremento en el pH, es decir, valores alcalinos en los meses lluviosos, Julio, Agosto, Septiembre, y el comportamiento menos básico (sin llegar a la acidez) en los meses secos, la lixiviación de especies química con afinidad para la formación de hidróxidos durante la estación lluviosa podría ser la causa de esta variación. Adicionalmente se observa la disminución del pH, al aumentar en profundidad, producto de la fijación del CO_2 en la superficie del embalse por parte del fitoplancton a través del proceso de fotosíntesis, viceversa para la acidez en la zona más profunda de la columna de agua debido a la liberación de CO_2 .

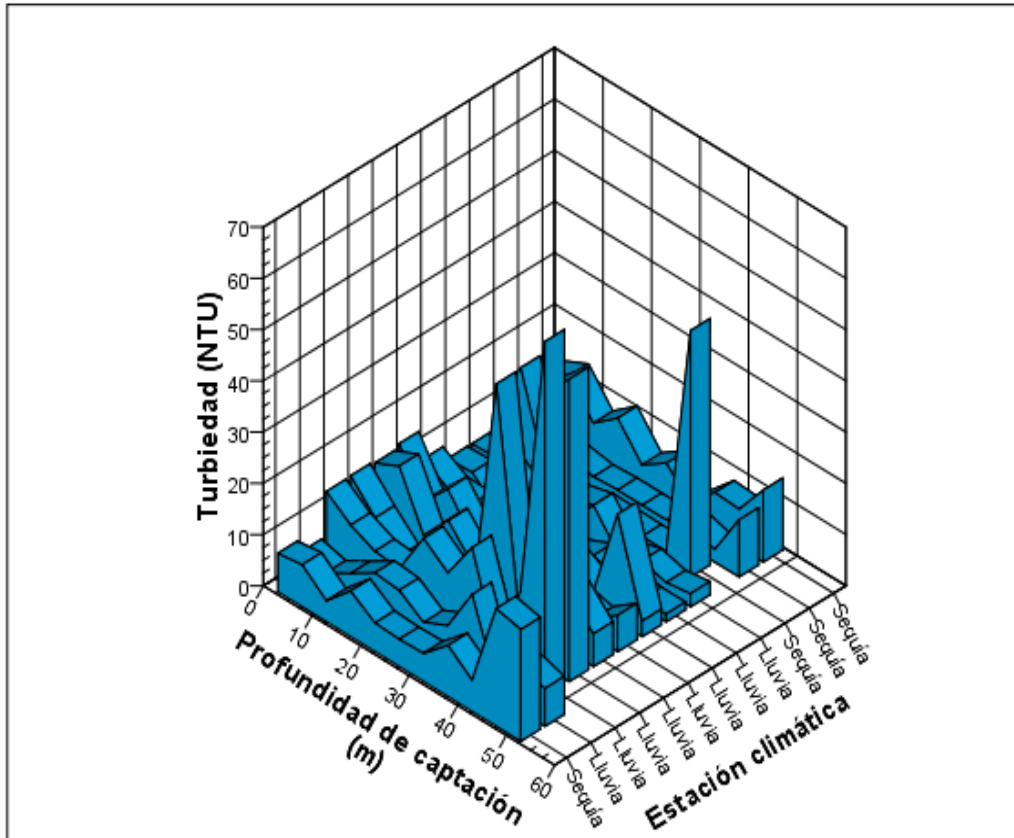
En cuanto a la Conductividad específica, a modo general, es apreciable tendencias uniformes en los valores de este parámetro. Sin embargo, son notables dos picos en la gráfica N°54, correspondiente al mes seco de marzo y en pocos metros de profundidad. Por otra parte, el pico en el mes seco de diciembre a 40 metros de profundidad aproximadamente, podría deberse a la culminación de la estación climática lluviosa y el respectivo arrastre de minerales disueltos desde los tributarios que abastecen el reservorio.

**Valores promedios de Conductividad esp., Profundidad de captación, Estación climática.
20 años (1995-2015)**



Gráfica N° 54 Conductividad específica (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015)

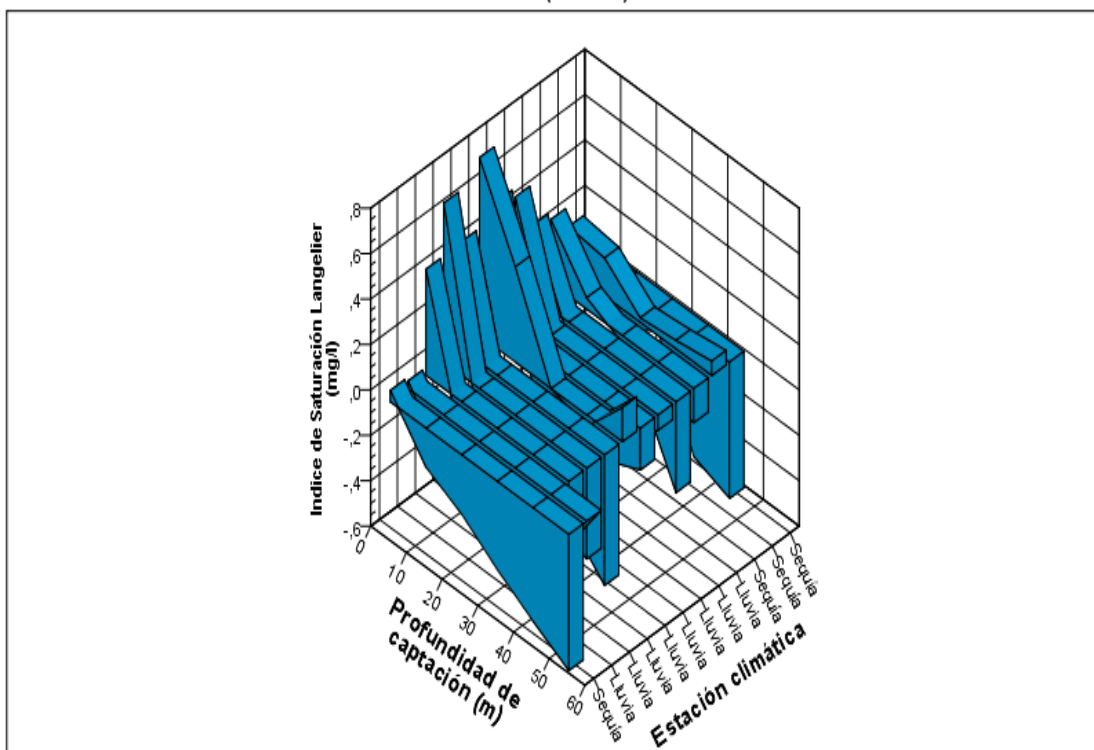
**Valores promedio de Turbiedad, Profundidad de captación, Estación climática.
20 años (1995-2015)**



Gráfica N° 55 Turbiedad (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015)

Para el caso de la Turbiedad están representados 3 picos característicos, dos de ellos en estación climática lluviosa, entre septiembre y octubre, infiriendo el arrastre de sedimentos para incrementar la turbiedad, pero el otro pico interesante para la discusión se aprecia en marzo, como explicación además de ubicarse en estación climática seca existe poca profundidad de captación para este parámetro lo que podría promover cierto grado de opalescencia o Turbiedad en el fondo del cuerpo de agua.

Valores promedio Índice de Saturación de Langelier, Profundidad de captación, Estación climática.
20 años (1995-2015)

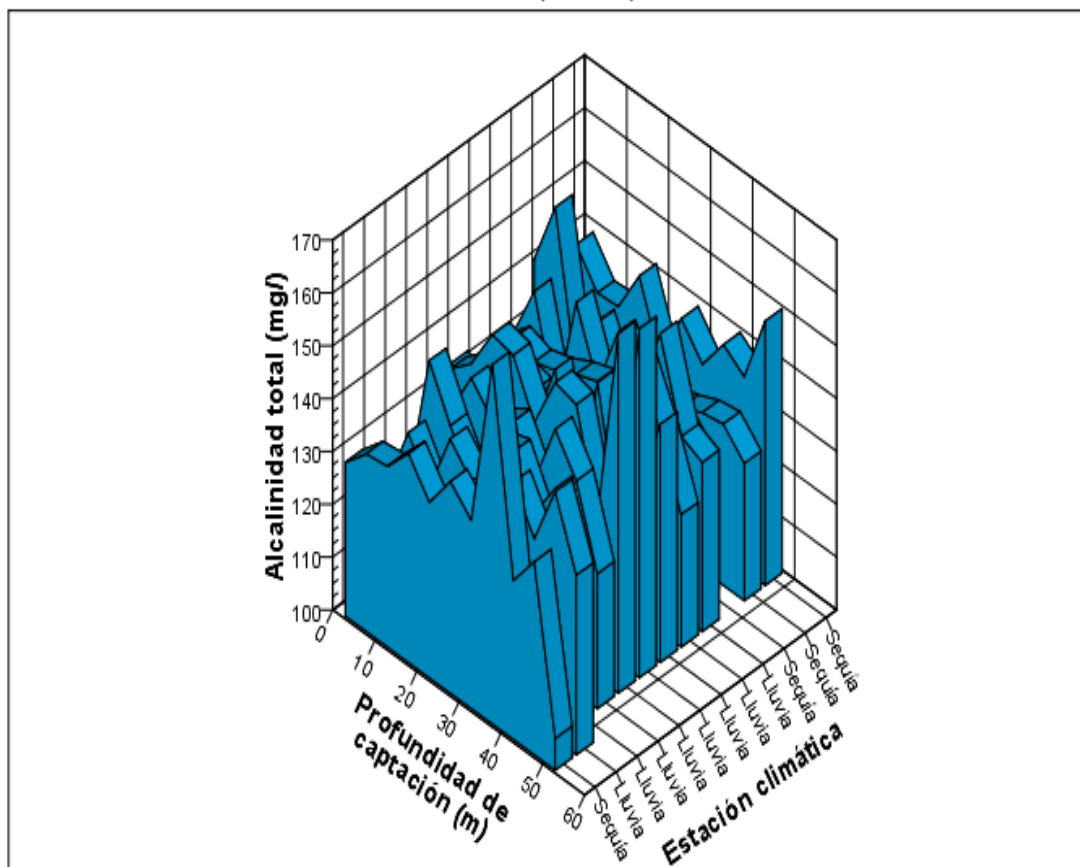


Gráfica N° 56 Índice de Saturación (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015)

El Índice de Saturación de Langelier representa las tendencias para precipitar o disolver carbonato de calcio, así un valor mayor que cero tiene comportamiento depositario o incrustante mientras un valor menor que cero tiende a la disolución del carbonato de calcio. Adicionalmente el índice guarda estrecha relación con el pH, de esta manera se aprecia en la gráfica a profundidades cercanas al fondo el comportamiento de disolución del agua ($ISL < 0$), mientras que en la superficie tiende a la precipitación del carbonato ($ISL > 0$). Además en la estación climática lluviosa, en los meses de julio, agosto, septiembre, es apreciable el incremento del índice a valores positivos, situación antagónica ocurre para los meses de sequía en donde el índice aumenta a valores negativos.

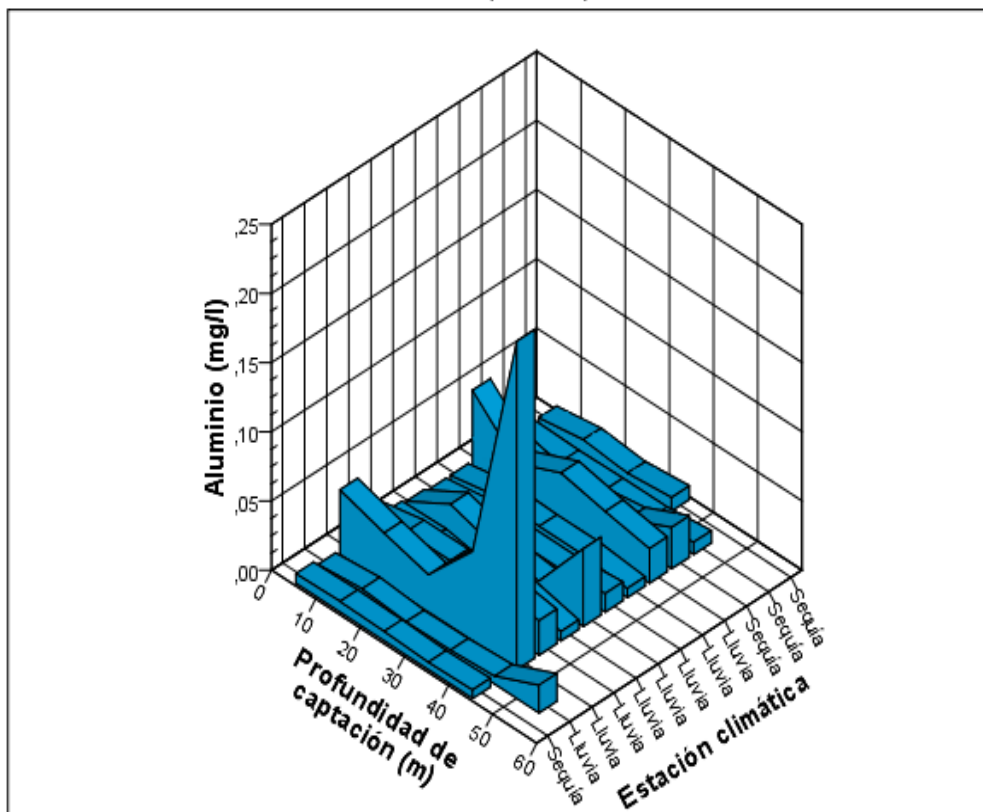
Para la Alcalinidad Total no son apreciables comportamientos específicos o variables, a modo general se mantienen las concentraciones en las estaciones climáticas objeto de estudio y en las profundidades de captación. De manera concluyente se puede afirmar la tendencia alcalina histórica de las aguas del embalse Camatagua.

**Valores promedio Alcalinidad Total, Profundidad de captación, Estación climática.
20 años (1995-2015)**



Gráfica N° 57 Alcalinidad total (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015)

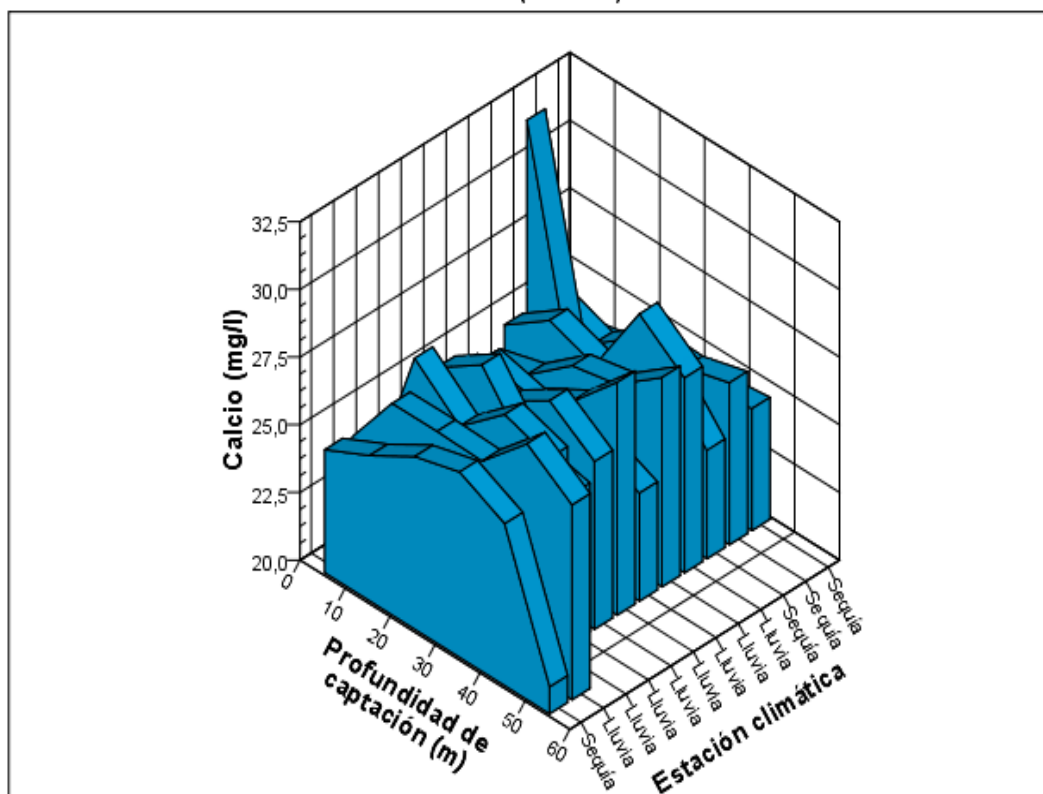
**Valores promedio Aluminio, Profundidad de captación, Estación climática.
20 años (1995-2015)**



Gráfica N° 58 Aluminio (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015)

En la gráfica N° 58 se presenta el metal Aluminio. Para el mes de octubre, lluvioso, es importante el incremento observado en el metal Aluminio, la composición mineralógica del sedimento de arrastre está constituida entre otros por este metal, de esta manera se puede inferir dicho comportamiento, de resto, a modo general presenta uniformidad en sus concentraciones, tanto en las profundidades de captación como en las estaciones climáticas de estudio.

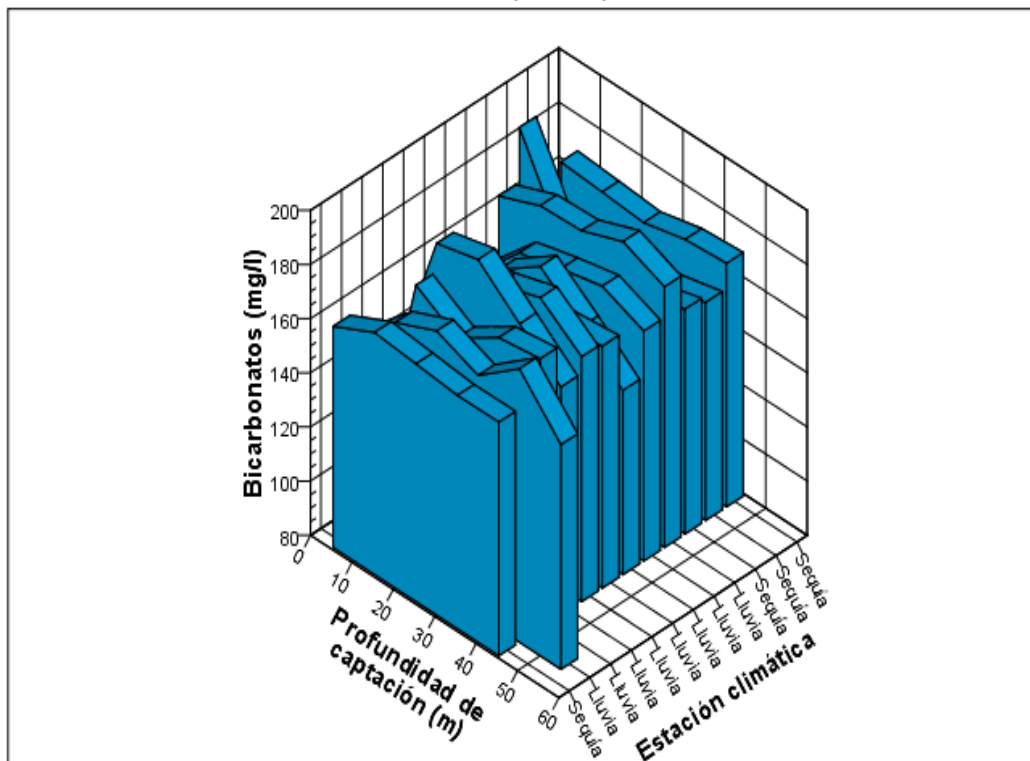
**Valores promedio Calcio, Profundidad de captación, Estación climática.
20 años (1995-2015)**



Gráfica N° 59 Calcio (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015)

Para el caso del Calcio, el rasgo más notable es el incremento en la concentración del catión en el mes seco de marzo, hecho que guarda relación con los valores de Conductividad específica para ese mismo mes, ya que este catión mayoritario es responsable en alguna medida del incremento de este parámetro físico químico. Por otra parte, no se presentan tendencias marcadas en el comportamiento del Calcio.

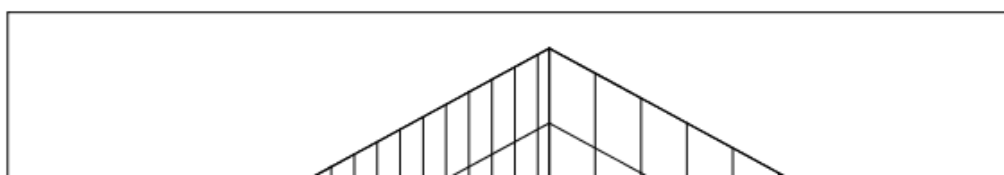
**Valores promedio Bicarbonatos, Profundidad de captación, Estación climática.
20 años (1995-2015)**



Gráfica N° 60 Bicarbonato (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015)

En cuanto al Bicarbonato, como uno de los representantes del equilibrio del carbonato en medio acuoso, no existen comportamientos variables, de hecho tiende a la uniformidad en el período de estudio.

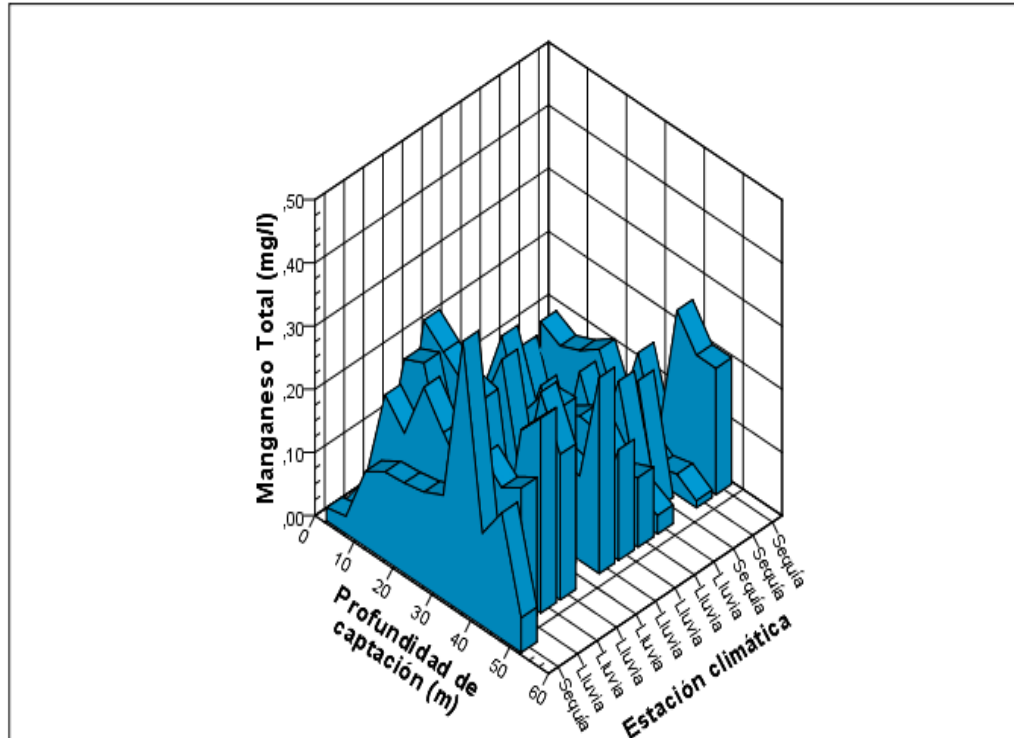
**Valores promedio de Hierro Total, Profundidad de captación, Estación climática.
20 años (1995-2015)**



Gráfica N° 61 Hierro total (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015)

Con respecto al Hierro Total, son apreciables dos incrementos en los meses de marzo (seco) y octubre (lluvioso), al igual que la Turbiedad en el mes más seco del período de estudio, constatado por la más baja profundidad de los 20 años, se infiere liberación desde los sedimentos posiblemente desde especies fosfatadas a grandes profundidades. Para el mes de octubre, lluvioso, el arrastre de sedimento desde los tributarios al embalse resulta la explicación química más convincente.

Valores promedio Manganese Total, Profundidad de captación, Estación climática.
20 años (1995-2015)



Gráfica N° 62 Manganese total (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015)

El Manganese Total no presenta variabilidad apreciable en su comportamiento a lo largo del período de estudio, a pesar de tener en la naturaleza distribuciones y/o migraciones similares al Hierro Total, en este caso podríamos sugerir el incremento en concentraciones al aumentar la profundidad como similitud al comparar este elemento con el Hierro Total.

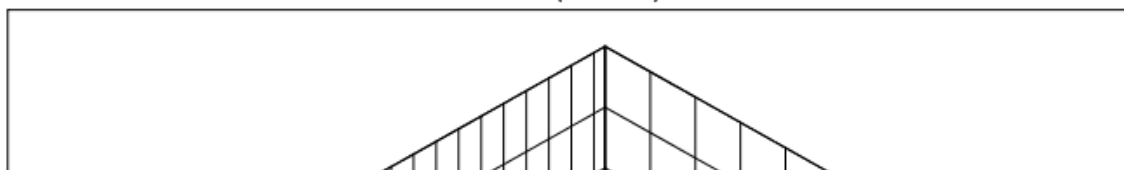
Valores promedio Cloruros, Profundidad de captación, Estación climática.
20 años (1995-2015)



Gráfica N° 63 Cloruros (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015)

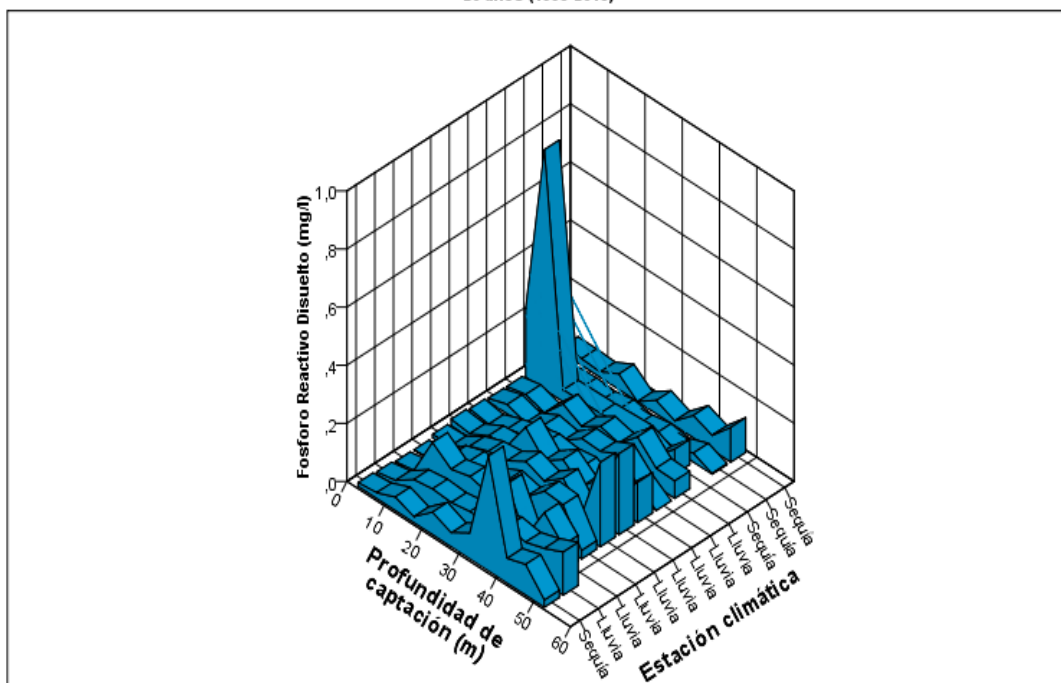
El anión mayoritario Cloruros presentó un aumento diferenciable al resto de las estaciones climáticas de lluvia entre junio y julio, también en abril. Sin embargo para el resto del estudio la tendencia es uniforme, tanto en la variable estación climática como en la profundidad de captación.

**Valores promedio Fosforo Total, Profundidad de captación, Estación climática.
20 años (1995-2015)**



Gráfica N° 64 Fósforo total (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015)

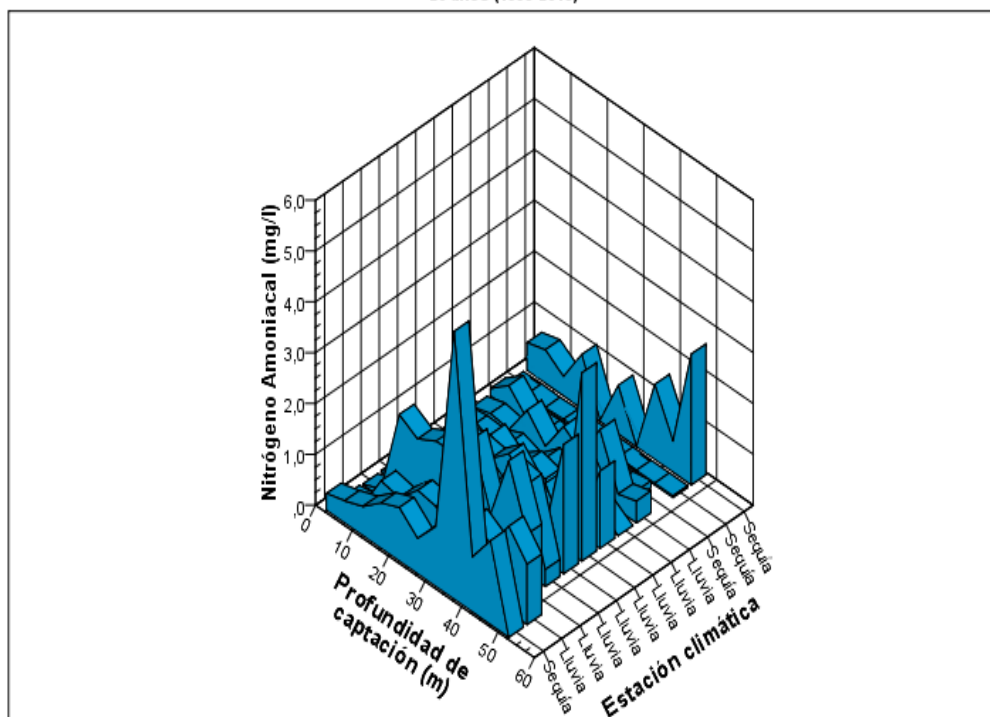
**Valores promedio Fosforo Reactivo Disuelto, Profundidad de captación, Estación climática.
20 años (1995-2015)**



Gráfica N° 65 Fósforo reactivo disuelto (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015)

Para el estudio integral de este reservorio resulta particularmente importante reflejar las concentraciones de dos especies que suministran información respecto al grado de eutrofización de un cuerpo de agua. En este caso el Fósforo Total presenta dos valores característicos en estación climática de sequía diciembre y marzo, para el primero de estos meses la mayor concentración se presentó entre los 30 y 40 metros de profundidad, por otra parte para el mes de marzo en la superficie, este evento se podría interpretar como el inicio del proceso de eutrofización en diciembre, con la actividad de la biomasa del fitoplancton y el respectivo consumo de nutrientes para que ocurra el “Bloom” (sobre crecimiento algal) con el consecuente fenecimiento y quedando disponible la carga de nutrientes en la superficie para el mes de marzo. Lo propio ocurre para la fracción disponible para la biota, expresado como Fósforo Reactivo Disuelto, en el que se puede apreciar la misma tendencia del Fósforo Total, entendiendo que aquel (Fósforo reactivo disuelto) es una fracción minoritaria de este (Fósforo Total).

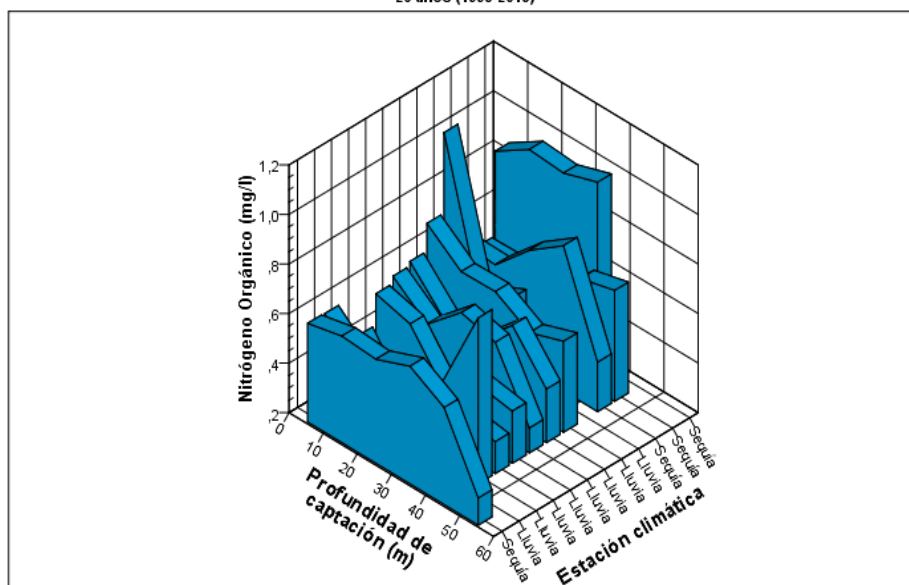
Valores promedio Nitrógeno Amoniacal, Profundidad de captación, Estación climática.
20 años (1995-2015)



Gráfica Nº 66 Nitrógeno Amoniacal (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015)

Por último será discutido el comportamiento de las especies de Nitrógeno Amoniacal y Nitrógeno Orgánico (gráfica N° 66 y 67), que también actúan como nutrientes en el cuerpo de agua. Para el Nitrógeno Amoniacal es apreciable el aumento de las concentraciones en las zonas profundas del reservorio debido a la naturaleza química, específicamente del estado reducido del nitrógeno, en este caso en forma de Nitrógeno Amoniacal. Para los meses de diciembre y enero, es decir, sequía es notable el incremento de las concentraciones en las profundidades, sin embargo, en los dos meses restantes de sequía resulta interesante la disminución abrupta de las concentraciones, pudiéndose inferir para este período, la desestratificación y mezcla de las aguas del reservorio por acción de los vientos de toda la columna de agua. Para el caso del Nitrógeno Orgánico, presentado en la siguiente gráfica, para el primer mes de sequía, correspondiente a enero, es reflejada la mayor concentración del estudio integral, además de las profundidades medias que alcanzó el Nitrógeno Orgánico para el mes de sequía evaluado. Para el mes de abril, lluvioso, el comportamiento de esta especie resultó similar respecto al mes antes referenciado, es decir, las concentraciones más elevadas fueron obtenidas en los primeros metros de profundidad. Las tendencias durante los meses restantes se mantienen aproximadamente constantes.

Valores promedio Nitrógeno Orgánico, Profundidad de captación, Estación climática.
20 años (1995-2015)

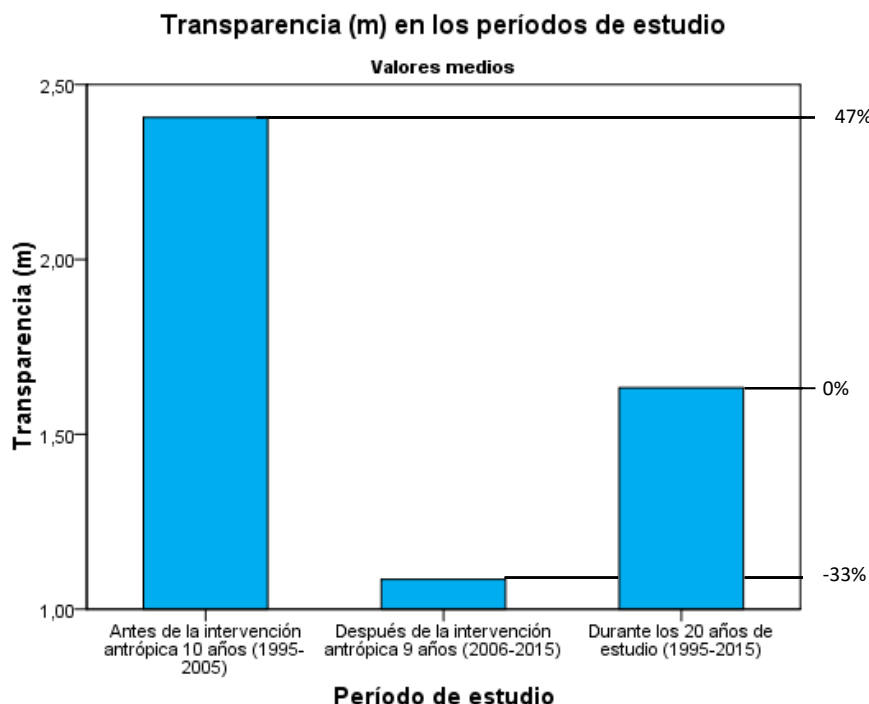


Gráfica N° 67 Nitrógeno Orgánico (medias), profundidad de captación, estación climática durante los 20 años de estudio (1995-2015)

IV.III.VIII.- Comparación de parámetros físico químicos en el embalse Camatagua durante el período completo de estudio, 20 años (1995-2015), antes de la intervención antrópica, 10 años (1995-2005) y después de la intervención antrópica, 9 años (2006-2015)”.

A continuación será presentada la comparación entre los tres períodos de relevancia en esta investigación, y corresponde al comportamiento histórico del embalse Camatagua a lo largo de 20 años (1995-2015), luego el período de 10 años denominado “Antes de la Intervención antrópica” (1995-2005) y por último el período llamado “Después de la Intervención antrópica” (2006-2015). No se pretende con esta división de períodos descartar intervenciones antrópicas de diversa índole desde el año 1995 al 2005, sin embargo, las eventuales afectaciones no fueron consideradas por la importancia que reviste el evento ocurrido en 2006, que ha sido mencionado anteriormente. En este orden de ideas, las intervenciones impactantes antes del 2006 pudieron provenir de actividades agrícolas, asentamientos humanos, intervenciones a la cuenca alta, entre otros, que para fines de este estudio no representaron eventos de gran magnitud.

Es relevante precisar que sólo tres parámetros físico químicos presentaron mayores concentraciones y distancias (para el caso de la transparencia) para el período “Antes de la intervención antrópica” en contraste al período “Después de la intervención antrópica”, estos parámetros fueron: Transparencia, Hierro Total y Sulfatos. Por otra parte resulta importante explicar que para todas las gráficas fueron utilizados los valores medios en concentración mg/l (en uno de los ejes) de todo el conjunto de datos evaluados, de acuerdo a cada período. Adicionalmente fue calculado el porcentaje de incremento y/o disminución (en uno de los ejes) para cada especie química evaluada, a fin de resaltar la significancia de los comportamientos en los períodos estudiados, tomando como referencia o “estado normal” del embalse Camatagua el período correspondiente a los 20 años de estudio (1995-2015).



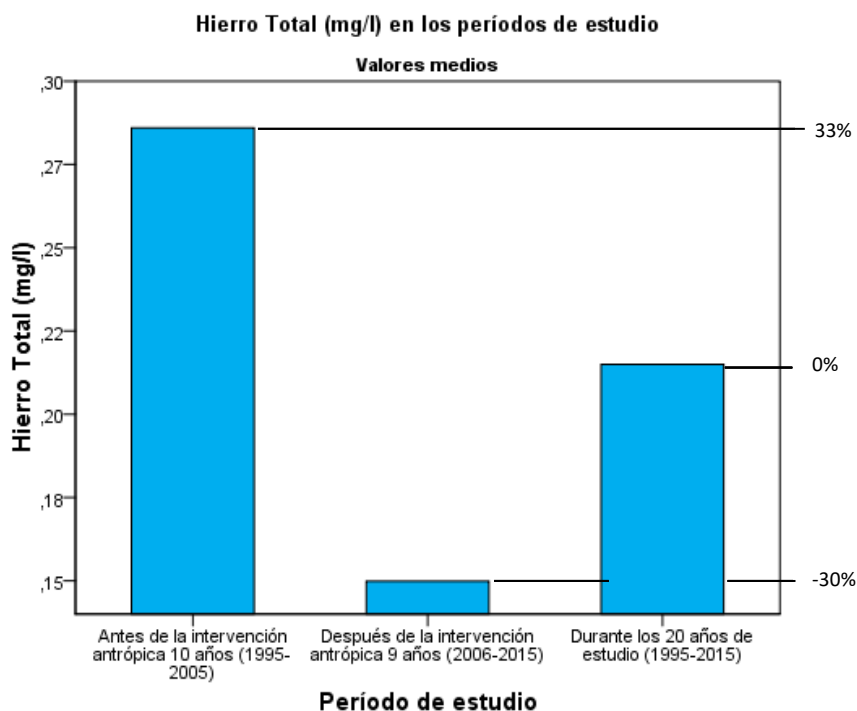
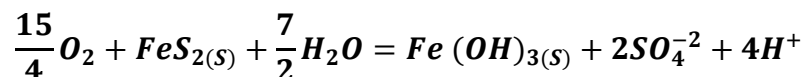
Gráfica Nº 68 Transparencia durante los tres períodos de estudio en el embalse Camatagua

La Transparencia es un parámetro físico de sencilla medición (con un instrumento llamado Disco Secchi), este valor se obtiene en la superficie del embalse y es un indicador de la penetración de la luz solar sobre el cuerpo de agua, dando información valiosa para interpretar el estado trófico del reservorio. En este orden de ideas resulta coherente que “Antes de la intervención antrópica” (AIA) se tenía en promedio 1,40 metros de transparencia mayor con respecto al período “Después de la intervención antrópica” (DIA). En términos porcentuales para el período DIA, ocurrió una disminución del 33% de Transparencia, situación desfavorable para las condiciones del cuerpo de agua.

El siguiente parámetro físico químico evaluado corresponde al Hierro Total, el cual resultó en 33% de concentración en el período AIA con respecto a los 20 años de estudio.

Para esta interpretación han sido planteadas dos hipótesis geoquímicas, la primera de ellas corresponde al proceso de oxidación del sulfuro de hierro (oxidación de pirita). La reacción química es la siguiente.

Reacción de oxidación del sulfuro de hierro

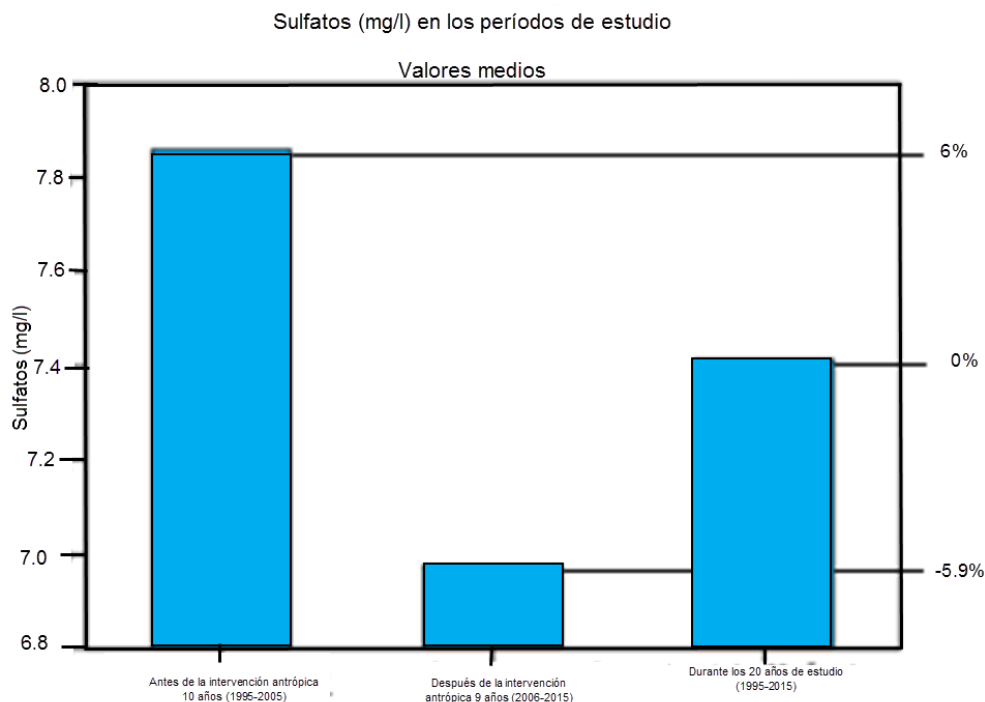


Gráfica N° 69 Hierro Total durante los tres períodos de estudio en el embalse Camatagua

Es menester hacer la acotación que en la determinación analítica del Hierro Total son determinadas tanto las especies solubles, en este caso del hierro (+2) y la forma no disuelta (oxidada) del hierro (+3), el incremento en favorecer el equilibrio hacia el lado de los productos, es decir el hidróxido de hierro, podría deberse a que en el período AIA hubo mayor volumen de precipitaciones con respecto al período DIA en donde existieron eventos de sequía importantes.

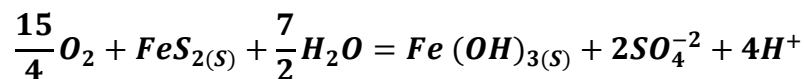
La segunda hipótesis de este comportamiento corresponde con la asociación del fósforo en sus diversas formas químicas, en esta oportunidad el fosfato, con el hierro en los sedimentos. Bajo condiciones oxidantes ocurre lentamente en los sedimentos superficiales la precipitación del Hierro en su estado de oxidación +3 con fosfatos, $Fe-PO_4$, (Schneider, 2011). Debido a que las concentraciones más altas de las especies de fósforo ocurren en el período DIA, se explica la disponibilidad del Hierro en esta etapa, es decir, a medida que fue incrementando la concentración de especies de

fósforo (nutrientes) la cual corresponde al período DIA, la concentración de Hierro disminuyo.

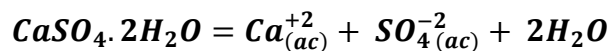


Gráfica N° 70 Sulfatos durante los tres períodos de estudio en el embalse Camatagua

Para el sulfato, cuyo incremento entre el período AIA y los 20 años de estudio, correspondió a 6% aproximadamente, pueden enumerarse tres hipótesis. Resaltando que este incremento no representa una variación notable en términos porcentuales ni de concentración en mg/l, se realizan estos tres análisis con el objetivo de explicar la migración de este anión en términos temporales. La primera de ellas corresponde la misma para el caso del hierro, en el cual también se produce el anión sulfato de la reacción química.

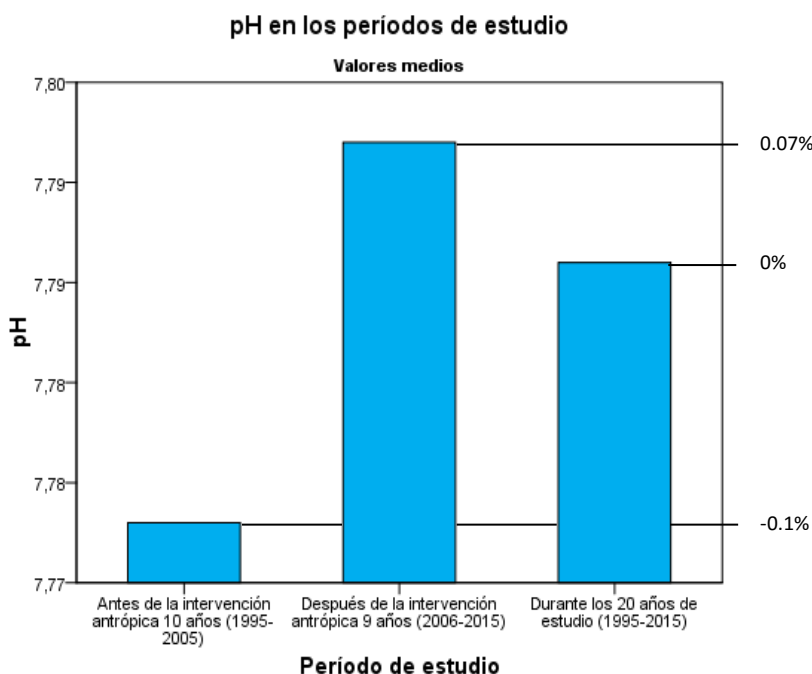


Como segunda interpretación será presentada la disolución del mineral “yeso” (Sulfato de Calcio) cuya reacción química es:



Como tercera y última hipótesis, la intervención agrícola podría ser la explicación de esta superioridad en el período AIA con respecto a los 20 años de estudio. Los fertilizantes a base de potasio y sulfatos ($K-SO_4^{-2}$) sería la fuente de esta especie química, sin sugerir que la actividad agrícola en el período DIA, no existía o fue menor, sin embargo la variabilidad de fertilizantes y por ende su composición química ha sido modificada constantemente en las últimas décadas.

Para el resto de los parámetros físico químicos el período DIA fue superior al período AIA, es por ello que sólo serán presentados los parámetros característicos de una intervención como la ocurrida a partir de 2006, es decir, efluentes residuales con carga de nutrientes, en este sentido el Nitrógeno Amoniacal, Nitrógeno Orgánico, Fósforo Total y Fósforo Reactivo Total representarán las especies impulsoras del proceso de eutrofización del reservorio. Además el pH y la Conductividad Específica también serán reflejados para su respectiva interpretación.

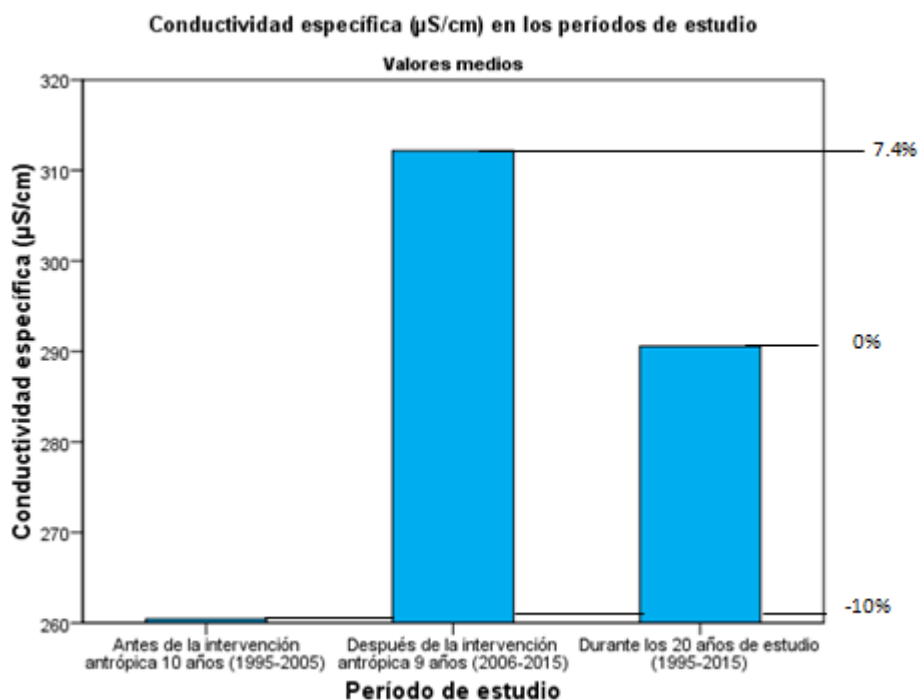


Gráfica N° 71 pH durante los tres periodos de estudio en el embalse Camatagua

Para el pH no se apreciaron diferencias considerables en los periodos de estudio, a pesar de que la gráfica muestra una marcada distancia entre el área de AIA y el DIA, la diferencia entre ellos no excede de la unidad. Por consiguiente, es importante

indicar que la variación del pH no sufrió mayores alteraciones por la influencia antrópica a partir del 2006.

Seguidamente será apreciada la gráfica N° 72 de Conductividad Específica, en este caso la magnitud de DIA tuvo una variación de 7.4 % de las condiciones del reservorio, interpretando con este valor la carga iónica disuelta que aportó esta intervención humana en el embalse Camatagua.

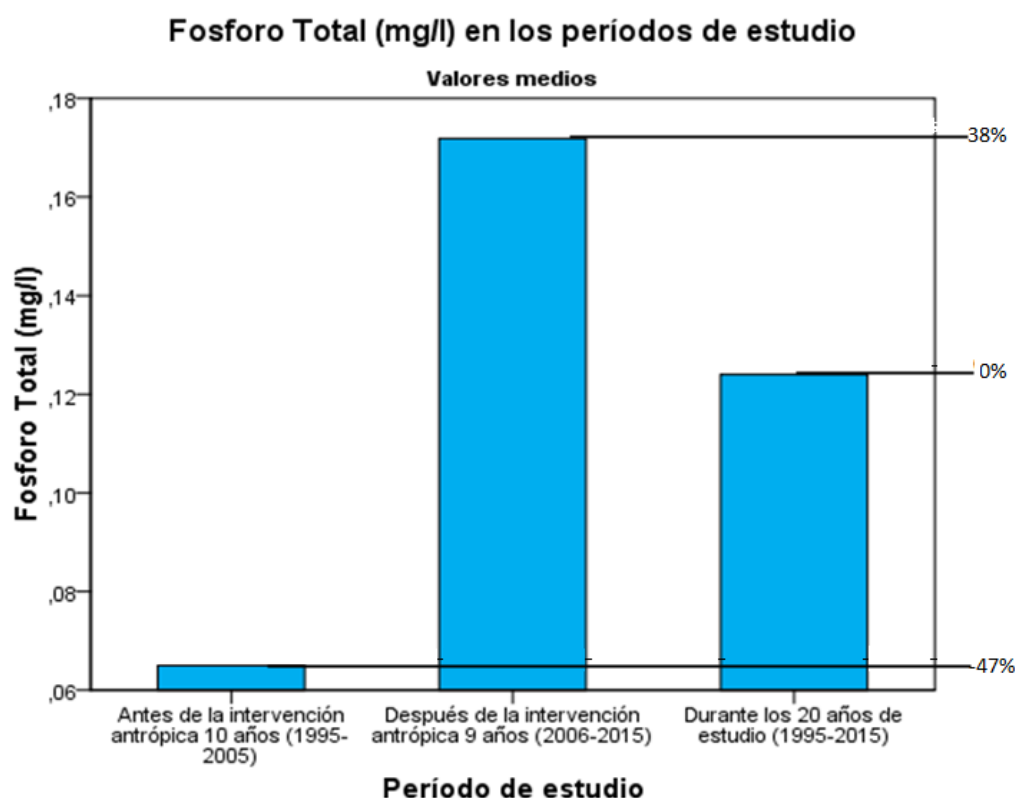


Gráfica N° 72 Conductividad específica durante los tres periodos de estudio en el embalse Camatagua

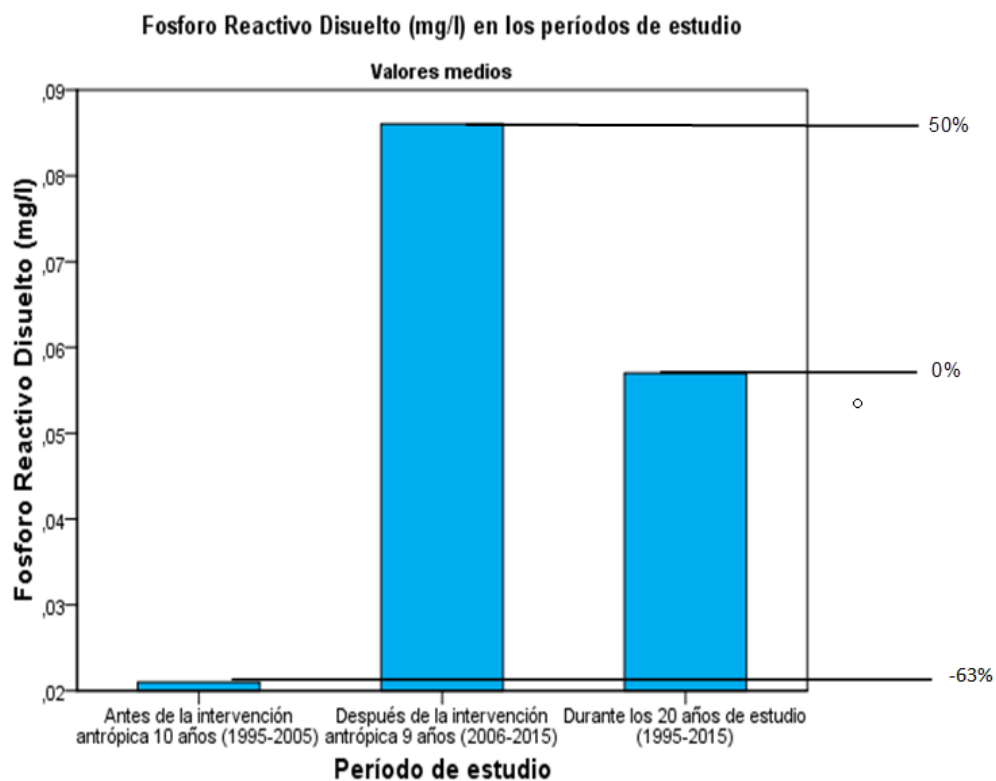
A continuación las gráficas N° 73-76 que muestran las tendencias y concentraciones de las especies químicas que son asimiladas biológicamente por el fitoplancton. El Fósforo Total como especie limitante en la eutrofización dentro del cuerpo de agua y el Fósforo Reactivo Disuelto, como la fracción disponible para la biota. Al observar las gráficas de estas especies químicas, resultan en un incremento importante en las concentraciones al comparar el AIA y DIA, para el Fósforo Total se puede afirmar que la diferencia superó el doble, mientras que para el Fósforo Reactivo Disuelto la diferencia fue mayor al triple entre el AIA y DIA.

Para las especies nitrogenadas, específicamente la concentración promedio del Nitrógeno Amoniacal en el período DIA fue el triple en contraste al período AIA. Es

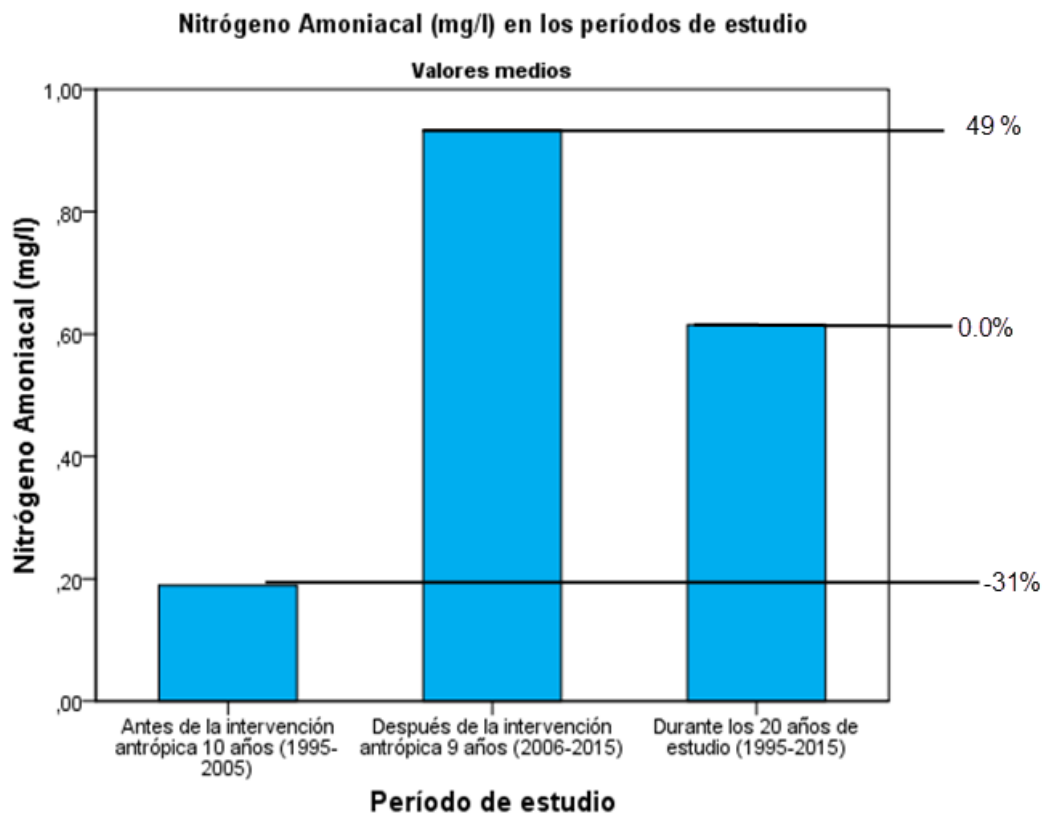
importante aclarar que además de ser un indicador de contaminación antrópica el Nitrógeno Amoniacal representa una especie reducida dentro de la química del nitrógeno por lo que este promedio no discrimina lo aportado por la química en estado natural del nitrógeno (característico de ambientes anóxicos, en las profundidades del cuerpo de agua) y lo proveniente de la contaminación de la cuenca. Por último el Nitrógeno Orgánico cuya diferencia es apreciada en la gráfica de una magnitud importante, sin embargo no supera en porcentaje el 10% al comparar DIA y AIA.



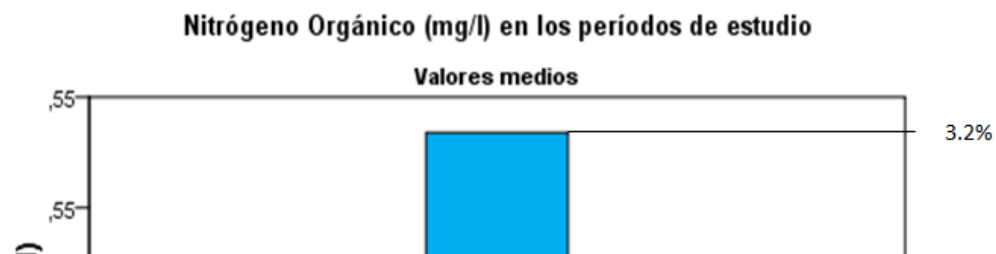
Gráfica N° 73 Fósforo total durante los tres periodos de estudio en el embalse Camatagua



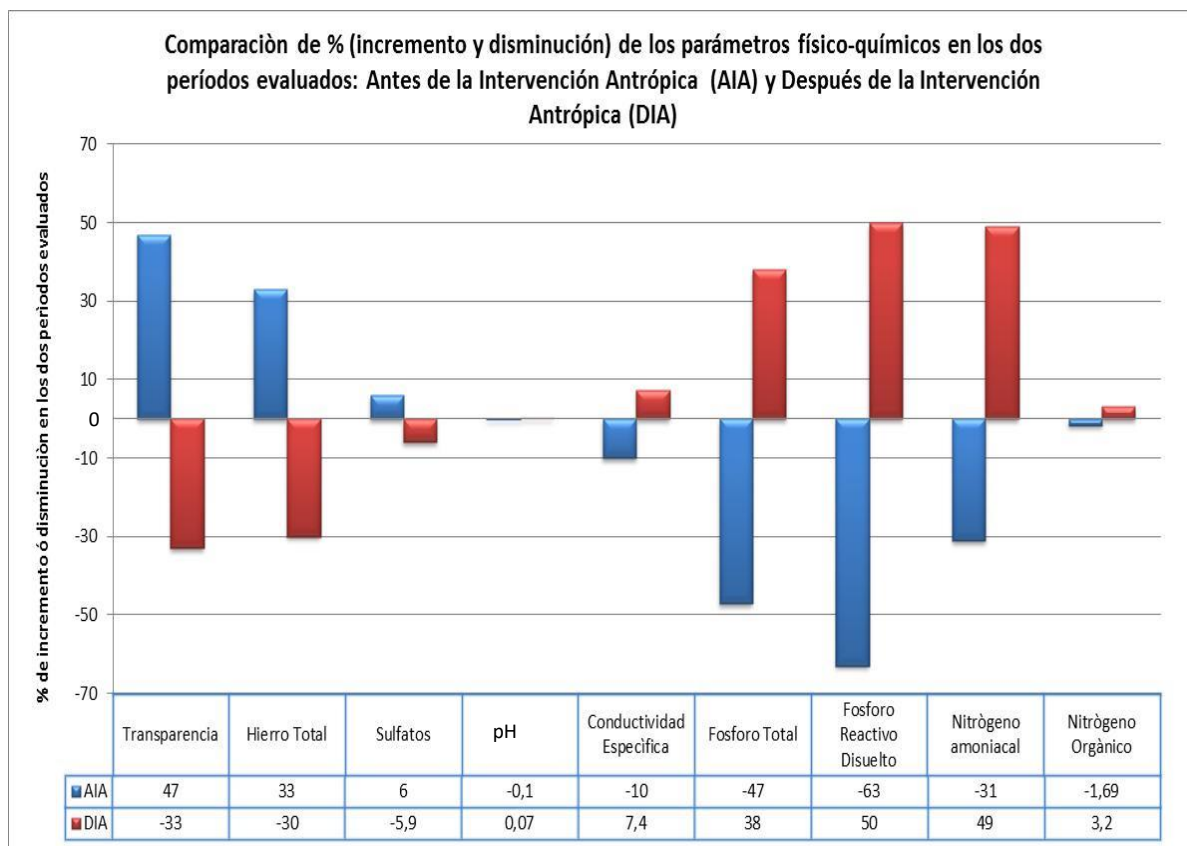
Gráfica N° 74 Fósforo reactivo disuelto durante los tres períodos de estudio en el embalse Camatagua



Gráfica N° 75 Nitrógeno Amoniacal durante los tres períodos de estudio en el embalse Camatagua



Gráfica N° 76 Nitrógeno Orgánico durante los tres períodos de estudio en el embalse Camatagua



Gráfica Nº 77 Gráfica resumen de los parámetros físico químicos evaluados en los periodos Antes de la Intervención Antrópica y Después de la Intervención Antrópica. En el periodo de estudio correspondiente a 20 años se asume el valor cero del eje.

IV.III.IX.- Aplicación de modelos de Regresión Lineal y Múltiple a los parámetros físico químicos dentro del período de estudio de 20 años (1995-2015), Antes de la intervención antrópica (1995-2005) “AIA”, Después de la intervención antrópica (2006-2015) “DIA”.

En este sentido serán presentadas las estimaciones.

1.- Índice de Saturación de Langelier (variable dependiente o criterio) y pH (variable independiente ó predictora).

Ecuación	ANOVA					Parámetros de estimación		
	R ²	F	GI1	GI2	Sig	Constante	B1	B2
Lineal	0,926	5113	1	409	0,00	-7,275	0,962	
Logarítmica*								
Exponencial*								
Cuadrática	0,926	2566	2	408	0,00	-9,410	1,472	-0,034

*Modelos que no cumplieron en las premisas estadísticas.

Tabla N° 15 Regresión lineal, ANOVA Y Parámetros de estimación para Índice de Langelier y pH.

Para el modelo lineal

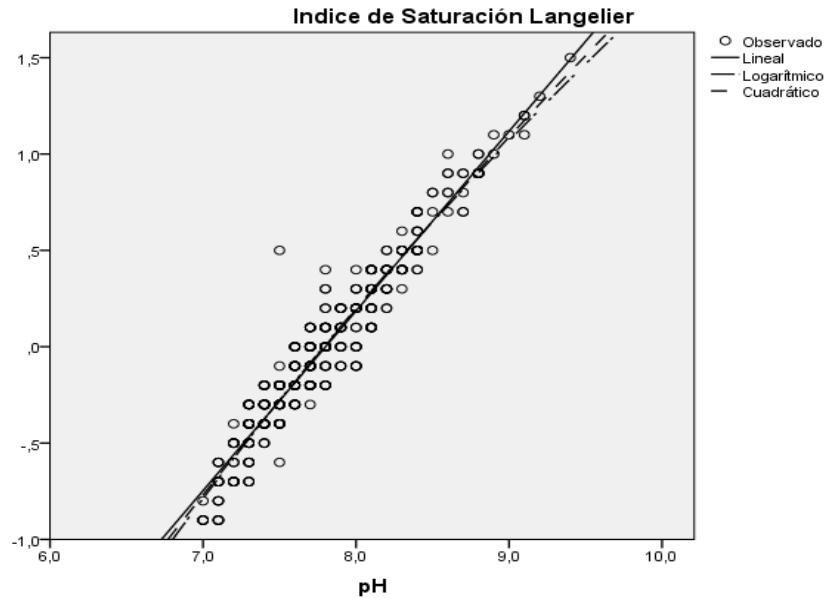
y= 0,962 x – 7,275, donde: y= Índice de Saturación de Langelier y x= pH. Así tenemos;

$$ISL = 0,962 * (pH) - 7,275$$

Para el modelo cuadrático

$$y = -0,034 x^2 + 1,472 x - 9,410$$

$$ISL = - 0,034 (pH)^2 + 1,472 (pH) - 9,410$$



Gráfica N° 78 Regresión lineal Índice de Langelier y pH.

Es importante aclarar que el Índice de Saturación de Langelier es un cálculo teórico basado en la inclusión entre otras variables del pH, por lo que no se debería esperar un resultado distinto al obtenido, sin embargo, este ejercicio de comprobación práctico consiguió corroborar la definición teórica del cálculo del Índice de Saturación de Langelier.

2.-Color Aparente (variable dependiente o criterio), Turbiedad (variable independiente o predictora).

Ecuación	ANOVA					Parámetros de estimación		
	R ²	F	Gl1	Gl2	Sig	Constante	B1	B2
Lineal	0,898	5116	1	579	0,00	11,972	0,948	
Logarítmica*	0,397							
Exponencial*	0,321							
Cuadrática	0,898	2566	2	578	0,00	12,184	0,928	0,022

*Valores de R² muy bajos.

Tabla N° 16 Regresión lineal, ANOVA Y Parámetros de estimación para Color Aparente y Turbiedad.

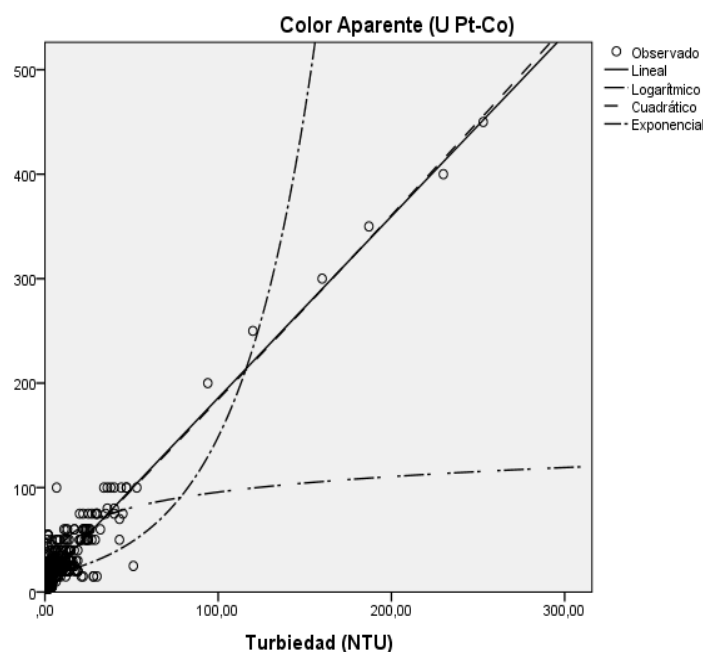
Para el modelo lineal, $y = 11,972 x + 0,948$ donde $y =$ Color Aparente y $x =$ Turbiedad. Así tenemos.

$$\text{Color Aparente} = 11,972 * (\text{Turbiedad}) + 0,948$$

Para el modelo cuadrático

$$Y = 0,022 x^2 + 0,928 x + 12,184$$

$$\text{Color Aparente} = 0,022 (\text{Turbiedad})^2 + 0,928 (\text{Turbiedad}) + 12,184$$



Gráfica N° 79 Regresión lineal Color Aparente y Turbiedad.

A continuación serán presentadas las estimaciones para el período DIA (2006-2015) en la Estación climática “Lluvia” (Desde Abril a Noviembre).

1.- Estación climática “Lluvia” (variable dependiente o criterio), Transparencia (variable independiente o predictora).

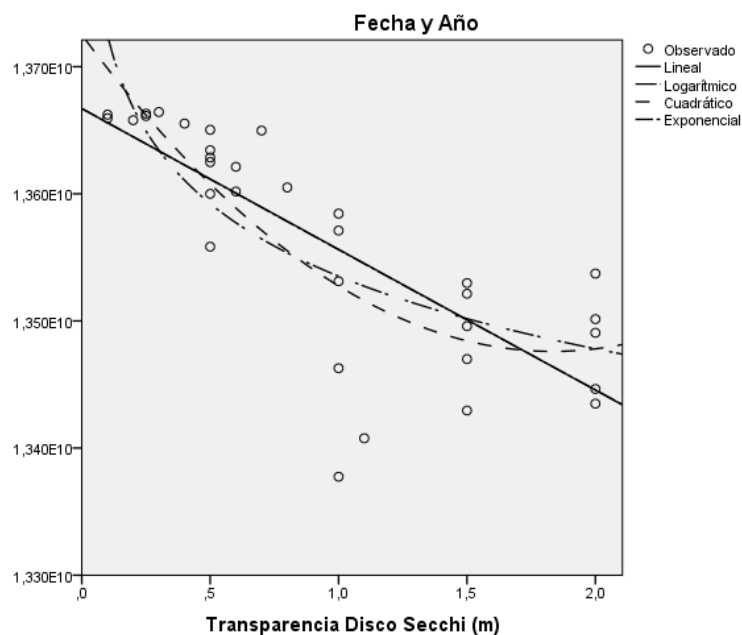
Ecuación	ANOVA					Parámetros de estimación		
	R ²	F	Gl1	Gl2	Sig	Constante	B1	B2
Lineal	0,612	48,854	1	31	0,00	1,367 ¹⁰	-11..	
Logarítmica	0,613	49,198	1	31	0,00	1,354 ¹⁰	-82..	
Exponencial	0,610	48,525	1	31	0,00	1,367 ¹⁰	-0,008	
Cuadrática	0,688	33,006	2	30	0,00	1,373 ¹⁰	-27..	740..

Tabla N° 17 Regresión lineal, ANOVA Y Parámetros de estimación para Índice de Estación climática “Lluvia”, Transparencia.

El modelo cuadrático ofrece la aproximación estadísticamente más aceptable.

Para el modelo cuadrático, y= Lluvia (desde abril hasta noviembre), x=Transparencia.

Así tenemos.



Gráfica N° 80 Regresión lineal Estación climática y Transparencia Disco Secchi.

$$\text{Lluvia (DIA,2006-2015)} = 74006341(\text{Transparencia})^2 - 271522832(\text{Transparencia}) + 1,373^{10}$$

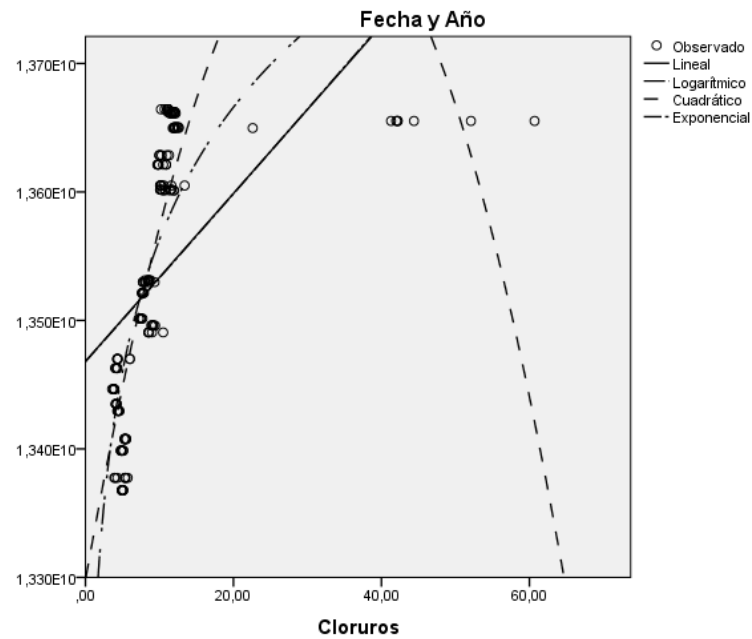
2.- Estación climática “Lluvia” (variable dependiente o criterio), Cloruros (variable independiente o predictora).

Ecuación	ANOVA					Parámetros de estimación		
	R ²	F	Gl1	Gl2	Sig	Constante	B1	B2
Lineal	0,307	70,831	1	160	0,00	1,347 ¹⁰	6535..	
Logarítmica	0,660	310,09	1	160	0,00	1,322 ¹⁰	148...	
Exponencial	0,306	70,656	1	160	0,00	1,347 ¹⁰	0,00	
Cuadrática	0,737	223,116	2	159	0,00	1,330 ¹⁰	-5018	3248..

Tabla N° 18 Regresión lineal, ANOVA Y Parámetros de estimación para Estación climática Lluvia y Cloruros.

El modelo cuadrático ofrece la aproximación estadísticamente más aceptable.

Para el modelo cuadrático, y= Lluvia (desde abril hasta noviembre), x=Cloruros. Así tenemos.



$$\text{Lluvia (DIA,2006-2015)} = 32489492 (\text{Cloruros})^2 - 501884(\text{Cloruros}) + 1,330^{10}$$

Gráfica N° 81 Regresión lineal Estación climática Lluvia y Cloruros.

A continuación serán presentadas las estimaciones para el período DIA en la Estación climática de Sequía (Desde Diciembre hasta Marzo)

1.- Estación climática “Sequía” (variable dependiente o criterio), Cloruros (variable independiente o predictora).

Ecuación	ANOVA					Parámetros de estimación		
	R ²	F	Gl1	Gl2	Sig	Constante	B1	B2
Lineal	0,772	223,193	1	66	0,00	1,327 ¹⁰	3026..	
Logarítmica*								
Exponencial	0,771	222,064	1	66	0,00	1,327 ¹⁰	0,02	
Cuadrática	0,865	208,009	2	65	0,00	1,343 ¹⁰	-2176	3514..

*Modelo de regresión no calculado

Tabla N° 19 Regresión lineal, ANOVA Y Parámetros de estimación para Estación climática Sequía y Cloruros.

El modelo cuadrático ofrece la aproximación estadísticamente más aceptable.

Para el modelo cuadrático, y= Sequía (desde Diciembre hasta Marzo), x=Cloruros. Así tenemos.

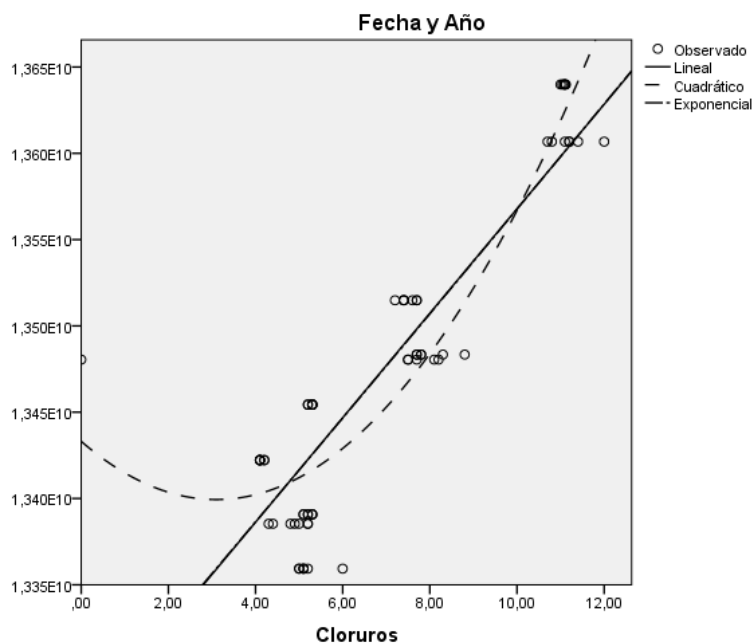
$$\text{Sequía (DIA,2006-2015)} = 3514569 (\text{Cloruros})^2 - 21765109 (\text{Cloruros}) + 1,343^{10}$$

Nº 82 Regresión
climática Sequía y

2.-

climática

(variable dependiente o criterio), Conductividad Específica (variable independiente o predictora).



Gráfica
lineal Estación
Cloruros

Estación
“Sequía”

Ecuación	ANOVA					Parámetros de estimación		
	R ²	F	Gl1	Gl2	Sig	Constante	B1	B2
Lineal	0,281	37,186	1	95	0,00	1,317 ¹⁰	1119..	
Logarítmica	0,369	55,512	1	95	0,00	1,083 ¹⁰	4694.	
Exponencial	0,281	37,132	1	95	0,00	1,317 ¹⁰	8,27 ⁻⁵	
Cuadrática	0,713	116,652	2	94	0,00	1,111 ¹⁰	1247	-14840

Tabla Nº 20 Regresión lineal, ANOVA Y Parámetros de estimación para Estación climática Sequía y Conductividad.

El modelo cuadrático ofrece la aproximación estadísticamente más aceptable.

Para el modelo cuadrático, $y = \text{Sequía}$ (desde Diciembre hasta Marzo), $x = \text{Conductividad Específica}$. Así tenemos

$$\text{Sequía (DIA, 2006-2015)} = -14840 (\text{Conductividad})^2 + 12475523 (\text{Conductividad}) + 1,111^{10}$$

Finalmente fueron presentadas seis relaciones descritas por los modelos lineal y cuadrático en los 20 años de estudio y en el período DIA (2006-2015), discriminando para este último período el comportamiento de cada parámetro de acuerdo a la estación climática, ya sea Lluvia o Sequía. Es menester mencionar que para el período AIA (1995-2005) no se encontraron comportamientos representados por estos modelos de regresión que se ajustaran a los criterios establecidos para incluirlas como una predicción cercana a la realidad. A manera de recordatorio los criterios considerados fueron los siguientes: Coeficiente de Determinación lineal (Coeficiente de Correlación de Pearson) y los Coeficientes de Correlación Múltiples (para los modelos no lineales) o R^2 aceptables (es decir cercanos a 1), por otra parte la uniformidad o concordancia en el gráfico de dispersión y por último el nivel de significancia (Sig) que arroja el modelo (p valor $< 0,05$).

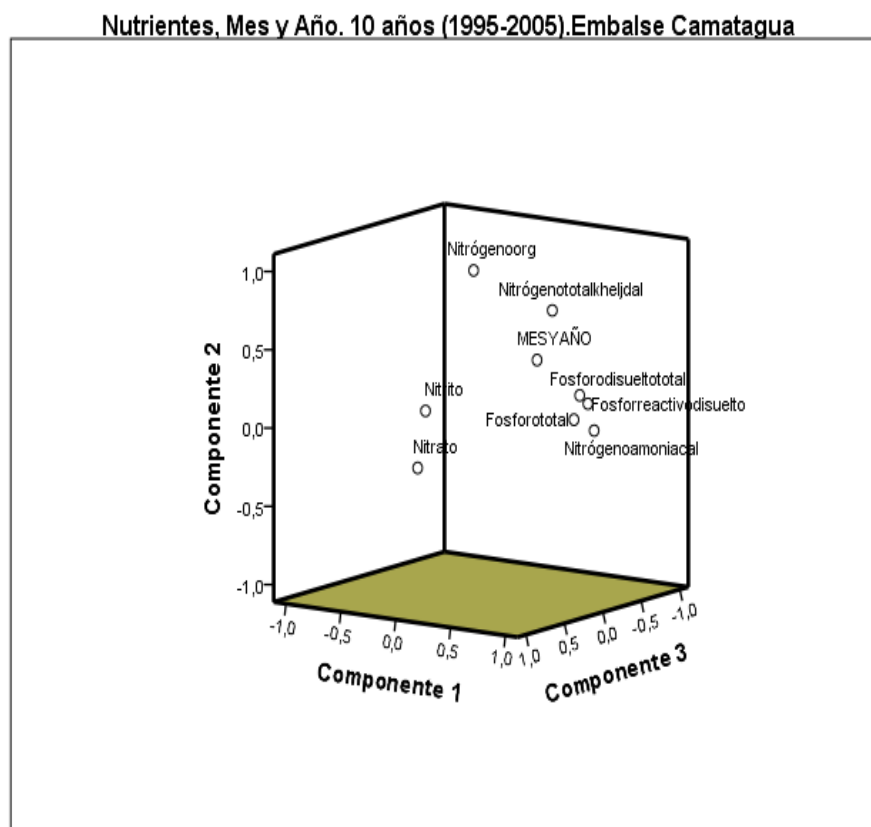
En este sentido para el período de 20 años de estudio del embalse Camatagua dos fueron las correlaciones obtenidas, el Índice de Saturación de Langelier con el pH, luego el Color Aparente con la Turbiedad. Para el período DIA (Después de la Intervención Antrópica), en la estación climática de Lluvia, fue obtenido precisamente la estación climática Lluvia en relación con la Transparencia además del Cloruro. Por otra parte, para la estación climática Sequía resultó en correlación nuevamente con el Cloruro y la Conductividad Específica.

Podríamos concluir que para el período DIA (2006-2015) el parámetro Cloruros (presente en ambas estaciones climáticas) resultó en un indicador de intervención antrópica de origen doméstico (la influencia al reservorio proviene fundamentalmente de este tipo de origen), la Conductividad Específica (en la estación climática sequía) como parámetro influenciado, entre otros, por el anión mayoritario Cloruros, que adicionalmente en esta estación climática no estaría siendo afectado por el efecto

dilución ocasionado por las lluvias, y por último la Transparencia en la estación climática de Lluvia, influenciado precisamente por un mayor volumen en la columna de agua y descenso de constituyentes que afectan la penetración de luz solar en el estrato superior del embalse (Transparencia).

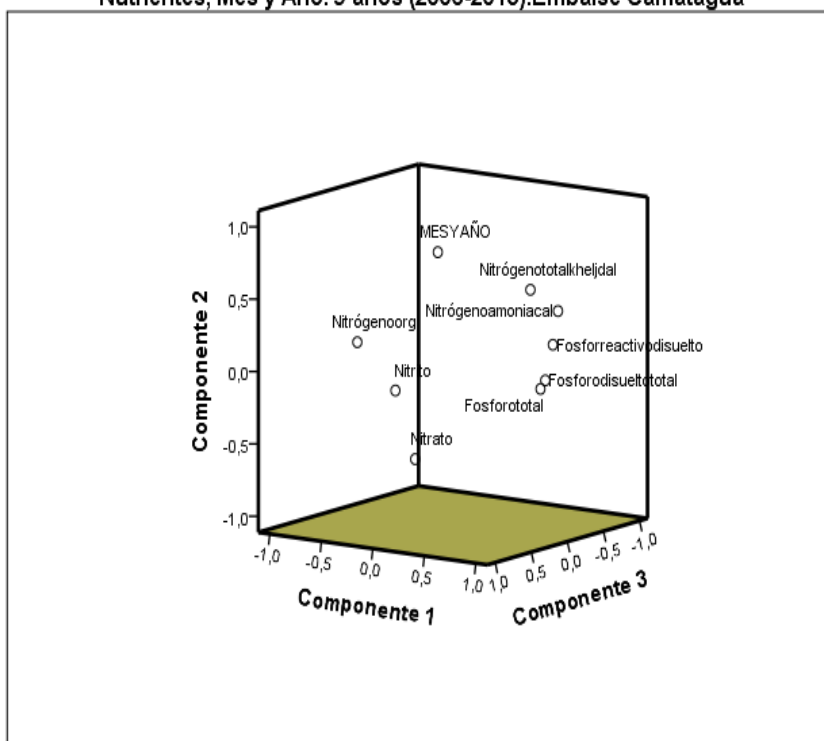
IV.III.X.- Aplicación de análisis factorial basado en el modelo de Análisis de Componentes Principales (ACP) a los parámetros físico químicos dentro de los períodos de estudio de 20 años (1995-2015), Antes de la Intervención Antrópica (AIA) 10 años (1995-2005), Después de la Intervención Antrópica (DIA) 9 años (2006-2015).

El ACP que contiene las especies químicas que aportan como nutrientes (especies de Fósforo y Nitrógeno) a la biomasa planctónica, generó tres grupos (por ello la forma cúbica), en AIA y el período de 20 años pudiésemos agrupar de la siguiente manera: 1.- Nitratos y Nitritos, 2.- Nitrógeno Orgánico y Nitrógeno Total Kjeldahl y 3.- Todas las especies de Fósforo con el Nitrógeno Amónico, incluyendo el Mes y Año del correspondiente período de estudio. No obstante, para el DIA (gráfica N° 83) se observa mayor dispersión en el gráfico, no es clara la tendencia en comparación a AIA y a los 20 años de estudio.



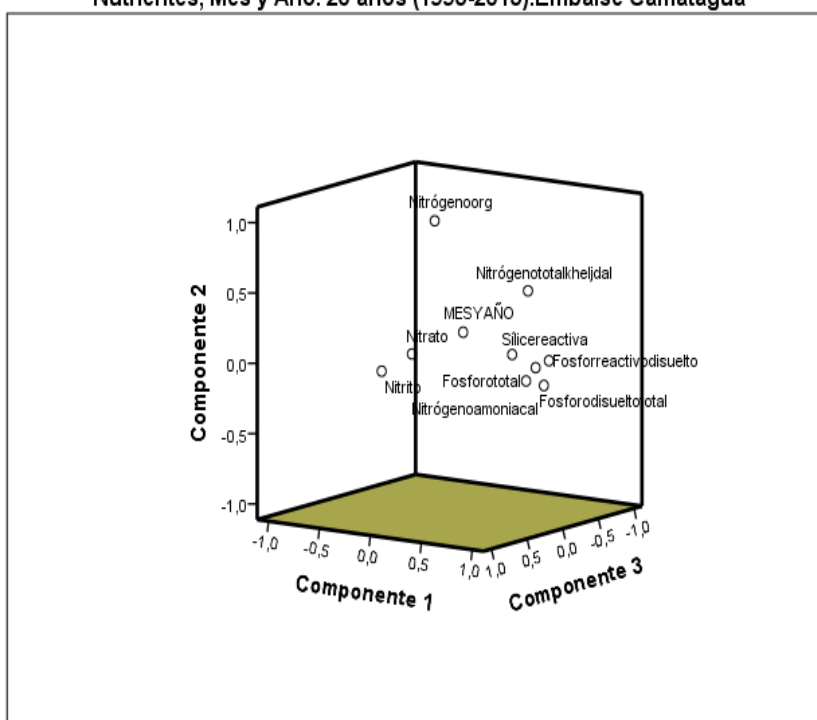
Gráfica N° 83 ACP: Nutrientes, Mes y año. Durante 10 años

Nutrientes, Mes y Año. 9 años (2006-2015). Embalse Camatagua



Gráfica N° 84 ACP: Nutrientes, Mes y año. Durante 9 años

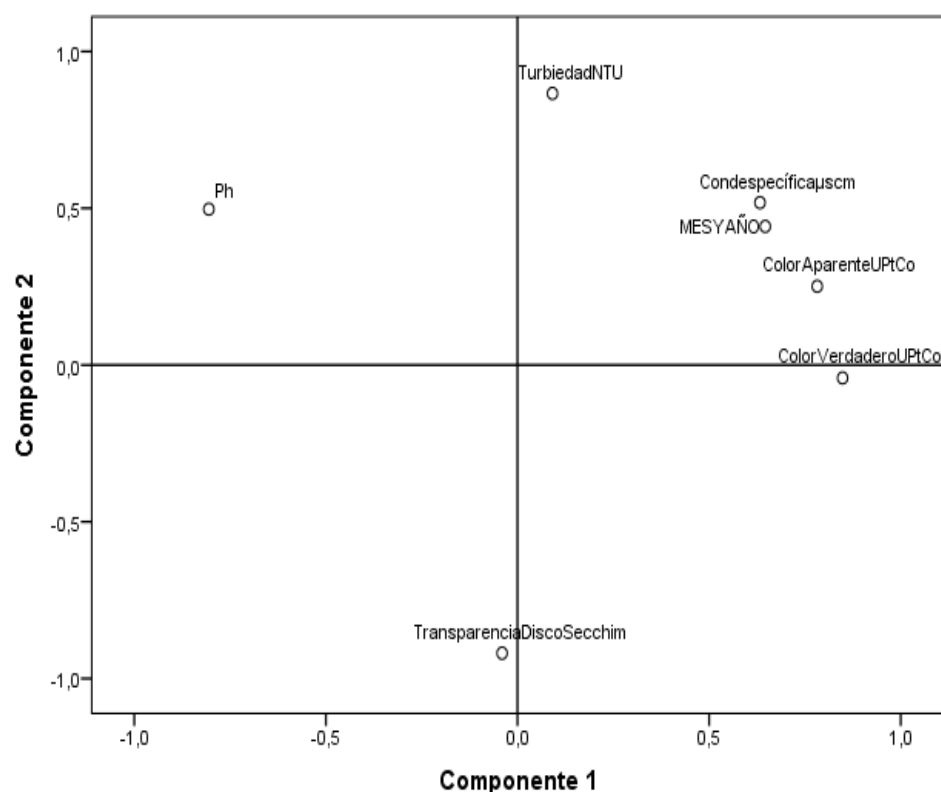
Nutrientes, Mes y Año. 20 años (1995-2015). Embalse Camatagua



Gráfica N° 85 ACP: Nutrientes, Mes y año. Durante 20 años

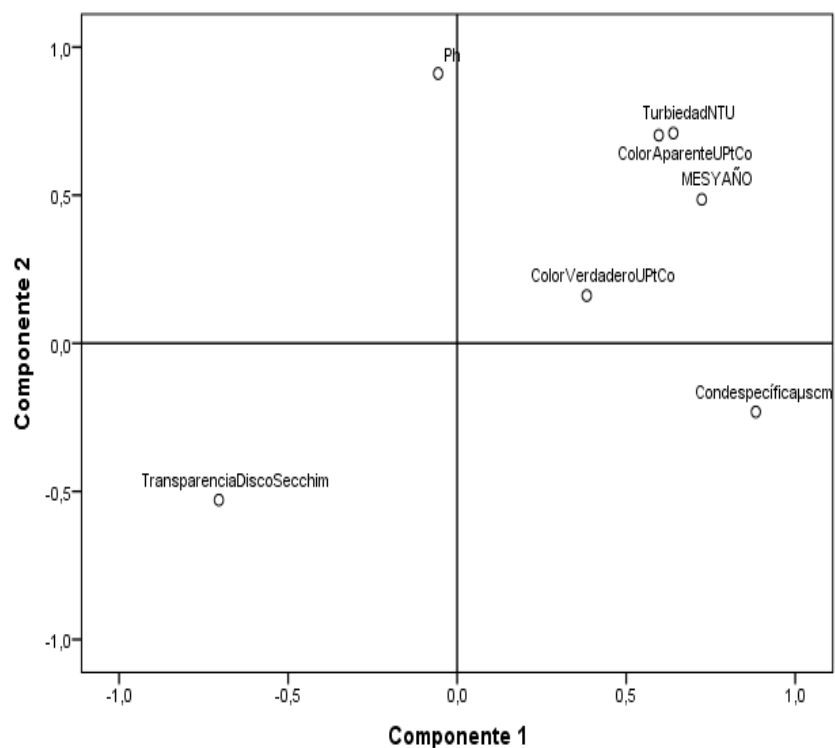
En estos agrupamientos fueron incluidos los componentes organolépticos (pH, Turbiedad, Color Aparente y Verdadero), Conductividad específica, Transparencia y la variable temporal Mes y Año. En los tres períodos el análisis factorial reunió las variables en dos grupos (por ello las gráficas N° 85-86-87 en dos dimensiones). En este sentido, para el período DIA y los 20 años (1995-2015) las gráficas muestran comportamientos similares, en contraste al período AIA (gráfica N° 85), en donde si bien existe cierto grado de similitud en las agrupaciones, el parámetro Turbiedad es el que escapa en distancia (euclidiana) con el resto de los parámetros, concluyendo con esta observación la característica unitaria del parámetro Turbiedad antes de la intervención antrópica.

Componentes organolépticos, Cond. Esp., Mes y Año. 10 años (1995-2005). Embalse Camatagua.



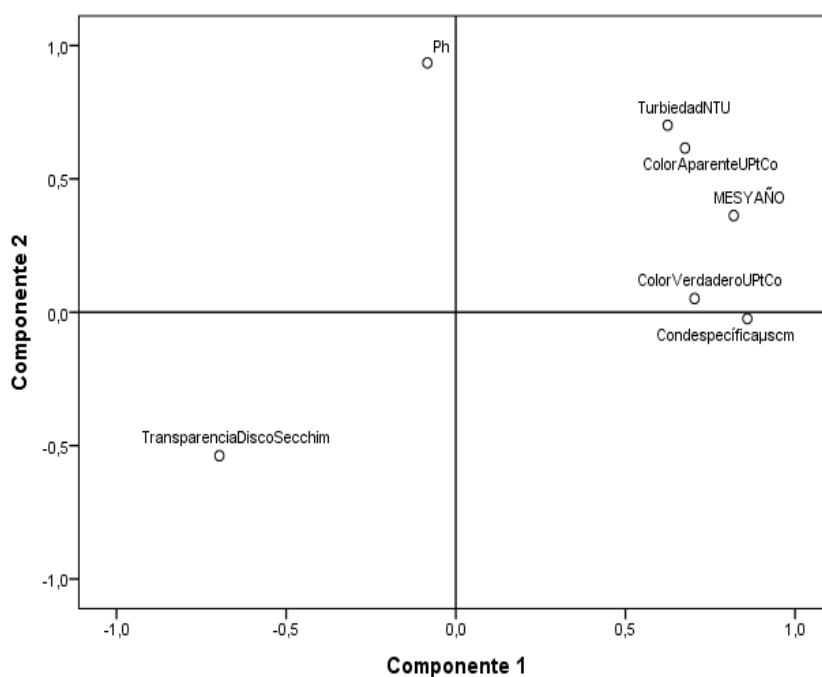
Gráfica N° 86 ACP: Componentes organolépticos, Cond. Esp., Mes y año. Durante 10 años

Componentes organolépticos, Cond. Esp., Mes y Año. 9 años (2006-2015). Embalse Camatagua



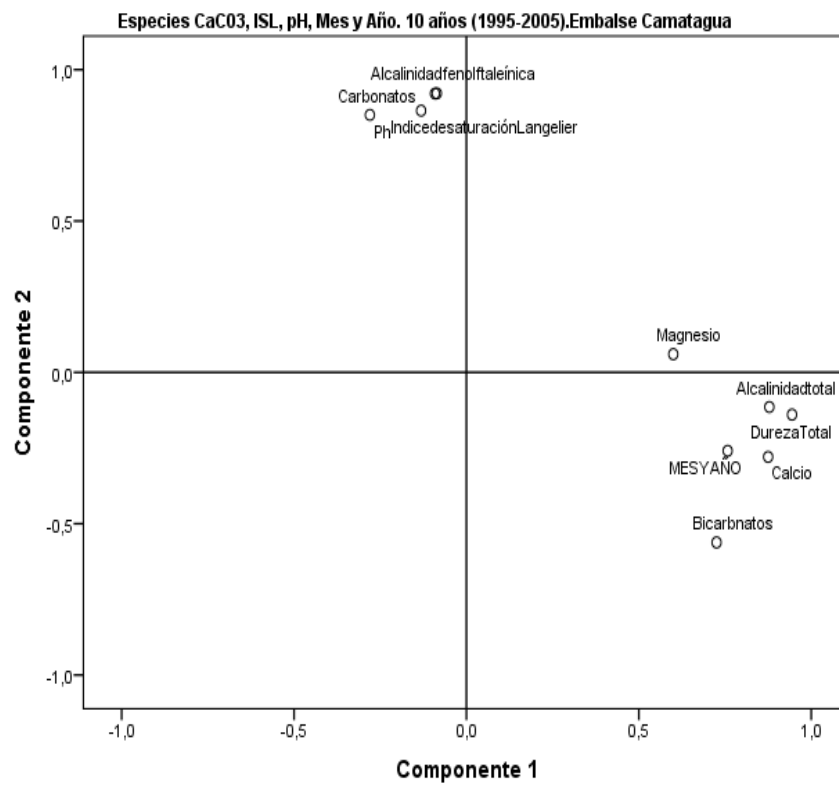
Gráfica N° 87 ACP: Componentes organolépticos, Cond. Esp., Mes y año. Durante 9 años

Componentes organolépticos, Cond.Esp., Mes y Año. 20 años (1995-2015).Embalse Camatagua

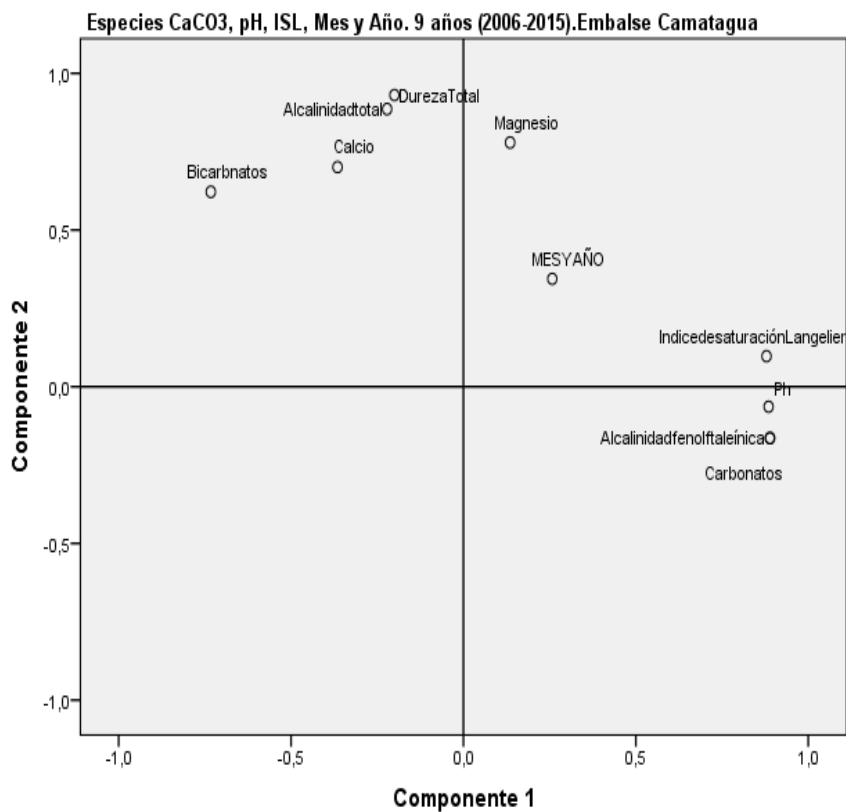


Gráfica N° 88 ACP: Componentes organolépticos, Cond. Esp., Mes y año. Durante 20 años

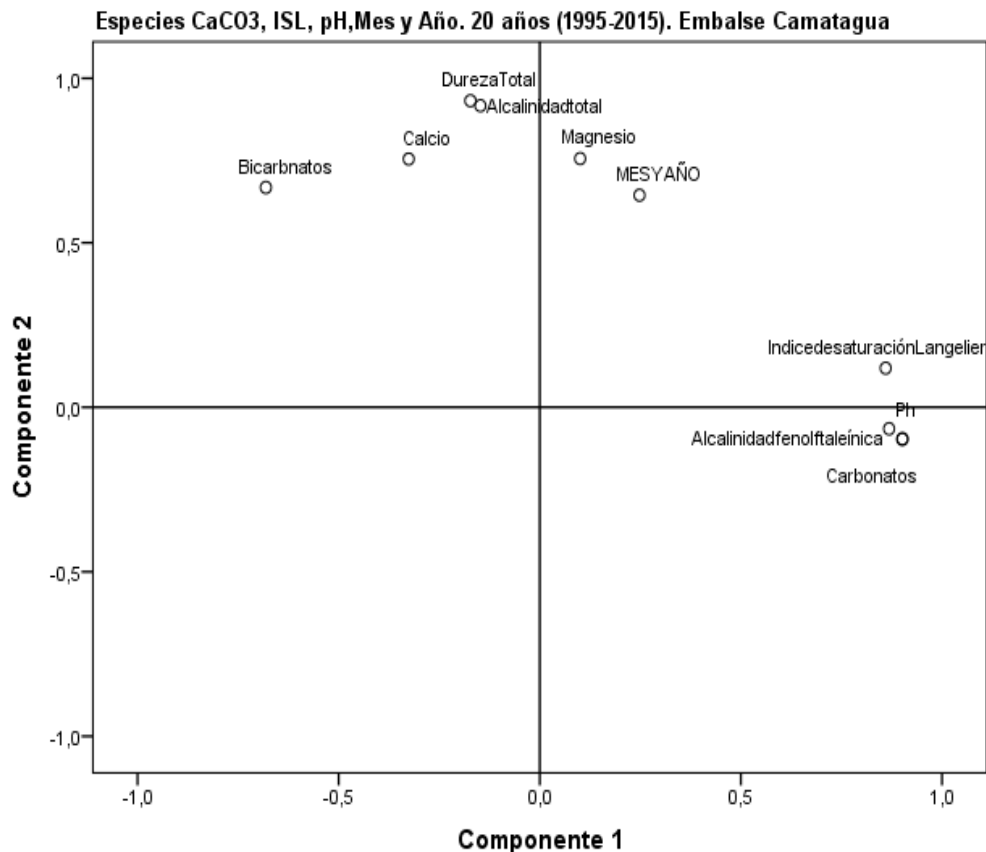
Para este estudio fueron incluidos los parámetros que son influenciados por el equilibrio del sistema carbonato, además del pH, Índice de Saturación de Langelier y la variable Mes y Año. El AIA (gráfica N° 88) presenta dos grupos, cuyos parámetros se encuentran bastante cercanos (desde la perspectiva de la distancia euclidiana) el primer grupo correspondiente a la Alcalinidad Fenolftaleínica, pH, Carbonatos e Índice de Saturación de Langelier, estas especies, no aleatoriamente, están cercanas, hemos mencionado en pruebas estadísticas anteriores el carácter predominantemente alcalino del pH de las aguas del reservorio objeto de investigación, la especie Carbonato promueve este tipo de pH (alcalino), por otra parte la Alcalinidad Fenolftaleínica está asociada condiciones de determinación analítica, es decir, en la titulación volumétrica de este análisis el cambio de viraje en el punto final ocurre a pH 8,3 y por último el Índice de Saturación de Langelier relacionado directamente con el valor de pH, según definiciones teóricas y demostrado en la práctica en el apartado de regresiones múltiples aplicado en el apartado anterior, al otro grupo corresponden la Dureza Total, Alcalinidad Total, Magnesio, Calcio y Bicarbonato junto con la variable Mes y Año, es concluyente el comportamiento en condiciones de no intervención antrópica de una cuenca, en este caso del embalse Camatagua, para obtener una agrupación como ésta, químicamente en condiciones ideales para su interpretación. Para el período DIA y los 20 años de estudio (gráficas 89 -90) se aprecia una mayor dispersión en la agrupación de los parámetros físico químicos, asumiendo la fuerte influencia de la intervención sobre el período completo de estudio debido a la semejanza obtenida en los gráficos presentados.



Gráfica N° 89 ACP: Especies CaCO₃, ISL, pH, Mes y Año. 10 años



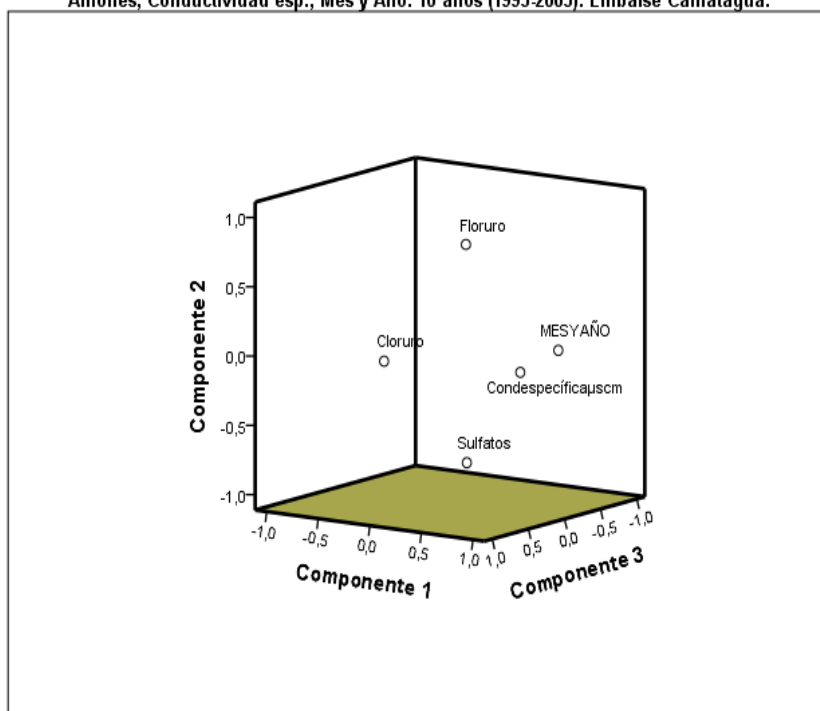
Gráfica N° 90 ACP: Especies CaCO₃, ISL, pH, Mes y Año. 9 años



Gráfica N°91. ACP: Especies CaCO₃, ISL, pH, Mes y Año. 20 años

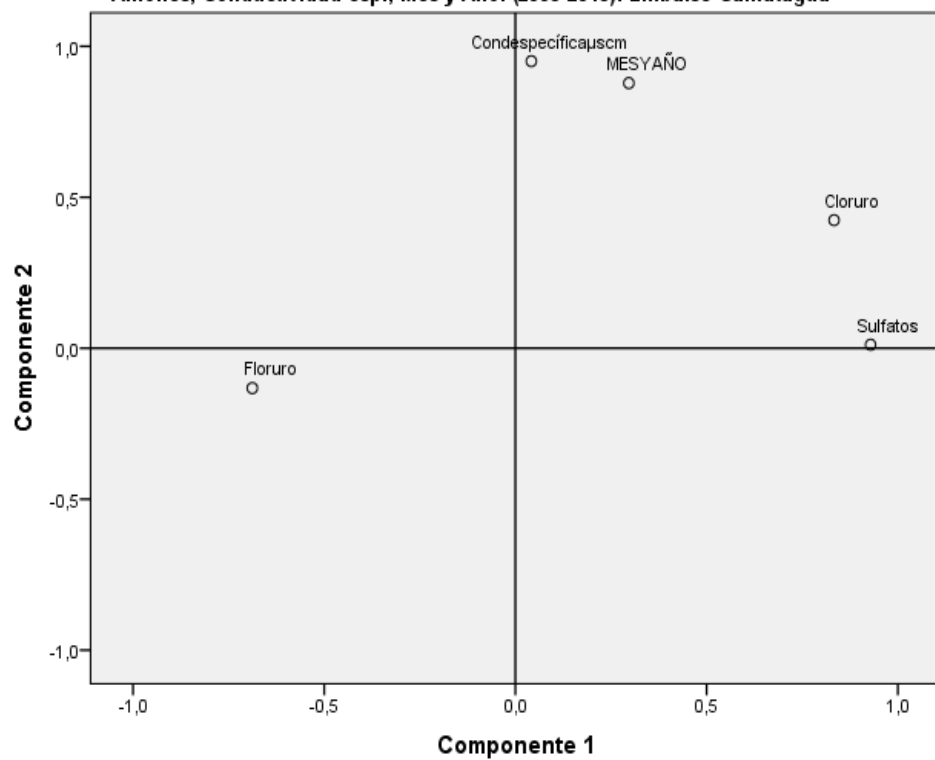
A continuación fueron objeto de estudio los aniones Fluoruro, Cloruro y Sulfatos, la Conductividad específica y la variable Mes y Año, obteniéndose similitud entre el período DIA y los 20 años de estudio (gráfica N° 92-93) , en contraste al gráfico de AIA (gráfica N° 91) en donde, el hecho que se haya generado un espacio tridimensional, da cuenta de lo disímil entre AIA comparando con DIA y los 20 años de estudio. Por último se observa en Mes y Año y Conductividad específica una cercanía notable para DIA y 20 años de estudio.

Aniones, Conductividad esp., Mes y Año. 10 años (1995-2005). Embalse Camatagua.

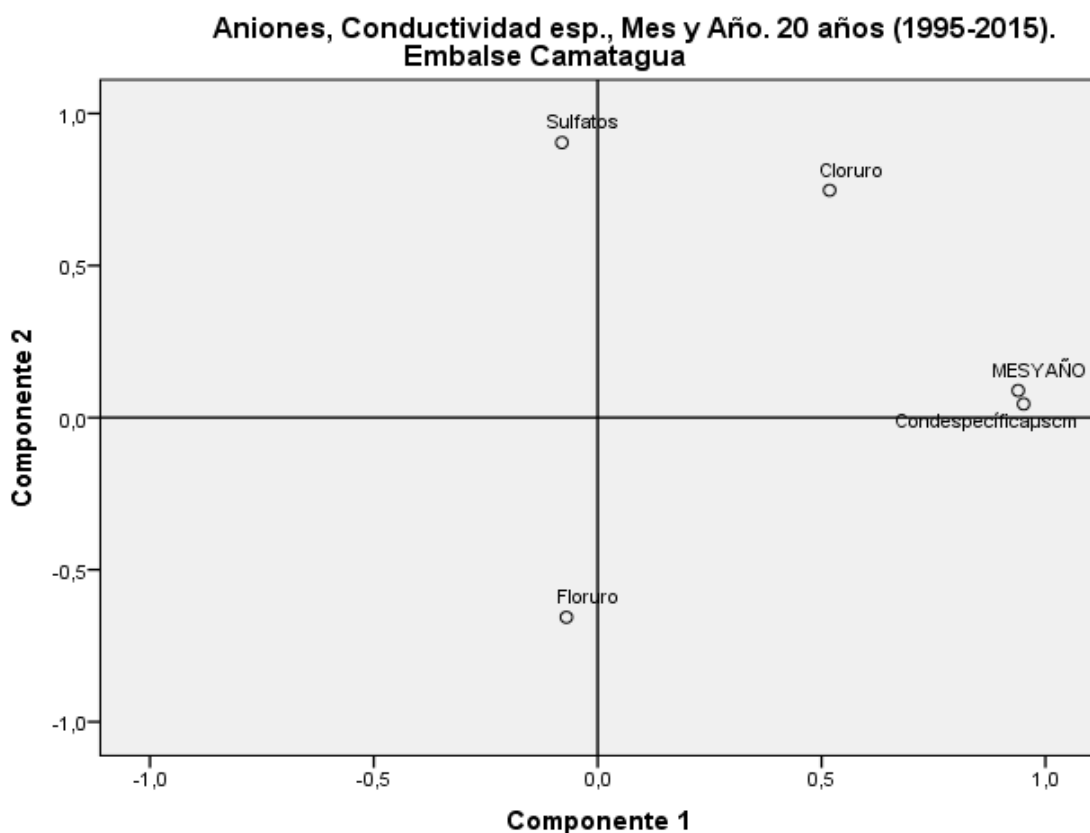


Gráfica N° 92 ACP: Aniones, Cond. Esp. Mes y Año. 10 años

Aniones, Conductividad esp., Mes y Año. (2005-2015). Embalse Camatagua

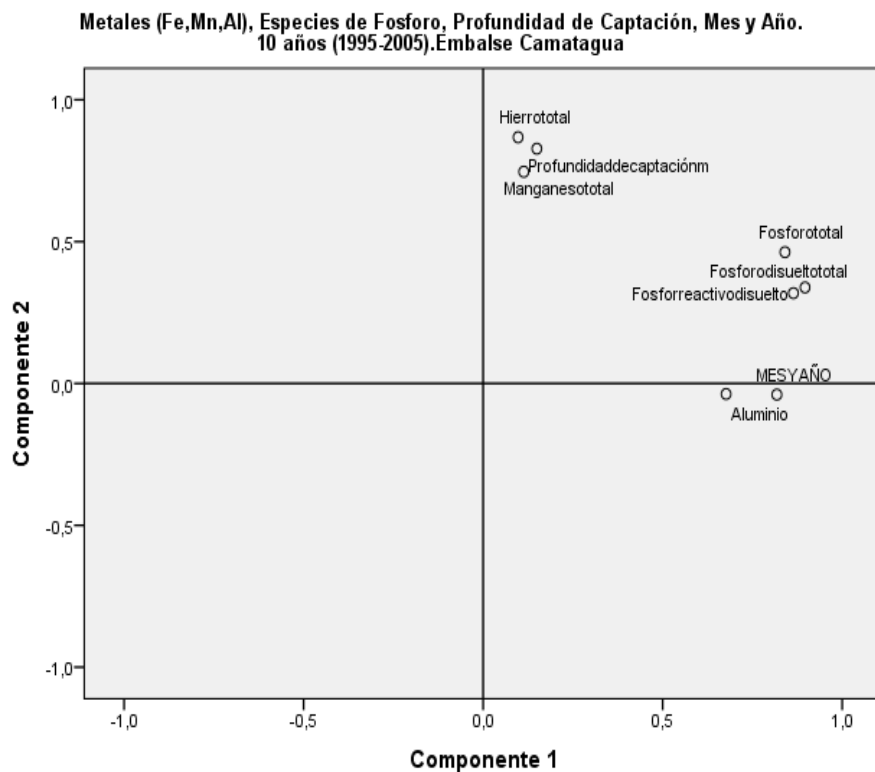


Gráfica N° 93 ACP: Aniones, Cond. Esp. Mes y Año. 9 años

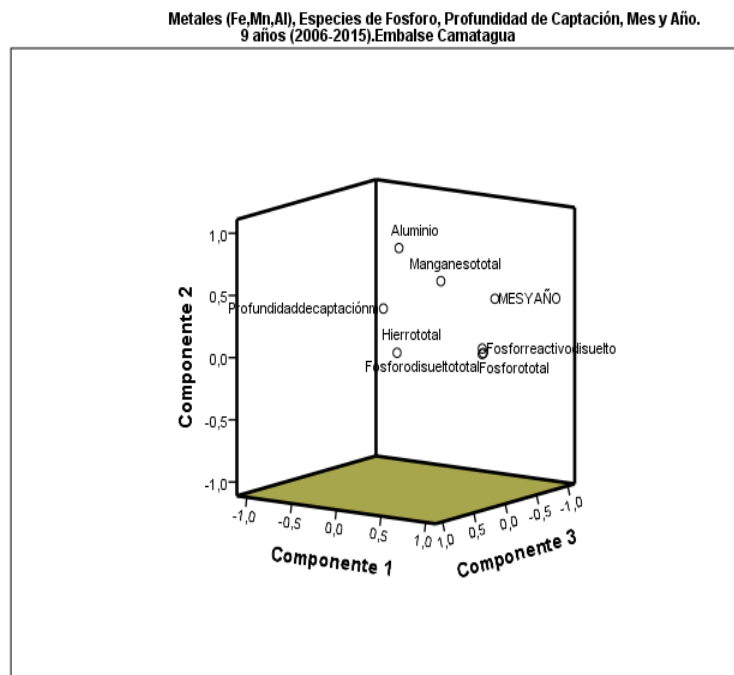


Gráfica N° 94 ACP: Aniones, Cond. Esp. Mes y Año. 20 años

Para concluir con el ACP, fue incluida la variable Profundidad de Captación junto con Mes y Año, además de las especies de Fósforo y los metales Hierro Total, Manganeseo Total y Aluminio. Para el período AIA (gráfica N° 94) se obtuvieron dos grupos los cuales corresponden a los metales Hierro Total y Manganeseo Total junto con la Profundidad de Captación, debido al comportamiento de esta especie conforme aumenta la profundidad en la columna de agua, en el varía su solubilidad de acuerdo al estado de oxidación de la especie química relacionado evidentemente con las condiciones redox en las diferentes profundidades del reservorio, por otra parte las especies de Fósforo y la variable Mes y Año junto con el metal Aluminio. Esta gráfica N° 94 contrasta notablemente con la dispersión de datos observada en DIA y los 20 años de estudio en donde el análisis factorial agrupó en tres dimensiones (por eso el cubo de tres componentes).

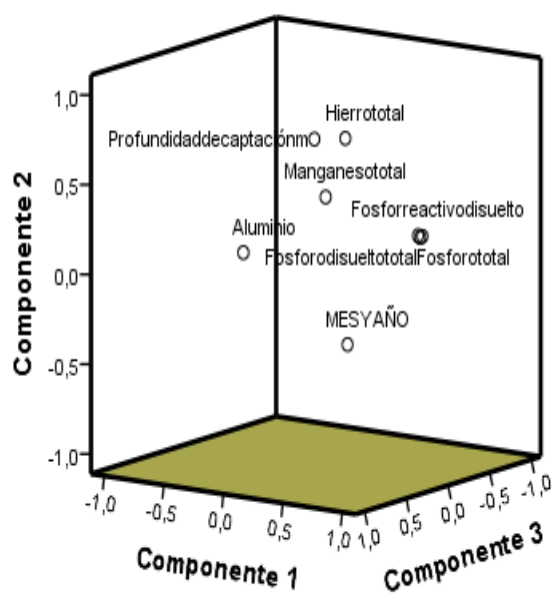


Gráfica N° 95 ACP: Metales, Especies de fósforo, Profundidad de captación, Mes y año. 10 años



Gráfica N° 96 ACP: Metales, Especies de fósforo, Profundidad de captación, Mes y año. 9 años

**Metales (Fe,Mn,Al), Especies de Fosforo, Profundidad de Captación, Mes y Año.
20 años (1995-2015). Embalse Camatagua.**



Gráfica N° 97 ACP: Metales, Especies de fosforo, Profundidad de captación, Mes y año. 20 años

IV.IV.- Evaluación de la eficiencia del sistema alternativo de tratabilidad con respecto al sistema actual instalado. Objetivo Específico N°4

IV.IV.I Muestreos compuestos (parámetros *in situ*) en Planta Piloto y la Planta de Tratamiento

Inicialmente serán presentados los resultados del agua cruda (sin tratar) a fin de comparar la remoción o no remoción de los parámetros físico químicos con respecto a los procesos de tratamiento en ambos sistemas, es necesario acotar que la misma agua cruda es la que posteriormente será tratada por ambos sistemas de tratamiento.

Resultados de parámetros <i>in situ</i> para el agua cruda (promedios del muestreo compuesto)				
Fecha	Turbiedad (NTU)	pH	Conductividad específica ($\mu S/cm$)	Color Aparente (U Pt-Co)
25/09/2015	15	7,9	343	35
27/10/2015	22	8,3	361	45
08/01/2016	17	7,8	372	55
12/02/2016	11	8,5	370	25
27/05/2016	5	8,5	368	35

Tabla N° 21 Resultados de parámetros físico químicos *in situ* para el agua cruda (promedios del muestreo compuesto)

Recordando la Norma Mexicana de 1996-SEMARNAT para la aplicación de muestreos compuestos fue ejecutada la metodología recomendada por ésta. Este estudio fue realizado para las muestras finales de cada uno de los sistemas de tratamiento, es decir para las muestras filtradas. Es importante destacar que para algunos parámetros organolépticos, químicos y biológicos fue calculado un valor referencial para determinar la magnitud de la remoción de la planta piloto con respecto a la planta de tratamiento, no como un porcentaje de remoción ya que para este valor se deben realizar las caracterizaciones de las muestras crudas y tratadas. Para calcular el valor referencial "Magnitud removida por la Planta Piloto" se asumió el resultado arrojado por la Planta de Tratamiento como el total y a este se le resto el obtenido en la Planta Piloto para presentar la magnitud de remoción de la Planta Piloto con respecto a la Planta de Tratamiento.

Serán comparados los resultados de los parámetros medidos *in situ* durante las 5 campañas de muestreos compuestos realizados al sistema alternativo de tratabilidad, es decir, la Planta Piloto y al sistema actual instalado Planta de Tratamiento Caujarito.

Muestreos compuestos (parámetros <i>in situ</i>)									
Fecha	Hora de captación	Planta Piloto				Planta Caujarito (Convencional)			
		Turbiedad	pH	Conductividad	Color Aparente	Turbiedad	pH	Conductividad	Color Aparente
25/09/2015	09:30	1,5	7,06	329	10	2,8	6,98	334	15-20
	10:30	0,88	7,1	329	10	3,6	7,02	330	15-20
	11:30	0,87	7,08	330	10-12	3,83	6,99	328	15-20
	12:30	0,84	7,18	333	5-10	4,31	7,08	332	20
	12:40*	0,9	7,15	331	5	3,9	7,01	330	20
27/10/2015	09:35	2,54	6,97	340	10	5,79	7,07	317	20
	10:35	0,65	6,68	342	<5	5,45	6,97	325	25
	11:35	0,47	6,66	345	5-10	4,66	6,94	331	25-30
	12:35	0,39	6,96	344	5-10	4,1	6,96	332	30
	12:45*	0,934	7,07	340	5	4,86	7,23	323	25
08/01/2016	11:00	4,4	6,8	333	20	5,3	6,8	329	30
	12:00	4,6	7,05	332	20	5	6,8	328	30
	01:00	4,6	7,05	339	20	5,5	6,8	326	35
	02:00	5,5	7,2	334	25	5,7	6,8	328	35-40
	03:00	5,5	7,02	311	25	5,8	6,8	328	40
	03:10*	5,9	7,26	321	25	5,9	7,26	328	30
12/02/2016	01:00	1,9	6,95	336	10-12	3	6,7	325	20
	02:00	2,02	6,93	336	5-10	2,96	6,8	338	15
	03:00	2,01	6,86	332	5-10	2,93	6,74	339	15
	04:00	1,85	6,9	326	10	3,05	6,76	336	15
	05:00	1,8	6,96	333	10	3,09	6,9	338	15
27/05/2016	11:30	4,63	7,66	324	15-20	4,4	7,26	332	40
	12:30	2,17	7,7	329	15-20	3,7	7,2	331	35
	01:30	2,1	7,7	333	15	3,7	7,2	334	35
	02:30	2,3	7,51	338	20-25	3,5	7,2	335	20
	02:40*	2,57	8,01	324	15-20	3,8	7,65	331	30-35

Tabla N° 22 Resultados de parámetros físico químicos *in situ* para el agua tratada (en ambos sistemas de tratamiento)

*Hora en la cual fueron unidas el pool de submuestras para obtener un resultado referencial final de ambas plantas.

A continuación serán presentados los resultados del parámetro Turbiedad para las 5 fechas de muestreo, incluyendo la magnitud removida por el sistema alternativo de tratabilidad y la concentración de coagulantes.

Fecha de muestreo	Agua cruda	Pool de submuestras (Turbiedad)		Magnitud removida por cada sistema de tratamiento	
		Planta Piloto	Planta de tratamiento	Planta Piloto	Planta de tratamiento
25/09/2016	15	0,9	3,9	14.1	11.1
27/10/2016	22	0,93	4,86	21.1	17.1
08/01/2016	17	5,9	5,9	11.1	11.1
12/02/2016	11	1,8	3,09	9.2	7.91
27/05/2016	5	2,57	3,8	2.43	1.2

Tabla N° 23 Turbiedad (in situ) de la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento y magnitud removida por cada sistema de tratamiento con respecto al agua cruda.

Para los meses de septiembre y octubre la Planta Piloto logró remover en promedio 3,5 UNT de Turbiedad con respecto a la Planta de Tratamiento, en el mes de enero la remoción fue nula (planta piloto vs planta de tratamiento), en febrero y mayo fue obtenida una magnitud de remoción de 0,94 UNT de turbiedad en promedio

Fecha de muestreo	Magnitud removida por la Planta Piloto (UNT)	Aplicación de coagulantes	
		Planta Piloto	Planta de Tratamiento
25/09/2016	14.1	5 ppm de Sulfato de Aluminio Sólido	
27/10/2016	21.1	16 ppm de Sulfato de Aluminio Sólido	
08/01/2016	11.1	25 ppm (Sulfato de Aluminio Sólido) y 30 ppm (Sulfato de Aluminio Líquido)	
12/02/2016	9.2	8 ppm de Sulfato de Aluminio Líquido	
27/05/2016	2.43	12 ppm de Sulfato de Aluminio Líquido	

Tabla N° 24 Comparación de la turbiedad removida por la Planta Piloto y la aplicación de coagulantes aplicada las plantas de tratamiento.

Con respecto a la aplicación de coagulantes, es evidente la influencia del estado físico del coagulante, sólido ó líquido, obteniéndose la mayor eficiencia en la remoción al utilizar el coagulante, en este caso, Sulfato de Aluminio Sólido.

Sin embargo, existen otras variables intervinientes entre la eficiencia del coagulante y la remoción de la turbiedad, que a continuación son citadas.

- pH: el rango de pH es función del tipo de coagulante a ser utilizado y de la naturaleza del agua a tratar; si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante; por lo tanto la

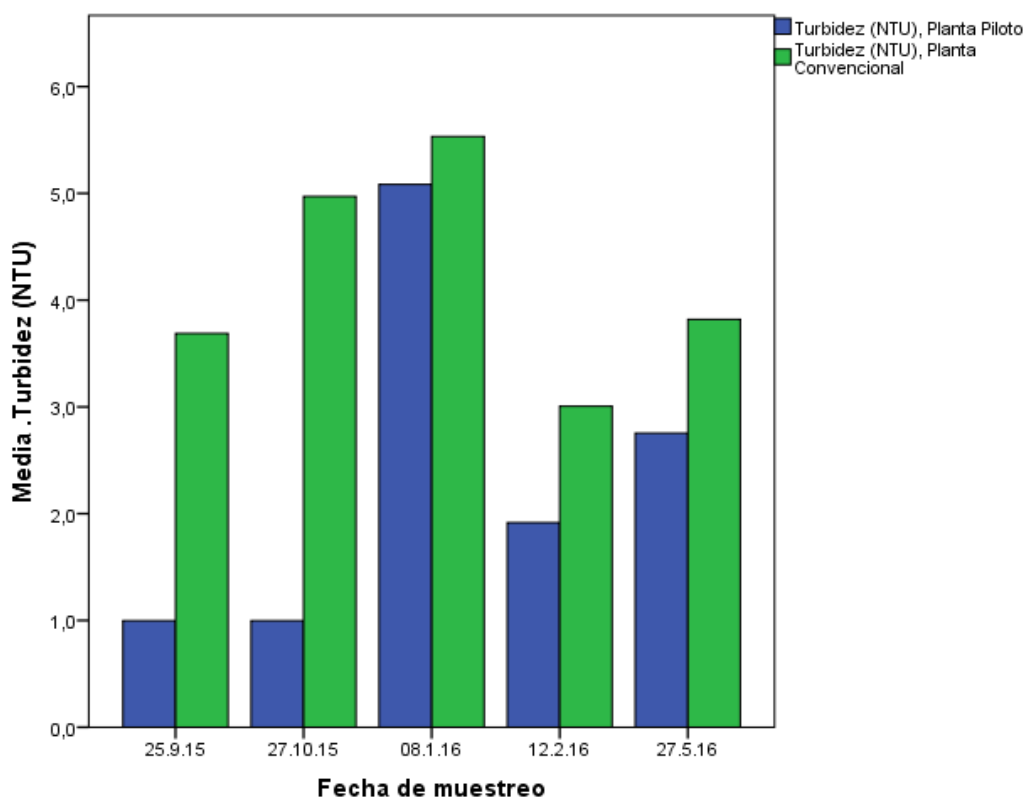
dosis requerida es alta. Para sales de aluminio el rango de pH para la coagulación es de 6.5 a 8.0 y para las sales de hierro, el rango de pH óptimo es de 5.5 a 8.5 unidades, en este sentido el pH de las aguas no influye en la concentración de aplicación de coagulante.

- Influencia de la temperatura del agua: variable descartada.
- Influencia de la mezcla (rápida y lenta): en este caso no existe punto de comparación debido a las distintas tecnologías de tratamiento de las plantas, en la planta piloto (flotación por aire) y en la planta de tratamiento un sistema convencional.
- Potencial Zeta: a pesar que esta investigación escapa del alcance de esta medida, es importante tomarlo en cuenta para ajustar las concentraciones de coagulantes para la estabilización coloidal.
- Alcalinidad: parámetro no medido in situ en este estudio.

Con este compendio de variables intervinientes en el proceso de coagulación podríamos afirmar que en términos operacionales el estado sólido del coagulante fue más efectivo que el estado líquido.

Por otra parte, la estación climática podría estar influyendo en este proceso, ya que para septiembre y octubre son estaciones climáticas tradicionalmente de lluvias en el embalse Camatagua, factor que incrementa la turbiedad en las aguas y que por tamaño coloidal resulta electrostáticamente menos complejo aglutinar y/o coagular partículas y por ende remover una mayor proporción que en estaciones climáticas secas en donde resulta más complejo ajustar las dosis de coagulantes para aglutinar electrostáticamente las partículas ya que están en menor volumen con respecto a la estación de lluvia.

A continuación se muestran los promedios de las Turbiedades en las 5 fechas de muestreos, destacando que fueron promediados y graficados los 4 resultados de las medidas in situ, no así de la medida obtenida en la unión del pool de submuestras.



Gráfica N° 98 Turbiedad de la Planta Piloto y la Planta Convencional

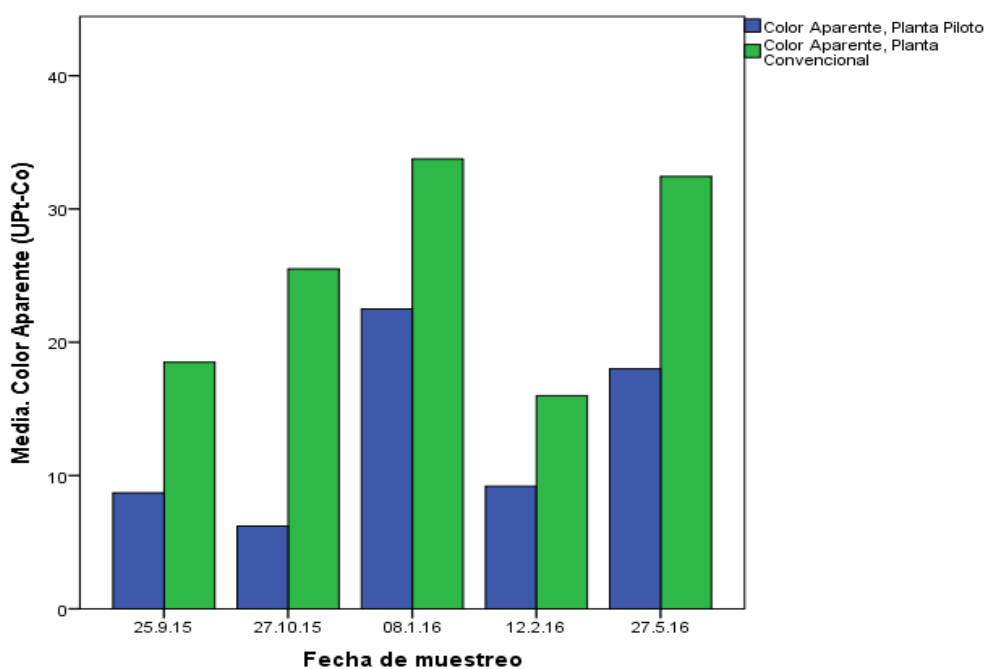
Cabe destacar que una de las conclusiones del “Informe de Avance N° 2 de los Estudios en la Planta Piloto” antecesor de esta investigación fue utilizado el coagulante Policloruro de Aluminio (PAC), en donde los resultados obtenidos demostraron una mayor eficiencia de este polímero respecto a la sal de aluminio utilizada en esta investigación, precisando que para el período de estudio no existía disponibilidad en el inventario del PAC, para realizar estas comparaciones.

En cuanto al parámetro Color Aparente la tendencia de remoción con respecto a la Turbiedad fue similar, es decir, para las dos primeras fechas de muestreo la magnitud de remoción fue mayor en contraste a las tres fechas posteriores correspondientes al año 2016, infiriendo que este hecho es debido a la dos variables intervinientes que pudiesen estar controlando las magnitudes al igual que la turbiedad las cuales constituyen la estación climática y las concentraciones y el estado físico de coagulantes (en este caso del sulfato de aluminio)

Fecha de muestreo	Agua cruda	Pool de submuestras (Color Aparente U Pt-Co)		Magnitud removida por la Planta Piloto (U Pt-Co)	
		Planta Piloto	Planta de tratamiento	Planta Piloto	Planta de tratamiento
25/09/2016	35	5	20	30	15
27/10/2016	45	5	25	40	20
08/01/2016	55	25	30	30	25
12/02/2016	25	10	15	15	10
27/05/2016	35	17,5	32,5	17,5	2,5

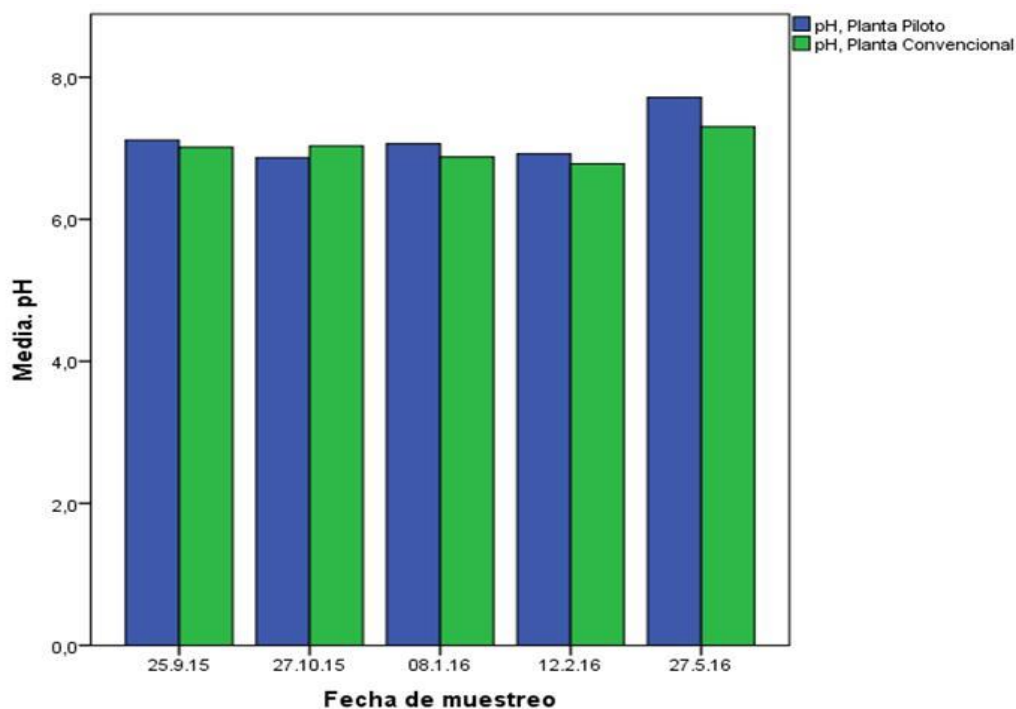
Tabla N° 25 Color Aparente (in situ) de la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento y magnitud removida por cada sistema de tratamiento con respecto al agua cruda.

De manera gráfica (gráfica N° 98) podemos observar el comportamiento del Color Aparente, de los promedios de las unidades Pt-Co de Color Aparente en las 5 fechas de muestreos, destacando que fueron promediados y graficados los 4 resultados de las medidas *in situ*, no así de la medida obtenida en la unión del pool de submuestras.

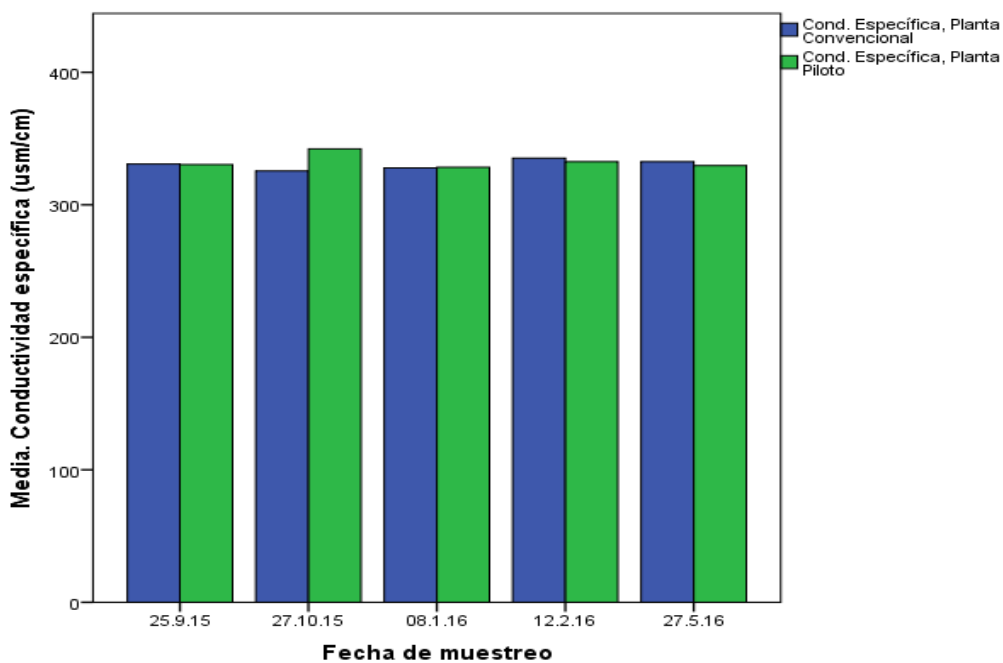


Gráfica N° 99 Color Aparente de la Planta Piloto y la Planta Convencional

Para los dos parámetros restantes medidos in situ correspondientes a la Conductividad específica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y pH las variaciones entre los diferentes muestreos y en ambas plantas no fue sustancial, tal como se puede apreciar en las siguientes gráficas N° 99 y 100.



Gráfica N° 100 pH de la Planta Piloto y la Planta Convencional



Gráfica N° 101 Conductividad específica de la Planta Piloto y la Planta Convencional

IV.IV.II Resultados de los análisis completos (de laboratorio)

		Comparación de PT Caujarito y Planta Piloto				
Fecha de muestreo	Parámetro	Agua Cruda	Planta de Tratamiento Caujarito	% Remoción	Planta Piloto	% Remoción
25/09/15	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	343	313	9	310	10
	Color Aparente (UPt-Co)	35	25	29	10	71
	Color Verdadero (UPt-Co)	10	1	90	5	50
	Turbiedad (NTU)	15	4.1	73	1.7	89
	pH	7,9	7.5	5	7.8	1
	Alcalinidad Total (mgCaCO_3/l)	146	102	30	103	29
	Alcalinidad Fenolftaleínica	0.0	0.0	0	0.0	0
	Dureza Total ($\text{mg CaCO}_3/\text{l}$)	120	112	7	112	7
	Índice de Saturación de Langelier	0.5	−0.5	-	−0.2	-
	Aluminio (mg/l)	0.20	0.11	45	0.06	70
	Calcio (mg/l)	25.0	20.0	20	20.0	20
	Magnesio (mg/l)	20	14.9	26	14.9	26
	Hierro (mg/l)	0.56	0.41	27	0.16	71
	Manganeso (mg/l)	0.42	0.24	43	0.08	81
	Cloruro (mg/l)	30	22.4	25	15.7	48
	Sulfato (mg/l)	45.0	17.2	62	23.1	49
	Carbonatos ($\text{mg CaCO}_3/\text{l}$)	0	0	0	0	0
	Bicarbonatos ($\text{mg CaCO}_3/\text{l}$)	150	125	17	126	16
	Fluoruro (mg/l)	0.18	0.09	50	0.09	50
	Sílice reactiva (mg/l)	25.0	17.8	29	17.4	30
	Nitratos ($\text{mg N-NO}_3/\text{l}$)	0.28	0.13	54	0.10	64
	Nitritos ($\text{mg N-NO}_2/\text{l}$)	0.005	0.003	40	0.003	40
	Nitrógeno amoniacal ($\text{mg N-NH}_3/\text{l}$)	0.20	0.15	25	0.08	60
	Fósforo Total (mg/l)	0.223	0.103	54	0.049	78
	Fósforo Disuelto Total (mg/l)	0.080	0.049	39	0.043	46
	Fósforo Reactivo Disuelto	0.024	0.014	42	0.010	58

Tabla N° 26 Resultados de laboratorio (parámetros físico-químicos completos) para el agua cruda, planta piloto y planta de tratamiento Caujarito, de fecha 25/09/2015

		Comparación de PT Caujarito y Planta Piloto				
Fecha de muestreo	Parámetro	Agua Cruda	Planta de Tratamiento Caujarito	% Remoción	Planta Piloto	% Remoción
27/10/15	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	361	326	10	359	1
	Color Aparente (UPt-Co)	40	30	25	10	75
	Color Verdadero (UPt-Co)	15	10	33	5	67
	Turbiedad (NTU)	22	5.8	74	2.6	88
	pH	8,3	7.6	8	7.4	11
	Alcalinidad Total (mgCaCO_3/l)	150	103	31	99	34
	Alcalinidad Fenolftaleínica	0.0	0.0	0	0.0	0
	Dureza Total ($\text{mg CaCO}_3/\text{l}$)	152	132	13	146	4
	Índice de Saturación de Langelier	0.5	-0.4		-0.5	
	Aluminio (mg/l)	0.18	0.12	33	0.06	67
	Calcio (mg/l)	44.0	22.4	49	28.8	35
	Magnesio (mg/l)	25.0	18.2	27	17.8	29
	Hierro (mg/l)	0.45	0.13	71	0.29	36
	Manganeso (mg/l)	0.25	0.11	56	0.16	36
	Cloruro (mg/l)	35.0	22.9	35	14.1	60
	Sulfato (mg/l)	60.0	13.6	77	53.9	10
	Carbonatos ($\text{mg CaCO}_3/\text{l}$)	0	0	0	0	0
	Bicarbonatos ($\text{mg CaCO}_3/\text{l}$)	135	126	7	121	10
	Fluoruro (mg/l)	0.18	0.08	56	0.05	72
	Sílice reactiva (mg/l)	25.0	20.2	19	19.4	22
	Nitratos ($\text{mg N-NO}_3/\text{l}$)	0.09	0.03	67	0.00	100
	Nitritos ($\text{mg N-NO}_2/\text{l}$)	0.008	<0.002	-	0.004	50
	Nitrógeno amoniacal ($\text{mg N-NH}_3/\text{l}$)	0.85	0.77	9	0.15	82
	Fósforo Total (mg/l)	0.112	0.092	18	0.049	56
	Fósforo Disuelto Total (mg/l)	0.065	0.042	35	0.011	83
	Fósforo Reactivo Disuelto (mg/l)	0.030	0.019	37	<0.010	-

Tabla N° 27 Resultados de laboratorio (parámetros físico-químicos completos) para el agua cruda, planta piloto y planta de tratamiento Caujarito, de fecha 27/10/2015

			Comparación de PT Caujarito y Planta Piloto			
Fecha de muestreo	Parámetro	Agua Cruda	Planta de Tratamiento Caujarito	% Remoción	Planta Piloto	% Remoción

Tabla N° 28 Resultados de laboratorio (parámetros físico-químicos completos) para el agua cruda, planta piloto y planta de tratamiento Caujarito, de fecha 08/01/2015

**Comparación de PT Caujarito y
Planta Piloto**

Fecha de muestreo	Parámetro	Agua Cruda	Planta de Tratamiento Caujarito	% Remoción	Planta Piloto	% Remoción
12/02/16	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	370	363	2	358	3
	Color Aparente (UPt-Co)	25	10	60	10	60
	Color Verdadero (UPt-Co)	15	5	67	5	67
	Turbiedad (NTU)	11	2.5	77	1.8	84
	pH	8,5	7.4	13	7.3	14
	Alcalinidad Total (mgCaCO_3/l)	158	114	28	118	25
	Alcalinidad Fenolftaleínica (mgCaCO_3/l)	0.0	0.0	0	0.0	0
	Dureza Total ($\text{mg CaCO}_3/\text{l}$)	159	140	12	138	13
	Índice de Saturación de Langelier	0.3	-0.4		-0.5	
	Aluminio (mg/l)	0.12	0.06	50	0.08	33
	Calcio (mg/l)	28.9	26.4	9	26.4	9
	Magnesio (mg/l)	25.9	17.8	31	17.3	33
	Hierro (mg/l)	0.83	0.18	78	0.17	80
	Manganeso (mg/l)	-	-	-	-	-
	Cloruro (mg/l)	35.8	25.7	28	24.4	32
	Sulfato (mg/l)	29.5	16.6	44	13.3	55
	Carbonatos ($\text{mg CaCO}_3/\text{l}$)	0	0	0	0	0
	Bicarbonatos ($\text{mg CaCO}_3/\text{l}$)	189	139	26	144	24
	Fluoruro (mg/l)	0.12	0.08	33	0.09	25
	Sílice reactiva (mg/l)	21.0	20.8	1	20.4	3
	Nitratos ($\text{mg N-NO}_3/\text{l}$)	0.87	0.74	15	0.75	14
	Nitritos ($\text{mg N-NO}_2/\text{l}$)	0.005	<0.002	-	0.003	40
	Nitrógeno amoniacal ($\text{mg N-NH}_3/\text{l}$)	0.18	0.14	22	0.03	83
	Fósforo Total (mg/l)	0.256	0.142	45	0.155	39
	Fósforo Disuelto Total (mg/l)	0.158	0.127	20	0.104	34
	Fósforo Reactivo Disuelto (mg/l)	0.095	0.081	15	0.037	61

Tabla N° 29 Resultados de laboratorio (parámetros físico-químicos completos) para el agua cruda, planta piloto y planta de tratamiento Caujarito, de fecha 12/02/2015

Comparación de PT Caujarito y Planta Piloto						
Fecha de muestreo	Parámetro	Agua Cruda	Planta de Tratamiento Caujarito	% Remoción	Planta Piloto	% Remoción
	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	368	367	0	352	4

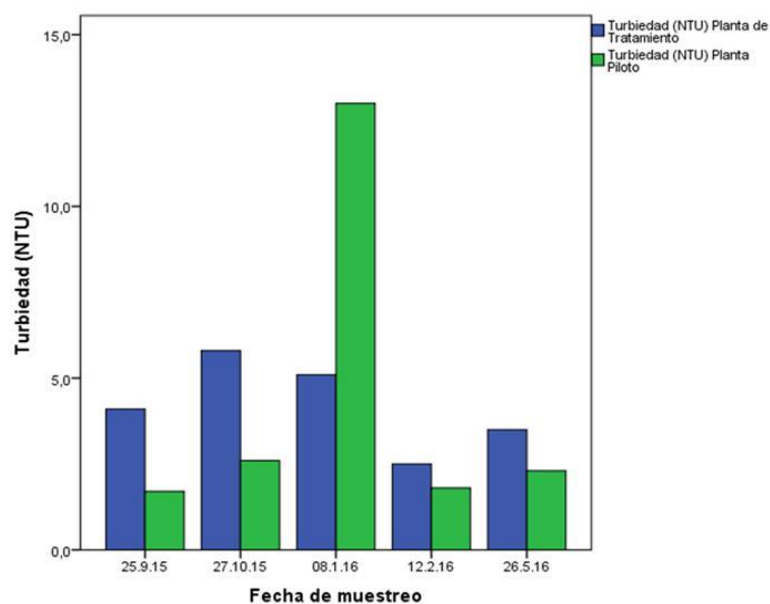
Tabla N° 30 Resultados de laboratorio (parámetros físico-químicos completos) para el agua cruda, planta piloto y planta de tratamiento Caujarito, de fecha 26/05/2015

Las cinco tablas presentadas anteriormente (tabla N° 26-30) muestran los resultados de los análisis practicados a las muestras captadas en las cinco campañas de monitoreo provenientes de las plantas de tratamiento objeto de estudio. Dichos resultados corresponden a los análisis de laboratorio, estas muestras fueron captadas, preservadas y analizadas según métodos estandarizados. A continuación serán objeto de discusión parámetros organolépticos y químicos, determinantes para definir aspectos que a futuro podrían esclarecer las operaciones de la planta con la nueva tecnología propuesta.

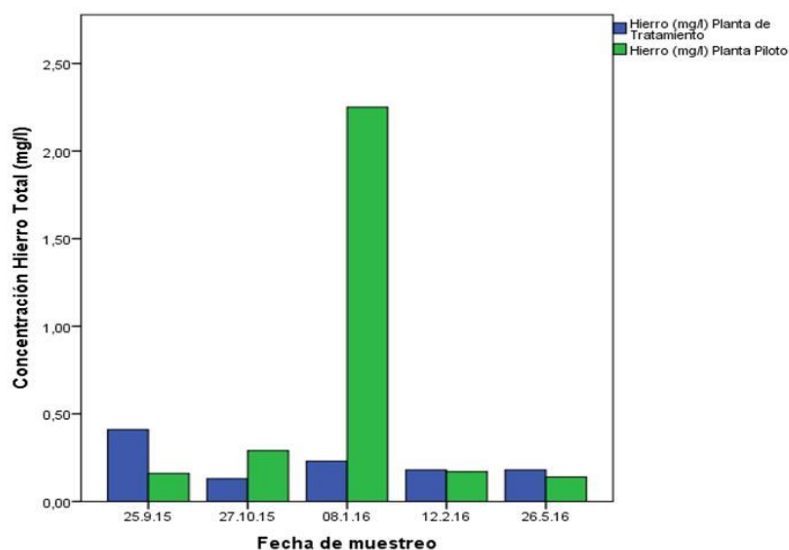
Las siguientes gráficas (N° 101-107) presentan los resultados de: Turbiedad, Hierro Total y Aluminio (como componentes organolépticos, establecidos en la normativa de agua potable), por otra parte, Fósforo Total, Fósforo Reactivo Disuelto, Nitratos (expresado como nitrógeno) y Nitrógeno amoniacal, básicamente parámetros que dentro del ciclo biogeoquímico son asimilados por la flora y fauna (este último no estudiado en este trabajo) planctónica como nutrientes.

En cuanto a la Turbiedad, para 4 fechas de muestreo no se registran anomalías, es decir, el efluente de la Planta Piloto reportó menos Unidades Nefelométricas de Turbiedad con respecto a la Planta de Tratamiento, sólo para la fecha 08 de enero fue obtenido un valor que no se corresponde con la tendencia general, al evaluar el parámetro Hierro Total también es notoria la diferencia entre la concentración reportada para la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento en la misma fecha del 08 de enero de 2016, las posibles causas de estos valores anómalos refieren a contaminación de la muestra, envase contaminado, errores aleatorios analíticos, entre otros, adicionalmente para la fecha los aniones Cloruros y Sulfatos presentaron el mismo comportamiento; sin embargo, al verificar los valores de Turbiedad obtenidos en el muestreo *in situ*, presentan una variación mínima en cuanto a las dos plantas, inclusive el valor “magnitud removida por la planta piloto” en esta fecha fue nula, por lo cual otra explicación química diferente a la explicación técnica expuesta anteriormente, podría deberse fundamentalmente al efecto de la concentración de coagulantes, poca concentración de esta sustancia evita la aglomeración y posterior formación de flocs, y en contraposición el coagulante no ejerce su efecto electrostático y podría permanecer en suspensión incrementando estos valores de Turbiedad e

Hierro Total, recalcando además que cuando es mencionado el parámetro Hierro Total es referido a la forma disuelta y suspendida de este metal, es decir en sus dos estados de oxidación +2 y +3. Es probable también algún inconveniente operacional en la Planta Piloto, como por ejemplo, regulación del tiempo de retención hidráulico adecuado al caudal que se estaba manejando para la fecha, sobresaturación en la unidad de flotación lo que provocaría una mayor cinética de las partículas evitando así la formación de flocs, algún residuo de las arenas de filtración que pudieron interferir en los análisis.

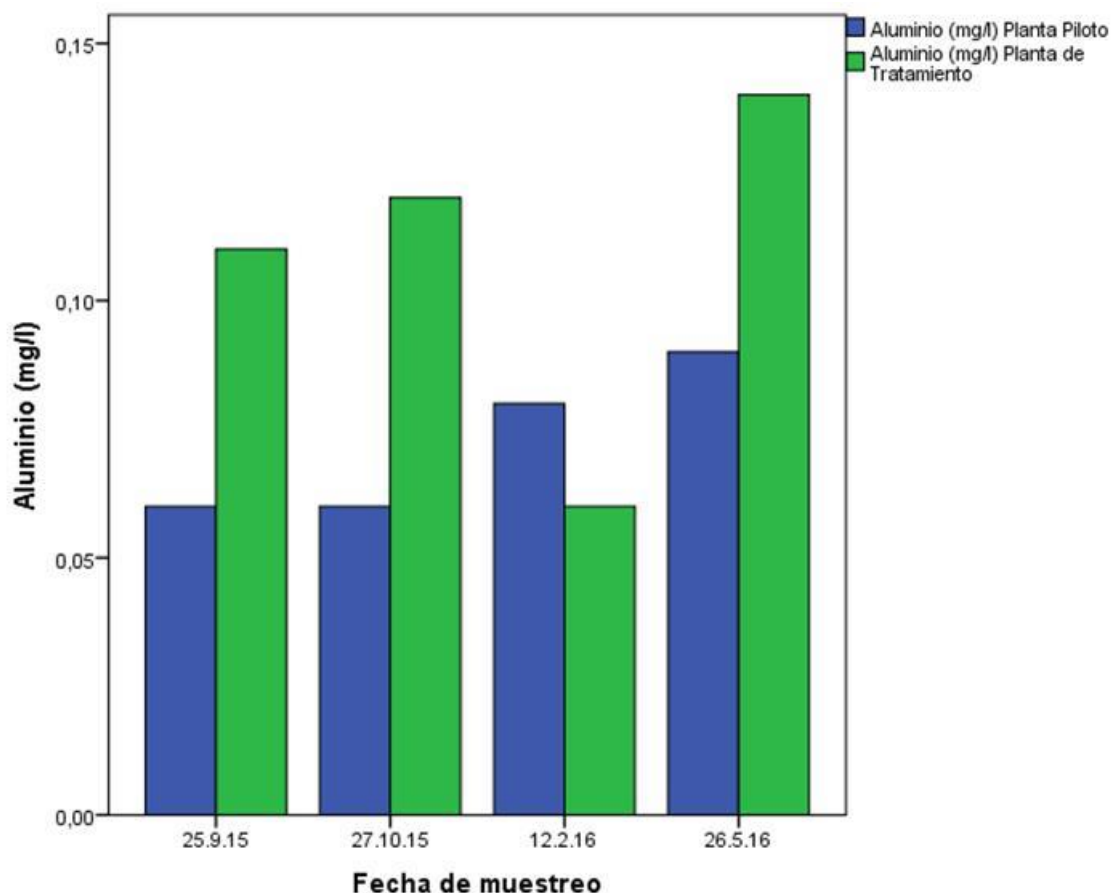


Gráfica N° 101 Turbiedad para las 5 fechas de muestreo en la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento Convencional



Gráfica N° 103 Hierro Total para las 5 fechas de muestreo en la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento Convencional

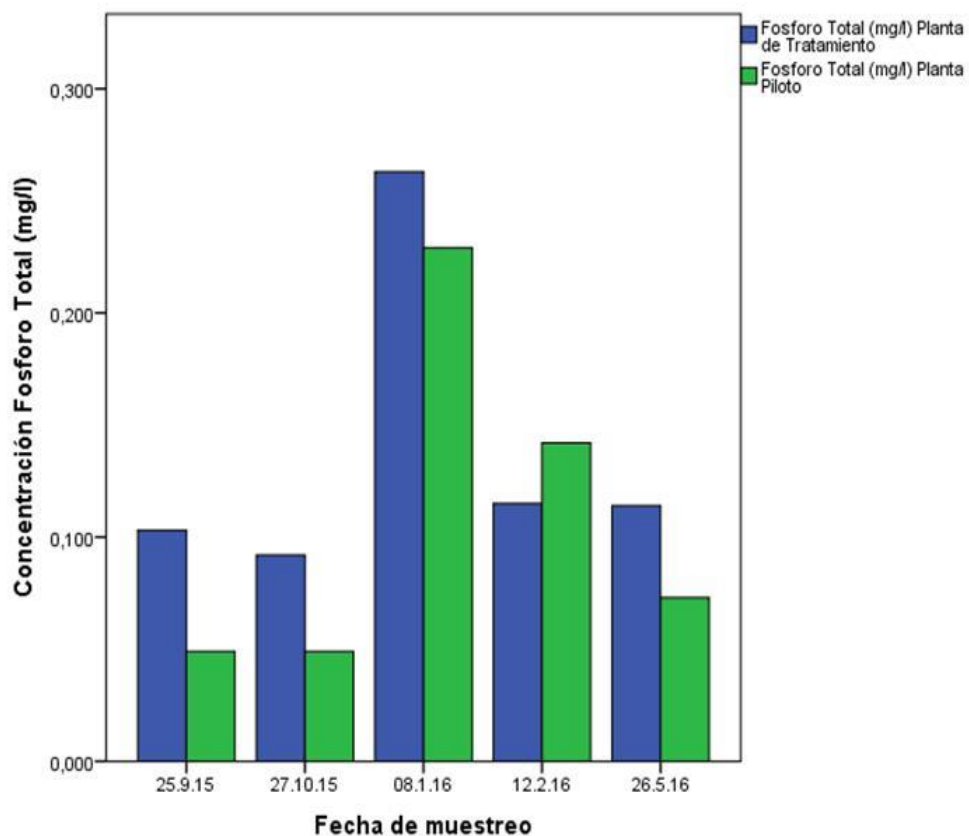
Para el Aluminio no hubo divergencias respecto a los resultados obtenidos, sólo para la fecha del 12 de febrero de 2016, el efluente de la Planta Piloto arrojó una mayor concentración que el efluente de la Planta de Tratamiento, sin embargo la diferencia no resulta significativa, cabe destacar que por falta de reactivos en el laboratorio para la determinación de Aluminio no fue analizado para la fecha 08 de enero de 2016.



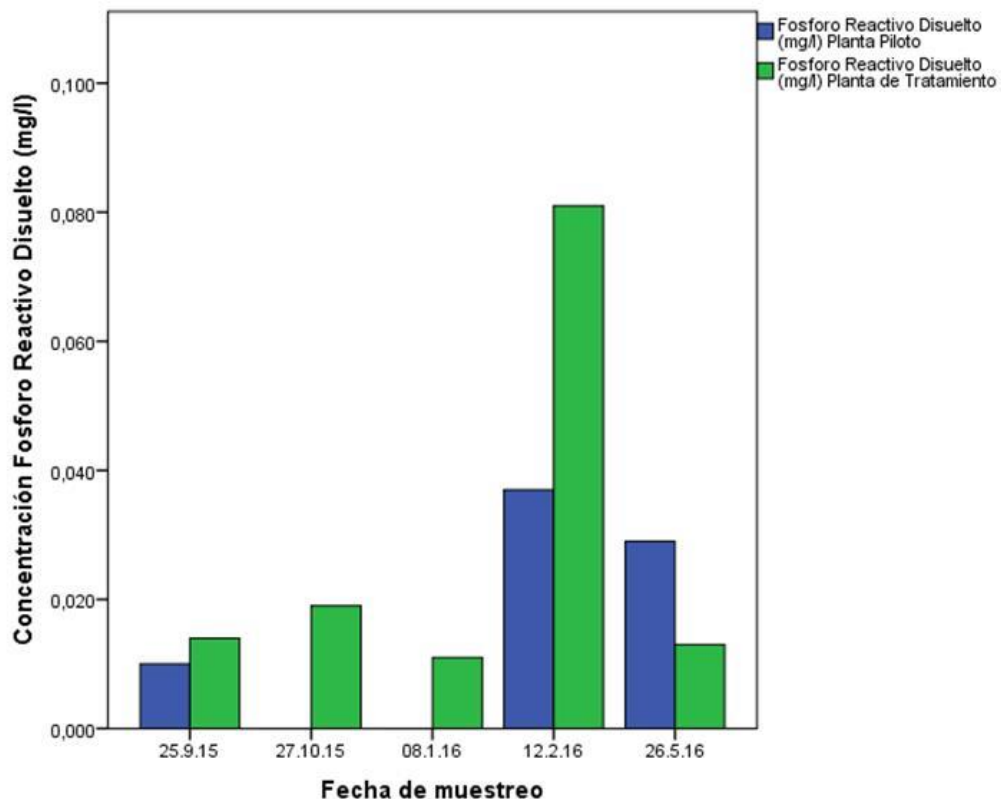
Gráfica N° 104 Aluminio para las 5 fechas de muestreo en la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento Convencional

A continuación son presentados los resultados de Fósforo Total y Fósforo Reactivo Disuelto esta última especie es la fracción inmediatamente disponible para la biota, también denominado ortofosfatos. Sólo para 12 de febrero de 2016 el efluente de la Planta Piloto reportó un valor superior al de la Planta de Tratamiento, sin embargo esta diferencia no fue significativa. El 08 de enero de 2016 resultó en concentraciones más elevadas al resto de las fechas de muestreo (para el caso del fósforo y sus especies), podría coincidir con el evento de Bloom en las aguas del embalse Camatagua, por otra parte la mezcla de las aguas del reservorio, es decir, la ausencia de estratificación térmica en toda la columna de agua, este efecto natural trae como consecuencia la mezcla de todas las especies químicas, por lo que podríamos

encontrar aproximadamente la misma concentración en el hipolimnio en comparación al epilimnio en este caso del Fósforo Total y sus especies, que posteriormente “aguas abajo” se ve reflejado en las plantas de tratamiento.



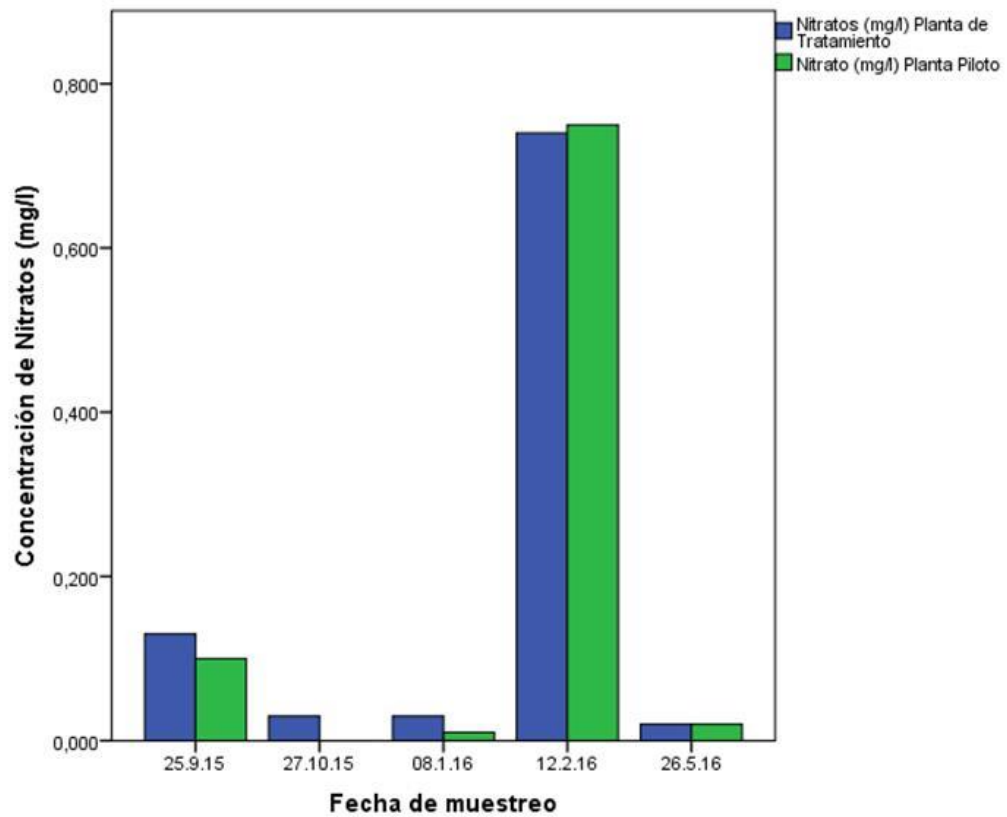
Gráfica N° 105 Fósforo Total para las 5 fechas de muestreo en la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento Convencional



Gráfica Nº 106 Fósforo Reactivo Disuelto para las 5 fechas de muestreo en la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento Convencional

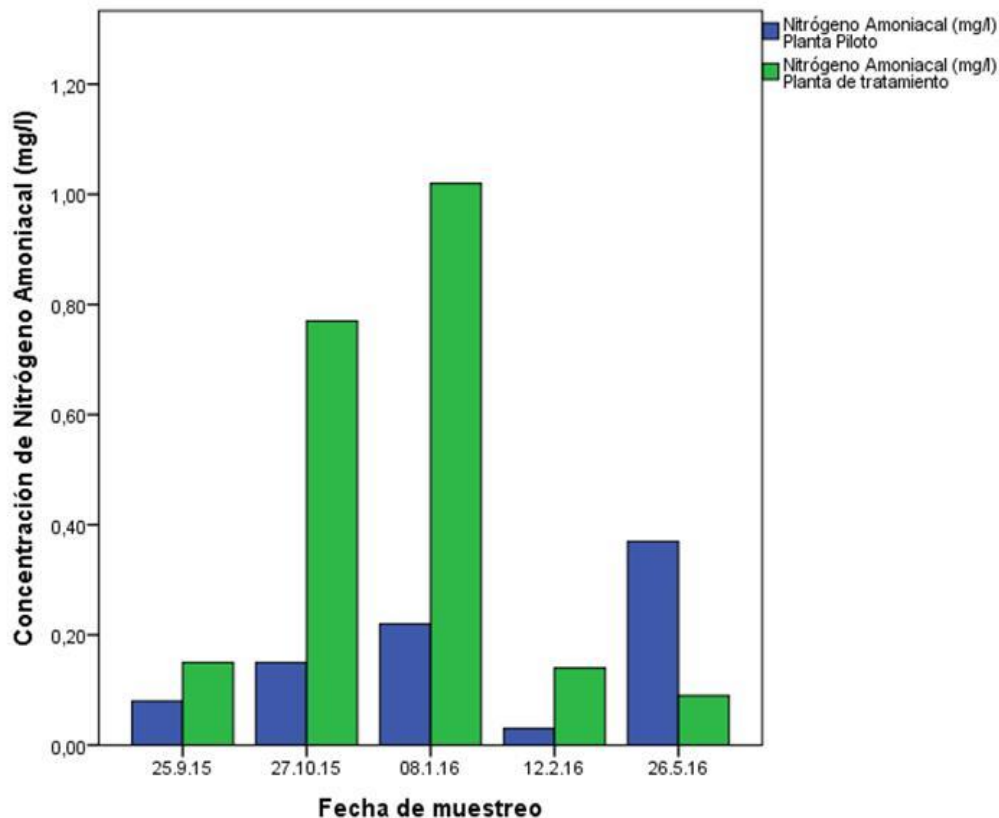
Finalmente las gráficas Nº 106-107 con los resultados de Nitratos (expresado como Nitrógeno) y Nitrógeno Amoniacal (expresado como Nitrógeno), este último uno de los contaminantes más perjudiciales para las operaciones en las plantas de tratamiento, por ejemplo, la demanda de cloro que genera esta especie química, formando con el cloro las monocloraminas y dicloraminas, entre otros problemas a nivel operacional que genera esta especie química.

En cuanto a los Nitratos (expresado como nitrógeno) se observa una tendencia general en el efluente de la Planta de Tratamiento con mayores concentraciones en comparación al efluente en la Planta Piloto, en fecha 12 de febrero de 2016 es mayor el nitrato en la Planta Piloto, sin embargo la diferencia no es significativa.



Gráfica N° 107 Nitratos para las 5 fechas de muestreo en la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento Convencional

Para el caso del Nitrógeno Amoniacal también se refleja una tendencia en concentraciones mayoritarias en el efluente de la Planta de Tratamiento con respecto a la Planta Piloto, únicamente en fecha 26 de mayo de 2016 la concentración del efluente en la Planta Piloto fue mayoritaria, la hipótesis que podría explicar este fenómeno se refiere a causas analíticas, es decir, errores aleatorios asociados a la calibración de la metodología analítica en el laboratorio.



Gráfica N° 108 Nitrógeno Amoniaco para las 5 fechas de muestreo en la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento Convencional

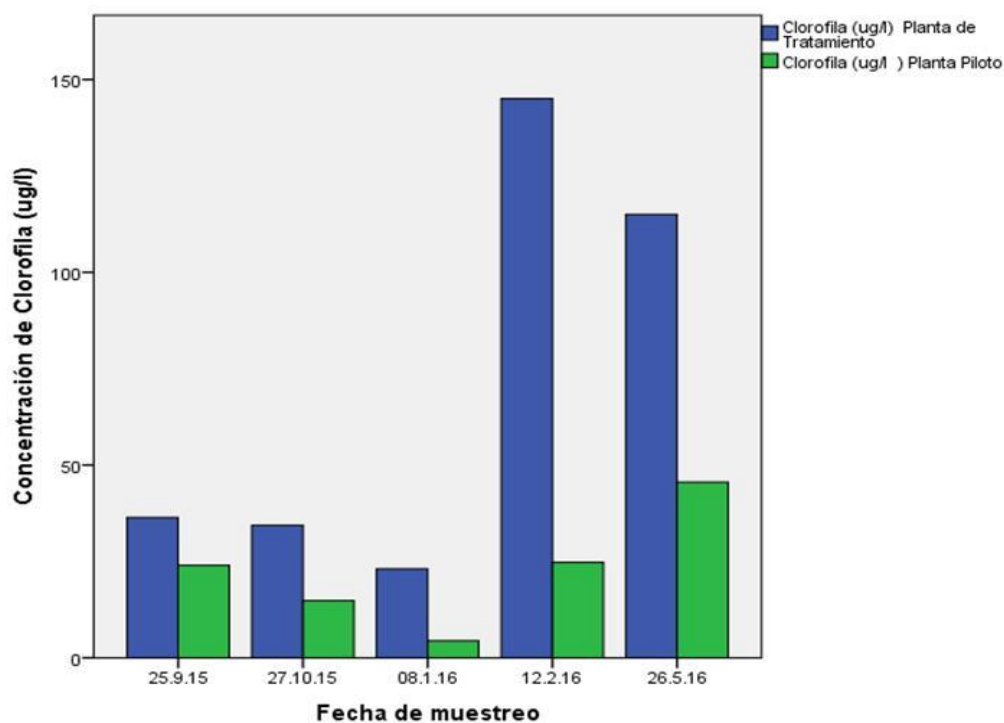
IV.IV.III Determinación de Clorofila a en el sistema alternativo de tratabilidad (Planta Piloto) y en el sistema de tratamiento convencional (Planta de tratamiento Caujarito).

El parámetro Clorofila a representa un elemento clave para la investigación, por constituir el estimador global de biomasa de fitoplancton determinante para diseñar un cambio de tecnología convencional a la flotación por aire y de esta manera disminuir sustancialmente los parámetros organolépticos que afectan la calidad del agua, como por ejemplo el olor, sabor y color.

A continuación será presentada la tabla N° 31 de resultados con su respectivo valor de remoción además de la gráfica N° 108 donde es apreciada la variación en la concentración de Clorofila a en las 5 fechas de muestreos.

Clorofila ($\mu\text{g/l}$)							
Fecha de muestreo	Agua cruda	Planta Piloto	% Remoción	Planta de Tratamiento	% Remoción	Magnitud removida por la Planta Piloto	Magnitud removida por la Planta de Tratamiento
25/09/2016	56,0	24,0	57	36,4	35	32	19,6
27/10/2016	50,0	14,8	70	34,4	31	35,2	15,6
08/01/2016	35,0	4,4	87	23,1	34	30,6	11,9
12/02/2016	160,2	24,8	85	145,0	9	135,4	15,2
27/05/2016	155,1	45,6	71	115,0	26	109,5	45,6

Tabla N ° 31 Resultados de Clorofila para el agua cruda, Planta Piloto, Planta de Tratamiento y la magnitud removida por cada uno de los sistemas



Gráfica N° 109 Clorofila para las 5 fechas de muestreo en la Planta Piloto y la Planta de Tratamiento Convencional

Al estudiar los resultados obtenidos en las primeras tres campañas de muestreo correspondientes a la estación climática de lluvia (sólo en septiembre y octubre) y en enero el período en el cual el cuerpo de agua se encuentra “mezclado” en toda la columna de agua, es decir no diferenciación térmica de estratos ó con un ΔT que no excede 1° centígrado. Por otra parte, en la estación climática de sequía (febrero y

mayo) existieron mayores concentraciones y remociones de Clorofila a, algunos eventos así lo constatan, como por ejemplo Bloom (crecimiento acelerado de fitoplancton) que fueron característicos en estos períodos de muestreo en el embalse Camatagua, y por consiguiente “aguas abajo” en las plantas de tratamiento objeto de estudio.

Este parámetro también depende en cierta medida de la eficiencia de la dosis del coagulante para ser removido.

Al citar el “Informe de Avance N° 2 de los Estudios en la Planta Piloto” en la cual fue utilizado el polímero Policloruro de Aluminio (PAC) se reportan en promedio 70% de remoción de clorofila, este estudio previo se basó fundamentalmente en estudiar las variables operacionales de la Planta Piloto, incluyendo entre estos estudios la caracterización del agua cruda, el agua flotada y el agua filtrada, no así para esta investigación en la que básicamente se realizó una comparación entre las dos plantas, estudiando las muestras finales (filtradas) a fin de verificar la eficiencia de cada una de ellas en la remoción y/o disminución de los contaminantes.

IV.IV.IV. Determinación del porcentaje de remoción del Fósforo y sus especies en el agua flotada (Nata de flotación) y el agua filtrada (efluente) del sistema alternativo de tratabilidad (Planta Piloto).

Es importante aclarar el término Nata de flotación, es referido a todo el aglomerado de biomasa que resulta de la aireación en la Planta Piloto, ubicada específicamente en el tanque de flotación, lo cual constituye el contaminante y/o residuo más importante que se desea remover de las aguas que provienen del Embalse Camatagua con esta tecnología de flotación por aire que busca suplantar al sistema de tratamiento convencional que funciona actualmente en Caujarito. En las siguientes imágenes (N°14-15) se ilustra la Nata de Flotación.



Nata de flotación previo al análisis de laboratorio

Imagen N° 14 Nata de flotación previo al análisis de laboratorio, específicamente en la determinación de los parámetros físico químicos Fósforo Total, Fósforo Reactivo Disuelto y Fósforo Disuelto Total



Nata de flotación en el
Tanque de flotación

Imagen N° 15 Nata de flotación acumulada por efecto del empuje por aire en el tanque de flotación.

Comparación del Efluente y la Nata de flotación en la Planta Piloto				
Fecha de muestreo	Parámetro	Agua cruda	Agua filtrada (Efluente)	Nata de flotación
08/01/2016	Fósforo Total (mg/l)	0.564	0.229	3.125
	Fósforo Disuelto Total (mg/l)	0.178	0.141	0.950
	Fósforo Reactivo Disuelto (mg/l)	0.068	<0.010	0.073
26/05/2016	Fósforo Total (mg/l)	0.252	0.073	0.762
	Fósforo Disuelto Total (mg/l)	0.112	0.061	0.265
	Fósforo Reactivo Disuelto (mg/l)	0.036	0.029	0.153

Tabla N° 32 Resultados de fósforo y sus especies determinados en la nata de flotación y comparados con el agua cruda y el agua tratada.

Los porcentajes de remoción serán calculados para las diferentes especies de fósforo.

$$\% \text{ remoción de Fósforo} = \frac{[\text{P}] \text{ agua cruda} - [\text{P}] \text{ del efluente}}{[\text{P}] \text{ agua cruda}} \times 100$$

Fecha de muestreo	Especies de Fósforo	% de Remoción
08/01/2016	Fósforo Total	59.4
	Fósforo Disuelto Total	20.8
	Fósforo Reactivo Disuelto	85.3
26/05/2016	Fósforo Total	71.0
	Fósforo Disuelto Total	45.5
	Fósforo Reactivo Disuelto	19.4

Tabla N° 33 Porcentajes de remoción de las especies de fósforo en la planta piloto

Por otra parte será calculado el porcentaje de ganancia adicionado a la Nata de Flotación con respecto al agua cruda, significando que dicho porcentaje obedece básicamente al concentrado de biomasa que es generado al aplicar el proceso de aire por flotación.

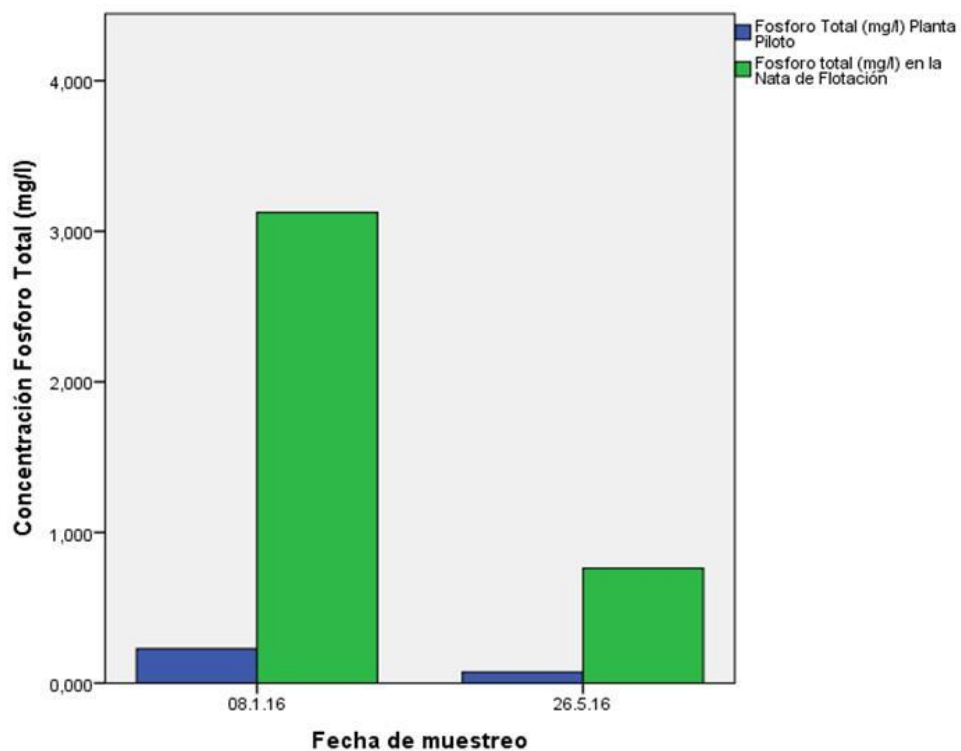
$$\% \text{ ganancia de Fósforo} = \frac{[P] \text{ agua cruda} + [P] \text{ de la nata de flotación}}{[P] \text{ agua cruda}} \times 100$$

Fecha de muestreo	Especies de Fósforo	% de Ganancia
08/01/2016	Fósforo Total	654
	Fósforo Disuelto Total	633
	Fósforo Reactivo Disuelto	207
26/05/2016	Fósforo Total	402
	Fósforo Disuelto Total	336
	Fósforo Reactivo Disuelto	525

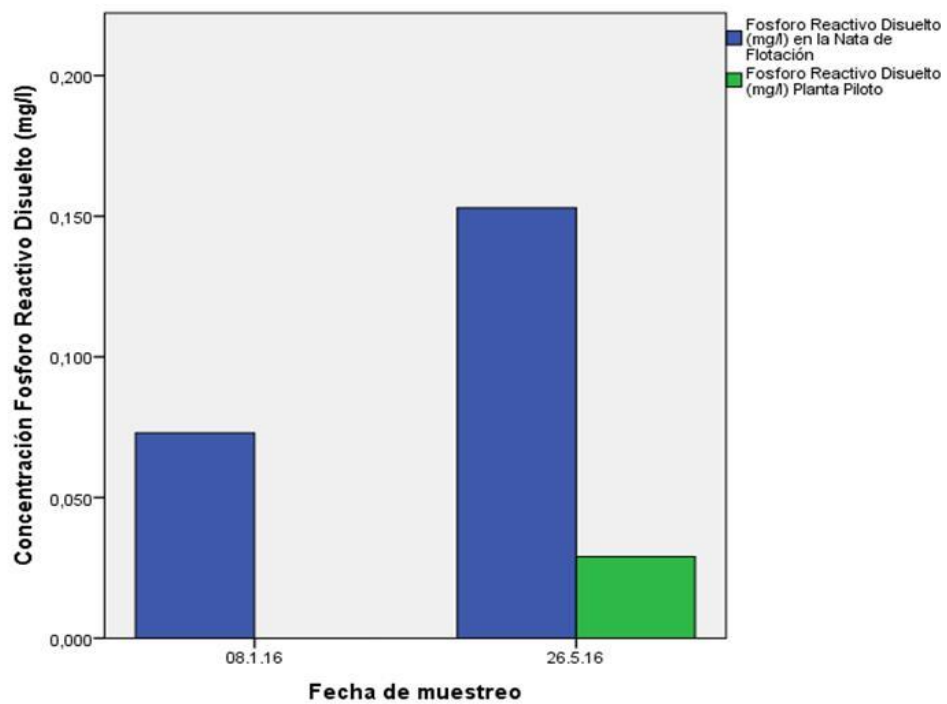
Tabla N° 34 Porcentajes de ganancia de las especies de fósforo en la planta piloto (agua cruda vs nata de flotación)

Los resultados presentados en la tabla N° 34 son consistentes al demostrar los elevados porcentajes de ganancia obtenidos en la nata de flotación, de alguna manera estos porcentajes de fósforo son los que deben ser tratados en la planta de tratamiento convencional (Caujarito), pero además de esta tabla son expuestos los porcentajes de fósforo que a futuro podrían ser disminuidos de un tren de tratamiento como el alternativo.

A continuación son presentados de manera gráfica (N° 109-110 los resultados de Fósforo Total y Fósforo Reactivo Disuelto en el efluente y la nata de flotación respectivamente.



Gráfica N ° 110 Fósforo Total para el efluente y la nata de flotación



Gráfica N ° 111 Fósforo Reactivo Disuelto para el efluente y la nata de flotación

No queda lugar a dudas de la carga de nutrientes que provienen de las aguas del embalse Camatagua, reflejada en la biomasa removida por efecto de la aireación en la Planta Piloto. En la tabla N° 33 donde aparecen expresados los porcentajes de remoción de Fósforo Total y Fósforo Reactivo Disuelto es evidente que el sistema de tratabilidad proporciona un proceso unitario eficiente, la flotación por aire, para la remoción de nutrientes en este caso el Fósforo y sus especies. Cabe destacar que fueron realizados únicamente estos 2 análisis por asuntos inherentes a la dinámica de los análisis en el laboratorio (falta de reactivos).

IV.IV.V Determinación de Fitoplancton en el sistema alternativo de tratabilidad (Planta Piloto) y el sistema convencional (Planta de Tratamiento).

Inicialmente serán presentados algunos resultados cualitativos (caracterización de especies) del fitoplancton en el periodo AIA (Antes de la Intervención Antrópica) y DIA (Después de la Intervención antrópica), del agua cruda, es decir, aguas del embalse Camatagua, a fin de presentar las condiciones de este cuerpo de agua en comparación con el agua tratada en ambos sistemas.

Grupo y Especie de fitoplancton encontradas en el Embalse Camatagua "AIA" (1995-2005)

Grupo	Especie
Cianobacterias	<i>Anabaenopsis</i>
	<i>Coelosphaerium</i>
	<i>Cylindrospermopsis</i>
	<i>Leptolyngbya</i>
	<i>Lyngbya</i>
	<i>Merismopedia</i>
	<i>Synechocystis</i>
Chrysophyta-	<i>Aulacoseira granulata</i>
Bacillariophyta	<i>Synedra sp</i>
(Diatomeas)	<i>Centritractus</i>

Tabla N° 35 Grupo y especies de fitoplancton en el embalse Camatagua en AIA

Durante este período fueron reportadas 7 especies de cianobacterias y 3 especies de Bacillariophyta (diatomeas)

Para el período DIA serán utilizados los resultados de González (2015), el cual constituye un antecedente importante para esta investigación, su trabajo fue realizado

desde septiembre 2012 hasta julio 2013, constituyendo éste como un importante aporte para la caracterización de DIA (2006-2015).

Grupo y Especie de fitoplancton encontradas en el Embalse Camatagua "DIA" (2006-2015)

Grupo	Especie
Cianobacterias	Anabaena spp
	Cylindrospermopsis
	Chroococcus minimus
	Dactylococcopsis acicularis
	Gomphosphaeria sp.
	Leptolyngbya limnetica
	Merismopedia tenuissima
	Microcystis holsatica
	Oscillatoria limnetica
	Synechococcus linearis
	Synechocystis aquatilis
	Aulacoseira granulate
Chrysophyta-Bacillariophyta (Diatomeas)	Cyclotella meneghiniana
	Epithemia zebra
	Gomphonema sp
	Navicula
	Nitzschia sp.
Chlorophyta	Synedra ulna
	Actinastrum hantzschii
	Actinotaenium minutissimum
	Ankistrodesmus falcatus
	Botryococcus braunii
	Closterium acutum
	Crucigenia quadrata
	Chlorella vulgaris
	Dictyosphaerium pulchellum
	Euastrum sp.
	Monoraphidium spp
	Nephrochlamys sp.
	Oocystis lacustris
Euglenophyta	Scenedesmus ecornis
	Tetraedron sp.
Euglenophyta	Euglena sp
	Trachelomonas volvocina
Pyrrophyta	Peridinium spp.
Cryptophyta	Cryptomonas erosa
	Chroomonas nordstedtii

Tabla N°36 Grupo y especies de fitoplancton en el embalse Camatagua en DIA

Es notable la cantidad de especies caracterizadas en el período DIA (37 especies de fitoplancton) con respecto al período AIA (10 especies de fitoplancton).

Entre los aportes de González, es importante destacar que las especies *Cylindrospermopsis raciborskii*, *Oscillatoria* sp. y *Leptolyngbya limnetica* fueron las dominantes a lo largo del período de estudio (2012-2103). Estos géneros se caracterizan por tener cepas con fuertes toxinas (neurotoxinas, que pueden

afectar el sistema nervioso central, y hepatotoxinas, que pueden afectar el hígado) para los mamíferos, por lo que se recomienda una estricta vigilancia de las empresas hidrológicas sobre las aguas, haciendo pruebas de toxicidad, ya que estas toxinas no son eliminadas por los sistemas convencionales de potabilización, representando un riesgo potencial de salud para la población que es servida con estas aguas (González, 2015). Dentro de las motivaciones del sistema de tratabilidad propuesto se encuentra la remoción de estas especies dañinas para la salud humana.

A continuación serán reportados los resultados del fitoplancton obtenido en ambas plantas, es importante mencionar que son expresados las unidades de biomasa en unidades de organismos por mililitros (org/ml) y unidades estándar de área por mililitro (USA por sus siglas en inglés) como porcentajes, representando como 100% en ambos casos los resultados registrados en la Planta de Tratamiento Convencional y ponderando el valor obtenido en los resultados arrojados en la Planta Piloto, no fue posible colocar los valores crudos por lineamientos emanados desde la empresa. Sin embargo, expresar el porcentaje y la magnitud removida por la Planta Piloto, nos permite tener una referencia de la eficiencia del proceso de remoción.

Es importante mencionar que se registró el promedio de todas las fechas de muestreo, como se evidencia en las dos tablas siguientes.

	Fitoplancton (org/ml)		
	Planta de Tratamiento	Planta Piloto	Magnitud removida por la planta piloto
Promedio de todas las fechas de muestreo	100%	30%	70%

Tabla N° 37 Resultados de fitoplancton en (org/ml) en la planta piloto y la planta de tratamiento con la magnitud removida por la planta piloto.

	Fitoplancton (USA/ml)		
	Planta de Tratamiento	Planta Piloto	Magnitud removida por la planta piloto
Promedio de todas las fechas de muestreo	100%	27%	73%

Tabla N° 38 Resultados de fitoplancton en (USA/ml) en la planta piloto y la planta de tratamiento con la magnitud removida por la planta piloto.

En ambos resultados (tabla N° 37 y 38), fitoplancton en organismos por mililitros (org/ml) y fitoplancton en unidades estándar de área por mililitros (USA/ml) los valores registrados corresponden a una magnitud removida por la planta piloto de 70% y 73% respectivamente en comparación a la planta de tratamiento convencional. Estos resultados son notorios, en cuanto a la capacidad de remoción de la Planta Piloto, en este caso de la biomasa, específicamente el fitoplancton, uno de los componentes que ocasiona mayores inconvenientes en términos operacionales en la Planta de Tratamiento Caujarito. Dentro de los inconvenientes podemos citar: - Incremento de las demandas de cloro por componentes como nitrógeno amoniacal, - Inconvenientes de olor, color y sabor en el efluente, - Posibles interferencias en los procesos unitarios como la floculación- coagulación, entre otros.

A continuación serán presentados los géneros y especies encontradas en los efluentes de cada una de las plantas objeto de estudio.

Comparación de plantas	FITOPLANCTON					
	Cianobacterias					
Planta Piloto	Cylindrospermopsis raciborskii	Lyngbya sp	Limnothrix sp	Merismopedia sp	Oscillatoria sp	Rophydiopsis sp
Planta de Tratamiento	Cylindrospermopsis raciborskii		Limnothrix sp	Merismopedia sp	Oscillatoria sp	Rophydiopsis sp
	Bacillariophyta - Chrysophyta					
Planta Piloto	B. Synedraulna	B. Aulacoseira sp				
Planta de Tratamiento	B. Navicula sp					
	Cryptophyta - Dinophyta - Euglenophyta					
Planta Piloto						
Planta de Tratamiento	Cr. Cryptomonaserosa					

Tabla N° 39 Especies de Fitoplancton en ambas plantas

Como se muestra en la tabla N° 39 fueron observadas algunas especies en la Planta Piloto que no se apreciaron en la Planta de Tratamiento convencional, sin embargo en términos de volumen, como reflejan las tablas anteriores, en la Planta de Tratamiento se tienen porcentajes superiores al 50% con respecto a la Planta Piloto.

IV.IV.VI Alternativas de reutilización de las microalgas para la producción de biocombustibles como herramienta de Ingeniería Ambiental.

A diferencia de los combustibles fósiles, que provienen de la materia orgánica acumulada durante enormes períodos de tiempo, los biocombustibles provienen de una fuente renovable, la biomasa. La biomasa es la materia orgánica que constituye todos los seres vivos, sus productos y desechos. Se dice que es una fuente de energía renovable porque su formación no lleva miles de años, y por lo tanto la tasa de utilización no es mucho mayor a la de su formación.

Según la naturaleza de la biomasa, y el tipo de combustible deseado, se pueden utilizar diferentes métodos para obtener biocombustibles: mecánicos (astillado, trituración, compactación), termoquímicos (combustión, pirólisis y gasificación), biotecnológicos (fermentación y digestión microbiana anaeróbica) y extractivos. Los tres tipos principales de biocombustibles lo constituyen: Bioetanol, Biodiesel y Biogas. Particularmente, el biodiesel es una interesante alternativa para cubrir parte de la demanda energética de combustibles derivados de petróleo destinados al transporte. El biodiesel es un biocombustible producido principalmente de aceites de plantas oleaginosas, cuya disponibilidad es incapaz de remplazar el mercado de diesel; además de no ser sustentable por competir por alimento humano y suelos cultivables. El uso de microalgas para la producción de biodiesel ha surgido como una opción promisoría, debido a que presentan mayor eficiencia fotosintética, son más eficaces en la asimilación de CO_2 y otros nutrientes con respecto a las plantas, acumulan entre 20 y 80% de triglicéridos, no requieren tierras cultivables, demandan menor consumo de agua renovable y pueden cultivarse en agua. La composición del medio de cultivo y las condiciones de crecimiento de microalgas tienen un efecto importante en el rendimiento de biomasa y en el contenido de lípidos. Se ha demostrado que la limitación de nitrógeno y fósforo, incrementan el contenido lipídico en microalgas (Fernández y col., 2012).

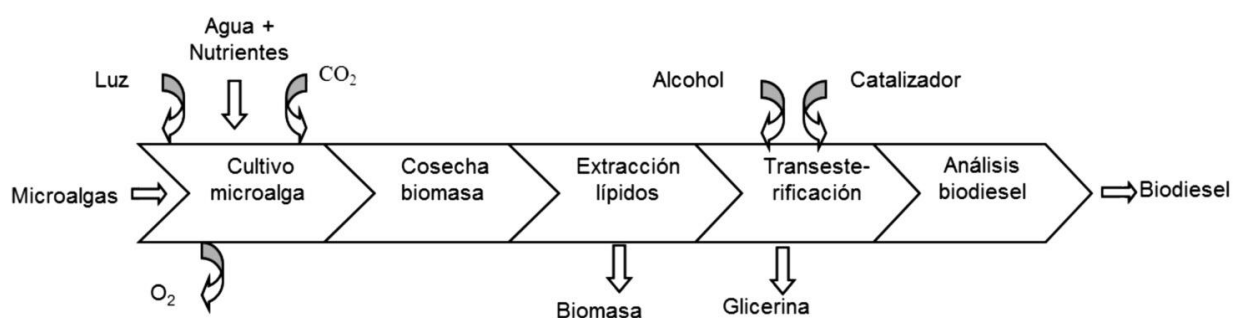


Fig N° 13 Etapas del proceso de obtención de biodiesel a partir de microalgas. (Tomado de Peñaranda y col.2013)

IV.IV.VI.I Biodiesel

El biodiesel es un biocombustible líquido compuesto de alquil-ésteres de alcoholes de cadena corta como etanol y metanol, con ácidos grasos de cadena larga obtenidos a

partir de biomasa renovable: aceites vegetales, grasas animales y aceites de microalgas (Fernández y col., 2012).

El biodiesel tiene las principales ventajas de ser una fuente de energía potencialmente renovable y biodegradable, durante su combustión produce menos emisiones nocivas de sulfuros, hidrocarburos aromáticos y partículas de hollín, posee propiedades lubricantes que reducen el desgaste de los motores, es un producto seguro para su transporte y manejo debido a su elevado punto de inflamación (150 °C) y baja volatilidad. Además, el biodiesel puede utilizar la infraestructura actual de almacenamiento y de distribución para el diesel de petróleo (Fernández y col., 2012).

Los principales sustratos empleados para producir biodiesel son aceites vegetales extraídos de plantas oleaginosas, otro grupo de fuentes potenciales para la producción de biodiesel son las grasas de origen animal, las principales grasas animales empleadas son sebo, grasa blanca o manteca, grasa de pollo y grasa amarilla y por último el uso de microalgas como fuente para producir biocombustibles esto por su alto contenido lipídico en su estructura celular, ventajas ambientales y su rápida generación de biomasa a comparación de las plantas (Fernández y col., 2012).

Organismo	Rendimiento de aceite (L/ha)	Productividad de Biodiesel (L/ha/año)	Superficie equivalente requerida (ha x 10 ⁶)
Palma	2400	5950	3.972
<i>Jatropha</i>	1300	1892	12.490
Colza	1100	1190	19.859
Girasol	690	952	24.823
Soja	400	446	52.986
Microalga	18750	12000	1.969
Microalga [†]	58760	-	-

Tabla Nº 40. Comparación de distintas fuentes de materia prima para la producción de biodiesel (Tomado de Fernández, 2012)

IV.IV.VI.II Microalgas

Las microalgas contienen ácidos grasos como componentes de su membrana, productos de almacenamiento, metabolitos y fuente de energía. Estos microorganismos representan una opción viable como materia prima para producir

biodiesel, debido a la mayor productividad de biomasa y mayor velocidad de replicación con respecto a plantas cultivables algunas especies pueden acumular entre 20-80% (peso seco) de triglicéridos no requieren terrenos cultivables para el crecimiento celular y no compiten por alimento humano.

Para la producción exitosa de biodiesel empleando microalgas como sistemas biológicos para la acumulación de biomasa y lípidos, el primer punto crítico es buscar e identificar cepas híper productoras de lípidos. A pesar de que el intervalo de lípidos contenidos en microalgas oscila entre 1-75% (peso seco), algunas especies pueden alcanzar hasta el 90% (peso seco) bajo condiciones específicas de cultivo.

Para elegir una cepa se debe considerar una estrategia de selección en base a diversos criterios que sean prácticos a los siguientes problemas: a) velocidad de crecimiento, cuantificado normalmente por biomasa total acumulada por unidad de tiempo y unidad de volumen; b) cantidad y calidad lipídica; c) respuesta a alteraciones del ambiente, se consideran variaciones de temperatura, entrada de nutrientes y fuente lumínica, así como competencia con otras especies de microalgas o bacterianas; d) velocidad de absorción y afinidad por nutrientes, particularmente CO₂, nitrógeno y fósforo; e) cultivo de biomasa sencillo para su posterior procesamiento (Fernández y col., 2012).

Cultivo	Especie de microalga	Contenido lipídico (% peso seco)	Productividad lipídica (mg L ⁻¹ d ⁻¹)
Agua dulce	<i>Botryococcus</i> sp.	25.0 – 75.0	-
	<i>Chlorella emersonii</i>	25.0 – 63.0	10.3 – 50.0
	<i>Chlorella vulgaris</i>	5.0 – 58.0	11.2 – 40.0
	<i>Chlorella</i> sp.	10.0 – 48.0	42.1
	<i>Chlorococcus</i> sp.	19.3	53.7
	<i>Scenedesmus obliquus</i>	11.0 – 55.0	-
	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	1.9 – 18.4	35.1
	<i>Scenedesmus</i> sp.	19.6 – 21.1	40.8 – 53.9
	<i>Dunaliella salina</i>	6.0 – 25.0	116.0
	<i>Dunaliella</i> sp.	17.5 – 67.0	33.5
Agua Marina	<i>Nannochloris</i> sp.	20.0 – 56.0	60.9 – 76.5
	<i>Nannochloropsis oculata</i>	22.7 – 29.7	84.0 – 142.0
	<i>Nannochloropsis</i> sp.	12.0 – 53.0	60.9 – 76.5
	<i>Neochloris oleoabundans</i>	29.0 – 65.0	90.0 – 134.0
	<i>Pavlova salina</i>	30.9	49.4
	<i>Spirulina platensis</i>	4.0 – 16.6	-

Tabla N° 41. Contenido lipídico y productividad de diferentes especies de microalgas (Tomado de Fernández, 2012).

Dentro de las especies reportadas en la tabla N° 41 son presentadas algunas que fueron observadas en el embalse Camatagua y en las plantas de tratamiento.

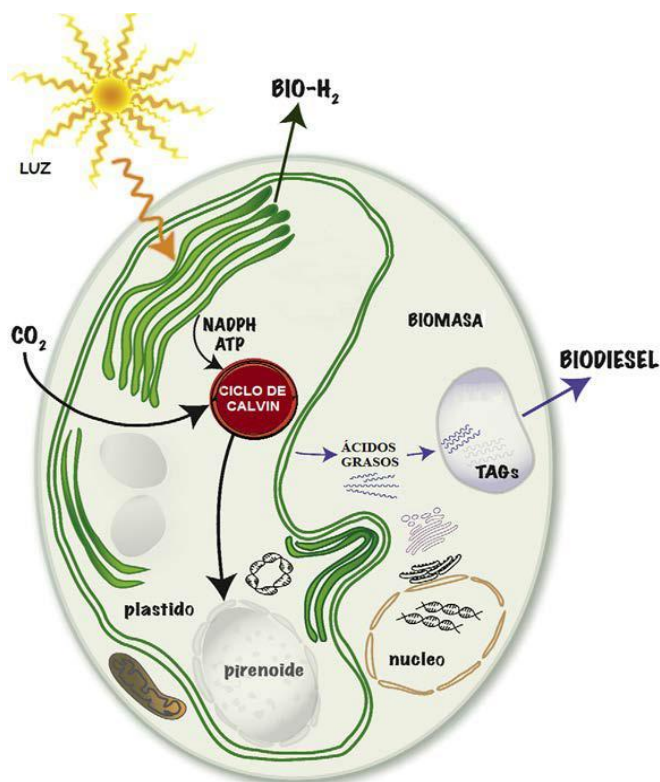


Fig N° 14 Esquema de la biosíntesis de lípidos en microalgas

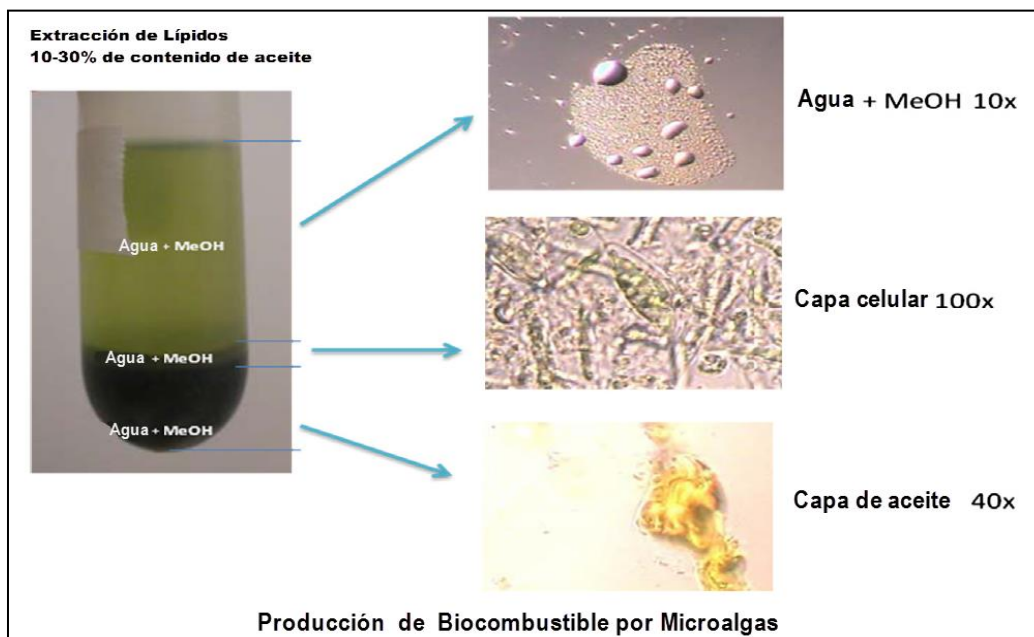


Fig N° 15 Microfotografías donde se observan tres aumentos 1.- Agua + Metanol (10X), 2.- Capa celular (100X), 3.- Capa de aceite (40X)

IV.IV.VI.III Tipos de reactores para el cultivo de Microalgas Oleaginosas

La producción de microalgas oleaginosas con el objeto de obtener biodiesel se puede realizar tanto en reactores cerrados, generalmente llamados fotobiorreactores (FBRs) o en reactores abiertos, conocidos como raceways o Lagunas Abiertas (LA) que tienen el mismo diseño que las Lagunas de Oxidación de Alta Tasa (LOATs).

Las LOATs y las LA son de forma elipsoidal con una separación central que permite formar canales poco profundos en forma de circuito cerrado; se mantienen en agitación mediante paletas giratorias y en ocasiones, cuentan con mecanismos para suministrar CO_2 y nutrientes. Las principales ventajas son el bajo costo de construcción, de operación y de producción de biomasa. Sin embargo, tienen varias desventajas: requieren de grandes áreas de terreno, sufren importantes pérdidas de agua por evaporación, y de CO_2 por difusión a la atmósfera, el sistema de mezclado es deficiente lo que origina una baja concentración celular, la cual a su vez, origina una baja productividad. Ésta última también resulta afectada por contaminación con otras algas y/o por organismos que se alimentan de microalgas; costosa recuperación del producto de medios diluidos y dificultad para el control de la temperatura y el pH. Estas desventajas de las lagunas abiertas estimularon el desarrollo de diversos tipos de fotobiorreactores, los cuales son sistemas cerrados que permiten un control más preciso de las condiciones de cultivo, el cultivo de una sola especie por tiempos prolongados, la obtención de una alta productividad de biomasa y se puede evitar la contaminación. La mayoría de los FBRs expuestos a condiciones ambientales exteriores se caracterizan por tener grandes áreas de iluminación y desde este punto de vista, los tipo placa plana y los tubulares horizontales inclinados son los mejores, excepto por la dificultad de escalamiento, mientras que los de columna de burbujeo, los airlift y el tipo tanque agitado son de fácil escalamiento, pero tienen áreas de iluminación menores respecto al resto de los FBRs (Loera-Quezada y Olguín 2012).

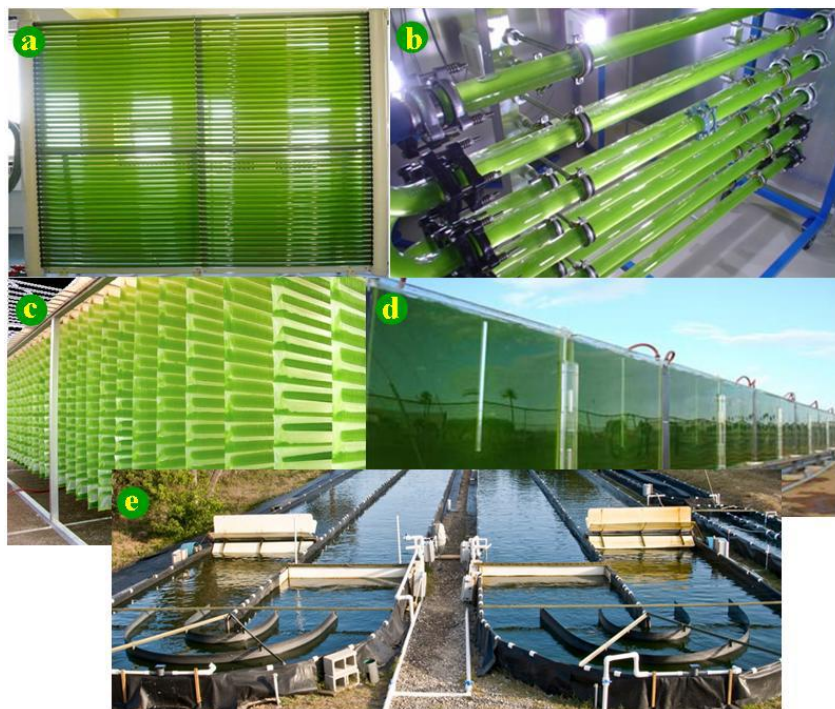


Imagen N° 16 a.- FBR Tubular, b.- FBR Tubular, c.- Tecnología vertical de alga, d.- FBR Tipo placas, e.- Lagunas abiertas (LA) o "raceways" (Tomado de Loera-Quezada y Olguín 2012).

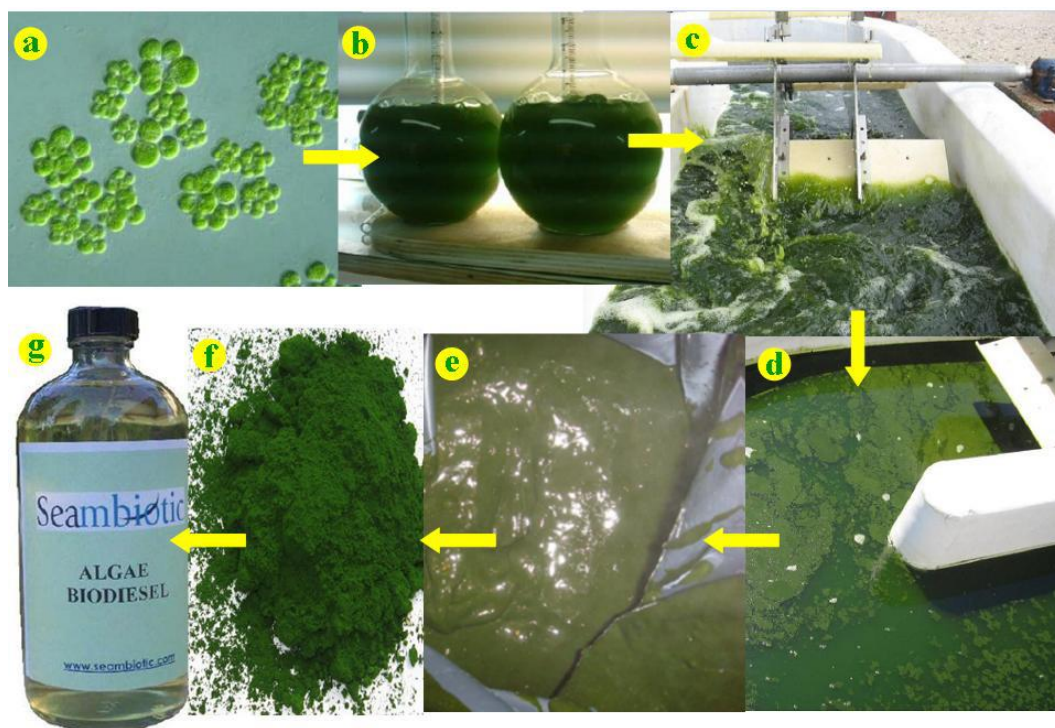


Imagen 17. Cultivo de *Nannochloropsis* sp. en lagunas abiertas (LA) para la producción de biodiesel en Israel. a) *Nannochloropsis* sp., b) cultivo en laboratorio, c) cultivo en LOATs, d) co-bio-floculación, e) cosecha de biomasa, f) *Nannochloropsis* sp. seca y g) biodiesel (Tomado de Loera-Quezada y Olguín 2012).

IV.V.- Relación Costo-Beneficio del sistema de tratabilidad propuesto. Objetivo específico N° 5

A continuación será presentado el análisis costo beneficio, realizando una integración entre las dos tecnologías propuestas, utilizando para este análisis los dos métodos planteados en los aspectos teóricos tales como: el Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno.

Para realizar un análisis Costo-Beneficio son requeridos un conjunto de parámetros con sus respectivas unidades de medición, para esta investigación fueron adquiridos una serie de valores, sin embargo, existen otros valores que podrían intervenir en este tipo de análisis pero no fue posible su recopilación debido a lineamientos internos de la empresa ó registros de datos (costos) extraviados. Cabe destacar que tomar en cuenta la totalidad de las externalidades en un estudio de este tipo, resulta complejo por no decir imposible, es por ello que una investigación con estas características se convierte en aproximaciones cada vez más cercanas a la realidad dependiendo de la cantidad de datos disponibles.

Para la investigación contamos con los siguientes datos de la Planta de Tratamiento Caujarito: .- Caudales de entrada y salida, - Consumos (kg) y costos (Bs) del sulfato de aluminio líquido, sulfato de aluminio sólido, policloruro de aluminio y cloro. Se tienen disponibles estos datos desde el mes de enero 2014 hasta el mes de enero de 2016.

Como datos importantes debemos mencionar el costo de los productos o materia prima utilizada en la potabilización del agua.

Materia prima	Costos Bs /kg
Sulfato de Aluminio Líquido	15767
Sulfato de Aluminio Sólido	33829
Cloro Gas (aproximadamente 907kg)	460

Tabla N° 42 Costos de la materia prima para la potabilización del agua

Estos costos corresponden a cotización obtenida en julio 2016.

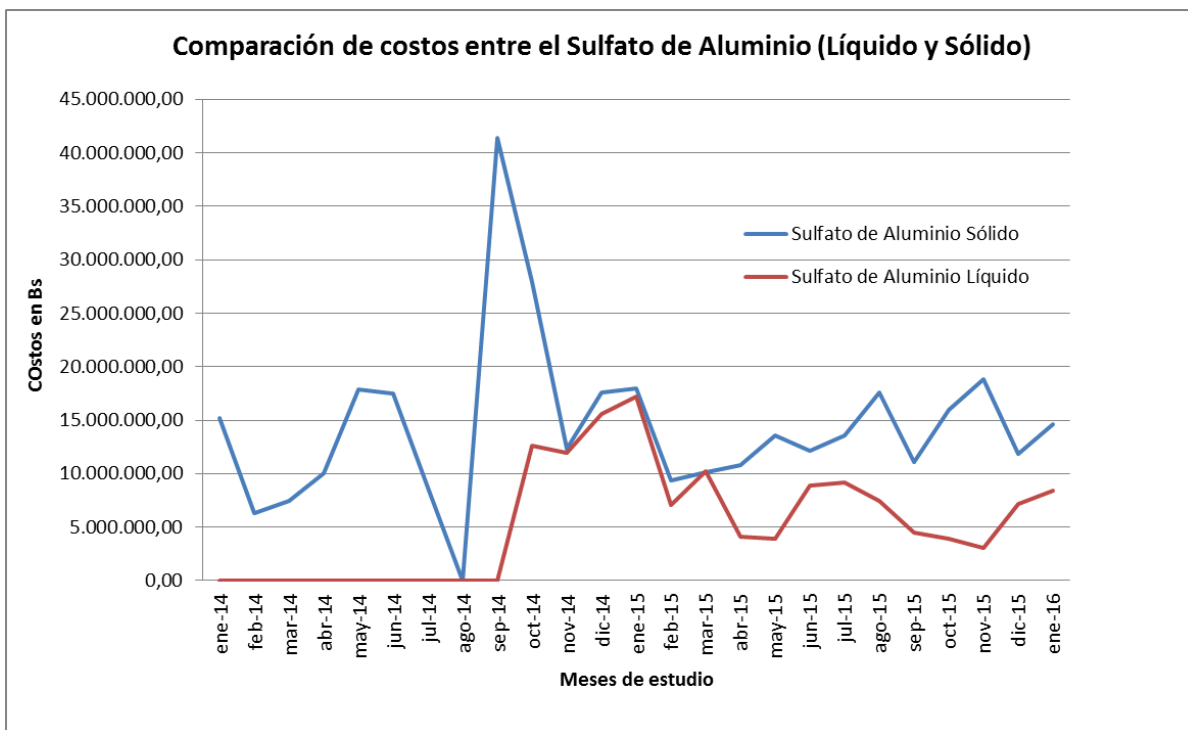
Mes	Sulfato de aluminio sólido (kg/mes)	Sulfato de aluminio líquido (kg/mes)	Costo Total Mensual (Bs) de Sulfato de Aluminio Sólido	Costo Total Mensual (Bs) de Sulfato de Aluminio Líquido
Enero 2014	448,774		Bs. 15.181.575,646	Bs. 0,00
Febrero 2014	187,278		Bs. 6.335.427,462	Bs. 0,00
Marzo 2014	219,347		Bs. 7.420.289,663	Bs. 0,00
Abril 2014	297,569		Bs. 10.066.461,701	Bs. 0,00
Mayo 2014	527,924		Bs. 17.859.140,996	Bs. 0,00
Junio 2014	517,515		Bs. 17.507.014,935	Bs. 0,00
Julio 2014	257,829		Bs. 8.722.097,241	Bs. 0,00
Agosto 2014	410,953		Bs. 13.902.12,037	Bs. 0,00
Septiembre 2014	1.222,630		Bs. 41.360.350,270	Bs. 0,00
Octubre 2014	825,456	801,717	Bs. 27.924.351,024	Bs. 12.640.671,939
Noviembre 2014	364,780	760,280	Bs. 12.340.142,620	Bs. 11.987.334,760
Diciembre 2014	519,643	989,961	Bs. 17.579.003,047	Bs. 15.608.715,087
Enero 2015	531,678	1.090,112	Bs. 17.986.135,062	Bs. 17.187.795,904
Febrero 2015	278,010	450,107	Bs. 9.404.800,290	Bs. 7.096.837,069
Marzo 2015	299,590	648,956	Bs. 10.134.830,110	Bs. 10.232.089,252
Abril 2015	319,546	262,759	Bs. 10.809.921,634	Bs. 4.142.921,153
Mayo 2015	400,989	248,084	Bs. 13.565.056,881	Bs. 3.911.540,428
Junio 2015	358,757	564,053	Bs. 12.136.390,553	Bs. 8.893.423,651
Julio 2015	402,241	580,817	Bs. 13.607.410,789	Bs. 9.157.741,639
Agosto 2015	518,592	470,768	Bs. 17.543.448,768	Bs. 7.422.599,056
Septiembre 2015	327,692	285,890	Bs. 11.085.492,668	Bs. 4.507.627,630
Octubre 2015	471,170	248,870	Bs. 15.939.209,930	Bs. 3.923.933,290
Noviembre 2015	556,533	191,246	Bs. 18.826.954,857	Bs. 3.015.375,682
Diciembre 2015	349,342	454,987	Bs. 11.817.890,518	Bs. 7.173.780,029
Enero 2016	432,375	533,127	Bs. 14.626.813,875	Bs. 8.405.813,409

Tabla N° 43 Costos de materia prima, específicamente sulfato de aluminio líquido y sulfato de aluminio sólido.

En la tabla N° 43 fue calculado el gasto en bolívares mensual desde enero 2014 hasta 2016 para los coagulantes Sulfato de Aluminio Sólido y Sulfato de Aluminio Líquido, asumiendo los precios de las sustancias durante todo el período de estudio sin variación, entendiendo esto como un ejercicio de aproximación ya que no fue posible obtener los precios de estas sustancias para el año 2014 y 2015, además de la gran variabilidad en costos que tienen este tipo de productos en la actualidad, debido a las tasas inflacionarias.

La siguiente gráfica presenta la relación entre las dos sustancias utilizadas en el proceso de coagulación, como ya fue aclarado con los precios correspondientes para cada sustancia, pero tomando como base la cotización obtenida en julio 2016.

Resulta evidente el mayor gasto que se invierte para el Sulfato de Aluminio Sólido.



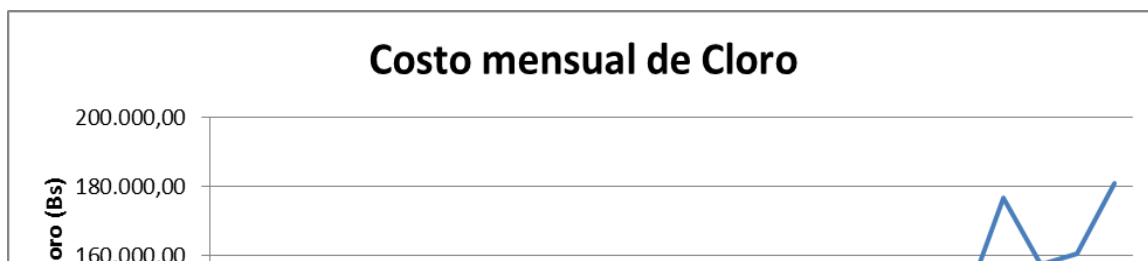
Gráfica N° 112 Comparación de los costos entre el sulfato de aluminio líquido y sólido

El promedio del precio por mes del Sulfato de Aluminio Sólido fue de Bs. 14.947.293,583 y para el Sulfato de Aluminio Líquido fue de Bs. 5.412.327,999 (para 17 meses), estos valores serán utilizados posteriormente.

A continuación será presentada la inversión para el otro proceso fundamental en la potabilización del agua, la desinfección, para lo cual se utiliza gas cloro.

Mes	Cloro (kg/mes)	Costo Total Mensual (Bs) Cloro
Enero 2016	393,382	Bs. 180.955,720
Diciembre 2015	349,380	Bs. 160.714,800
Noviembre 2015	342,400	Bs. 157.504,000
Octubre 2015	384,240	Bs. 176.750,400
Septiembre 2015	319,510	Bs. 146.974,600
Agosto 2015	322,420	Bs. 148.313,200
Julio 2015	317,360	Bs. 145.985,600
Junio 2015	302,930	Bs. 139.347,800
Mayo 2015	323,560	Bs. 148.837,600
Abril 2015	311,020	Bs. 143.069,200
Marzo 2015	327,140	Bs. 150.484,400
Febrero 2015	295,240	Bs. 135.810,400
Enero 2015	331,300	Bs. 152.398,000
Diciembre 2014	329,460	Bs. 151.551,600
Noviembre 2014	312,570	Bs. 143.782,200
Octubre 2014	342,150	Bs. 157.389,000
Septiembre 2014	335,100	Bs. 154.146,000
Agosto 2014	318,380	Bs. 146.454,800
Julio 2014	323,600	Bs. 148.856,000
Junio 2014	330,600	Bs. 152.076,000
Mayo 2014	303,320	Bs. 139.527,200
Abril 2014	260,800	Bs. 119.968,000
Marzo 2014	277,800	Bs. 127.788,000
Febrero 2014	243,320	Bs. 111.927,200
Enero 2014	324,960	Bs. 149.481,600

Tabla N° 44 Costos mensuales de gas cloro



Gráfica N° 113 Costos del gas cloro desde enero 2014 hasta enero 2016

El promedio del precio mensual de cloro durante los 24 meses de presentación de consumos es de Bs. 147.603,732.

Por información de la jefa de la Planta de Tratamiento Caujarito se cancela mensualmente por el servicio de energía eléctrica 38000 Bs en promedio.

A continuación la estimación de los gastos en sustancias químicas para la potabilización del agua y la inclusión del servicio eléctrico.

Productos y/o servicios	Costos
Sulfato de Aluminio Líquido	Bs. 5.412.327,999
Sulfato de Aluminio Sólido	Bs. 14.947.293,583
Cloro	Bs. 147.603,732
Servicio Eléctrico	Bs. 38.000
TOTAL	Bs. 20.507.225,315

Tabla N° 45 Costos de los productos y/o servicios utilizados en la planta de tratamiento Caujarito

Después de obtener el costo total para el consumo de sustancias químicas, será realizada la estimación para los beneficios que ofrece la Planta de Tratamiento Caujarito en términos monetarios.

Seguidamente serán presentados los Beneficios (en términos monetarios) del servicio del agua potable. Partiendo de la externalidad positiva que implica el suministro de agua potable a los usuarios de Hidrocapital en un costo muy bajo (como el actual) con

respecto a la tasa inflacionaria actual y a los costos inherentes al proceso de potabilización, el cual resulta bastante elevado, será incorporada la tarifa que se cancela por metro cúbico de agua 3,8 bolívares, cada usuario debería consumir 250 litros diarios, sin embargo en la región metropolitana un usuario promedio consume 500 litros de agua diario. Por otra parte, existen aproximadamente 300 mil suscriptores del servicio de agua potable en el área metropolitana de Caracas y 3 millones de habitantes (INE, 2015).

Ahora bien, cada familia venezolana tiene en promedio 5 personas, dividiendo el total de habitantes entre cinco personas, obtenemos 600 mil hogares, es decir, deberían existir 600 mil suscriptores, y sólo existen 300 mil suscriptores aproximadamente. El tiempo “t” utilizado serán de 25 meses, desde enero 2014 hasta 2016, tiempo de vida utilizado en el VAN.

Metros cúbicos	Costo (Bs)	Consumo diario (m³)	Tiempo de estudio (enero2014-enero2016)	Suscriptores	Beneficios (Bs)
1	3,8	0,5	9125 días	300000	5.201.250.000

Tabla N° 46 Beneficios (Bs) en 9125 días por la cancelación del agua potable por parte de los suscriptores

A manera de aclaratoria, en este conjunto de datos ya hemos obtenido dos valores requeridos para calcular el VAN, los cuales son los Beneficios del período t y los Costos del período t.

Beneficios del período t= 5.201.250.000 Bs

Por otra parte los ***Costos del período t = 20.507.225,315 Bs***

Sin embargo este último valor puede estimarse con mayor precisión. Este cálculo fue realizado tomando como base la tecnología convencional utilizada en Caujarito, la idea de este análisis Costo - Beneficio resulta en tomar la decisión financiera de cambiar la tecnología actual convencional por el sistema por flotación.

Para ello realizaré el cálculo de la cantidad de sustancias químicas utilizadas como si ya estuviese instalada la tecnología propuesta, es decir, el sistema por flotación. De

acuerdo al valor referencial obtenido en el capítulo anterior "Magnitud removida por la Planta Piloto", en donde fueron comparadas ambas tecnologías desde el punto de vista químico se realizarán estas extrapolaciones.

Presentando de nuevo los resultados citados.

Fecha de muestreo	Magnitud removida por la Planta Piloto (UNT)	Aplicación de coagulantes	
		Planta Piloto	Planta de Tratamiento
25/09/2016	14.1	5 ppm de Sulfato de Aluminio Sólido	
27/10/2016	21.1	16 ppm de Sulfato de Aluminio Sólido	
08/01/2016	11.1	25 ppm (Sulfato de Aluminio Sólido) y 30 ppm (Sulfato de Aluminio Líquido)	
12/02/2016	9.2	8 ppm de Sulfato de Aluminio Líquido	
27/05/2016	2.43	12 ppm de Sulfato de Aluminio Líquido	

Tabla N° 47 Comparación de la turbiedad removida por la Planta Piloto y la aplicación de coagulantes aplicada las plantas de tratamiento

Ahora bien, al utilizar el Sulfato de Aluminio Sólido la Planta Piloto removi6 en promedio 3,463 UNT y al utilizar el Sulfato de Aluminio Líquido se removieron 1,26 UNT.

A continuación se calculará la relación de los costos obtenidos en cada una de estas sustancias y la "Magnitud removida por la Planta Piloto" para estimar el costo hipotético si estuviese instalada la tecnología alternativa de la Planta Piloto desde enero 2014 hasta enero 2016.

Coagulante	Costo real (Bs)	Promedio de Magnitud removida por la Planta Piloto	Costo (Bs) hipotético
Sulfato de Aluminio Líquido	5.412.327,999	3,463	Bs. 1.562.901,530
Sulfato de Aluminio Sólido	14.947.293,583	1,26	Bs. 11.862.931,415

Tabla N° 48 Comparación del costo real, y el costo hipotético proveniente del promedio de magnitud removida por la planta piloto

Para el caso de los consumos de Cloro, utilizaremos datos del parámetro Demanda de Cloro, realizado al agua flotada de la Planta Piloto.

Al realizar este análisis resultó en un 70 % menos Demanda de Cloro en la Planta Piloto con respecto a la Planta de Tratamiento Convencional, así pues será calculado el 70 % del costo de cloro para obtener el costo hipotético del cloro como si ya estuviese instalada la tecnología alternativa.

Desinfectante	Costo real (Bs)	Demanda de cloro en la Planta Piloto con respecto a la Planta de Tratamiento convencional	Costo (Bs) hipotético
Gas Cloro	147.603,732	0,7	Bs. 103.322,612

Tabla N° 49 Costo real del cloro, y costo hipotético proveniente de la demanda de cloro de la planta de tratamiento convencional

Ahora presentaremos los costos asumiendo la tecnología de la Planta Piloto.

Productos y/o servicios	Costos
Sulfato de Aluminio Líquido	Bs. 1.562.901,530
Sulfato de Aluminio Sólido	Bs. 11.862.931,415
Cloro	Bs. 103.322,612
Servicio Eléctrico	Bs. 38000
TOTAL	Bs. 13.529.193,558

Tabla N° 50 Costo de productos y servicios asumiendo la tecnología de la planta piloto

Sólo en sustancias químicas e incluyendo el servicio eléctrico el ahorro en la inversión utilizando la Planta Piloto correspondería a 6.978.031,756 Bs (obtenido de la diferencia de la inversión de la tecnología convencional y la tecnología alternativa de la Planta Piloto)

De esta manera el **Costo del período $t= 13.529.193,558$**

Otro parámetro a incluir en el VAN corresponde a la Inversión Inicial, cambiar la tecnología actual al aire por flotación, al cambio resulta en **100.000.000** (cien millones de bolívares), este valor se está asumiendo para el año 2015, apartando variables intervinientes como la tasa inflacionaria, tasas de cambio, entre otros factores.

El tiempo a evaluar el proyecto corresponde a la recuperación de la Inversión Inicial. Para esto es utilizado el tiempo en el cual fue realizada la estimación de los costos de las sustancias químicas 25 meses (enero 2014 - enero 2016), pero la mayoría de los cálculos financieros se miden en años, así que utilizaremos 24 meses ó 2 años. Esto nos da como resultado 50.000.000 bs por año para cancelar esta inversión inicial, sin embargo, los Beneficios de costo durante todo el período estudiado corresponde a 5.201.250.000 Bs, es decir para recuperar la inversión inicial se necesitaría menos de un año, para alcanzar los 100.000.000 bs.

A continuación se estima el flujo de caja o flujo de ingresos para los 25 meses (aproximando a 2 años), esto corresponde a valor de Beneficio de costos, 5.201.250.000 bs entre dos años, cada año será obtenido **2.600.625.000Bs**. Por último será calculada la tasa de descuento, en finanzas corporativas, a menudo se usa el promedio ponderado del costo de capital de una firma para determinar la tasa de descuento. En situaciones más simples, normalmente se puede usar la tasa de retorno de una cuenta de ahorros, o de una inversión en acciones, que podrá ser obtenida a partir del dinero en lugar de llevar a cabo la inversión que se va a analizar. Se tomará la Tasa Activa de un banco nacional actualizado al 25 de febrero de 2016, en **24 %**.

A continuación se realizarán los cálculos de los descuentos de los flujos de caja.

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=0}^n (B_t - C_t) * \frac{1}{(1 + ri)^t}$$

Donde: Bt: Beneficios del período t= **2.600.625.000**

Ct: Costos del período t= **13.529.193,558**

ri: Tasa de descuento= **24 % (0,24)**

I₀: Inversión inicial= **100.000.000**

n: vida útil del proyecto= **2 años**

Para el primer año

$$2.600.625.000Bs - 13.529.193,558 / (1 + 0.24)^1$$

Para el segundo año

$$2.600.625.000Bs - 13.529.193,558 / (1 + 0.24)^2$$

$$\begin{aligned} \text{De } t=1 \text{ años hasta } t=2 \text{ años } \sum 2.086.367.586 + 1.682.554.505 \\ = 3.768.922.091 \text{ Bs.} \end{aligned}$$

$$\text{VAN} = -I_0 (\text{inversión inicial}) + 3.768.922.091$$

$$\text{VAN} = -100.000.000 + 3.768.922.091$$

$$\text{VAN} = 3.668.922.091 \text{ Bs.}$$

VAN > 0 se recomienda pasar a la próxima etapa del proyecto

VAN = 0 es indiferente realizar la inversión

VAN < 0 se recomienda desecharlo o postergarlo.

Por otra parte, se calculó en la herramienta Excel la Tasa Interna de Retorno (TIR).

$$\text{TIR} = -97\%$$

TIR > Costo oportunidad se recomienda pasar a la siguiente etapa

TIR = Costo Oportunidad es indiferente invertir

TIR < Costo oportunidad se recomienda su rechazo o postergación

De los dos valores obtenidos, el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) el primero de ellos indica ***se recomienda pasar a la próxima etapa del proyecto*** sin embargo el segundo indica ***Costo oportunidad se recomienda su rechazo o postergación***, en este sentido el proyecto de adecuación (cambio de tecnología) no es rentable para el período de estudio (según el resultado de TIR), este resultado pareciera anómalo a pesar de que química y operacionalmente la nueva tecnología demostró ser más eficiente, desde el punto de vista financiero no otorga rentabilidad (según el resultado de TIR), sin embargo, no está dentro de la misión y visión de la empresa Hidrocapital obtener rentabilidad del suministro de agua, sino en contraparte cubrir una necesidad básica, adicionalmente el VAN si demostró continuar con el proyecto.

Los gastos que implican reparaciones de equipos, bombas, entre un sin número de mantenimientos preventivos, correctivos podrían cubrirse si se aumenta el costo del agua potable (en un porcentaje razonable) ó se incrementa el número de suscriptores

que disfrutan del servicio. El importar equipos, repuestos, consumibles, entre otros, resulta a largo plazo un gasto sobrestimado en contraste a tomar acciones como las mencionadas anteriormente para resolver estas situaciones en nuestro país.

IV.VI.- Propuestas de soluciones a la problemática de calidad de las aguas del embalse Camatagua. Objetivo específico N° 6.

El efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales Taiguaiguay (Edo. Aragua), fue desviado hacia el embalse Taiguaiguay, y de allí se bombea agua hacia el río Tucutunemo para la construcción del sistema de riego hacia los valles de esta zona. Sin embargo, por no haberse completado totalmente esta obra, parte del efluente de este sistema está siendo vertido hacia el río Guárico, principal afluente del embalse Camatagua y todos estos impactos sobre la calidad de las aguas del embalse no han sido evaluados aún (González,2015). Este evento debe ser eliminado cuanto antes para evitar el continuo proceso de eutrofización del embalse.

Adicionalmente se debe reforestar en la cuenca media y alta del río Guárico, con el fin de controlar las actividades de la pequeña y mediana industria porcina, bovina y avícola.

El incremento de viviendas rurales cada día es más numeroso, sin sistemas de tratamiento de aguas servidas, por ello es imprescindible garantizar el control de estas construcciones.

A continuación se presentan algunas alternativas para manejar y rehabilitar las aguas del embalse Camatagua (las cuales han sido efectivas en otros cuerpos de agua con el problema de calidad de aguas que presenta este embalse):

- 1.- El control de la carga interna la cual involucra principalmente la remoción directa del sedimento ó el aislamiento físico o químico del mismo, de forma de limitar el intercambio de nutrientes entre el sedimento y la columna de agua. Existen mecanismos de este tipo que traen consigo algunas consecuencias perjudiciales para la calidad de las aguas del reservorio como aumento de la turbiedad, disminución de la concentración de oxígeno, pérdida de especies entre otros;
- 2.- Manejo del volumen de las entradas de agua, es posible variar el tiempo de residencia en el reservorio, lo cual representa una medida efectiva para provocar la dilución, eliminación de parte de la carga interna e inclusive de microalgas o plantas del sistema. La renovación tiene que ser equivalente al 10 o 15 % del volumen del lago para ser efectiva. En algunos casos, la disminución del tiempo de residencia se

puede llevar a cabo sin disminuir la concentración de nutrientes, con el propósito de eliminar cianobacterias;

3.- El suministro de oxígeno gaseoso o líquido al sedimento permite la descomposición de la materia orgánica acumulada. Por otra parte, en presencia de oxígeno la mayoría de los compuestos que contienen fósforo son insolubles, por lo que este es un método muy efectivo para el aislamiento químico del sedimento;

4.- La precipitación es otro procedimiento que remueve el fósforo desde la columna de agua, y la inactivación es una técnica que disminuye la liberación desde el sedimento mediante la adición de compuesto como el sulfato de aluminio. Las sales de hierro, calcio y aluminio se pueden combinar con fósforo inorgánico o con partículas que contienen fósforo en la columna de agua, formando flóculos que sedimentan. De todas estas especies, el aluminio es el más frecuentemente utilizado ya que el fósforo se une fuertemente a estas sales en un amplio rango de condiciones, incluyendo la anoxia. El tratamiento del embalse con bajas dosis puede ser efectivo en la precipitación pero es totalmente inapropiado para la inactivación, para que esta última ocurra, se debe adicionar suficiente material como para que la capa sedimentada alcance por lo menos 5 cm de espesor, la aplicación de esta técnica puede ser combinada con la oxigenación (Modificado de Mazzeo y col.; 2001).

Área	> 1 km ²				<1 km ²			
Estratificado	SI		NO		SI		NO	
Tiempo de retención (años)	>5	<5	>5	<5	>5	<5	>5	<5
Métodos mecánicos								
Remoción del sedimento	-	-	-	-	+	+	+	+
Tratamiento de aguas profundas	¿	+	-	-	¿	+	-	-
Desestratificación	+	+	-	-	+	+	-	-
Métodos químicos								
Precipitación de fósforo	+	¿	+	¿	+	¿	+	¿
Tratamiento del sedimento con nitrato	-	-	-	-	+	¿	+	¿
Aireación de aguas profundas	+	+	-	-	+	+	-	-
Bio-manipulación								
Control de peces planctívoros	+	+	+	+	+	+	+	+

+ Método económicamente factible y con probabilidades de éxito, - Método económicamente factible o no y sin probabilidades de éxito, ¿Método que carece de evidencia científica con relación a su efectividad en las características morfológicas y del régimen térmico indicadas.

Tabla N° 51 Tipos de tratamientos a reservorios de agua de acuerdo a sus probabilidades de éxito y factibilidad económica

IV.IV.I.- Tecnología propuesta

En los tratamientos epilimnéticos se aprovecha la existencia de una capa superficial menos densa y separada por una termoclina de las capas más densas del fondo, para generar una perturbación física continua a través de la circulación horizontal del agua. Este proceso, mantenido en el tiempo, reduce drásticamente el riesgo de crecimientos masivos de cianobacterias, uno de los procesos típicos de aguas eutrofizadas. Las bombas del modelo SB10000v18 de Abeja Solar pueden hacer circular más de 40.000 litros por minuto extendiendo su efecto preventivo sobre posibles blooms de cianobacterias hasta una superficie circular de 14 hectáreas con un diámetro de tratamiento de 425 m.

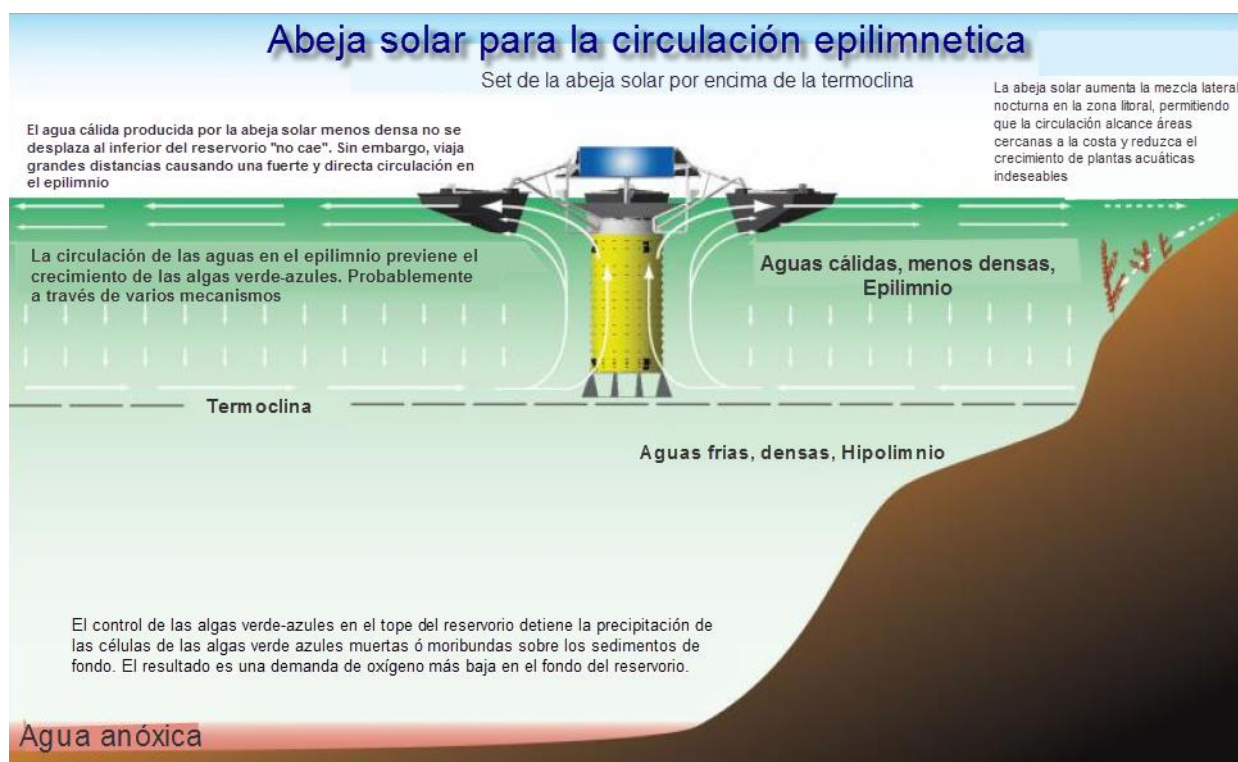


Fig. N° 16 Abeja solar para la circulación epilimnética

En los tratamientos hipolimnéticos el principio de funcionamiento es similar pero la elevación de agua se produce desde las capas más profundas y menos oxigenadas elevándolas hasta la superficie donde se oxigenan por contacto con el oxígeno atmosférico y los productores fotosintéticos. De este modo se controlan los procesos relacionados con la anoxia en fondo que pueden tener relación con múltiples alteraciones no deseables como la producción de H_2S o solubilización del fósforo.

A lo largo de los quince años de existencia de esta tecnología en EEUU, se han realizado aplicaciones en más de 300 masas de agua. La probabilidad de que un bloom recurrente se mantenga controlado a largo plazo (5 años) es muy alta. El sistema Abeja Solar tiene estimado un 95% de efectividad en este tipo de tratamiento. (tomado de <https://www.medoraco.com/applications/lakes-raw-water-reservoirs>)

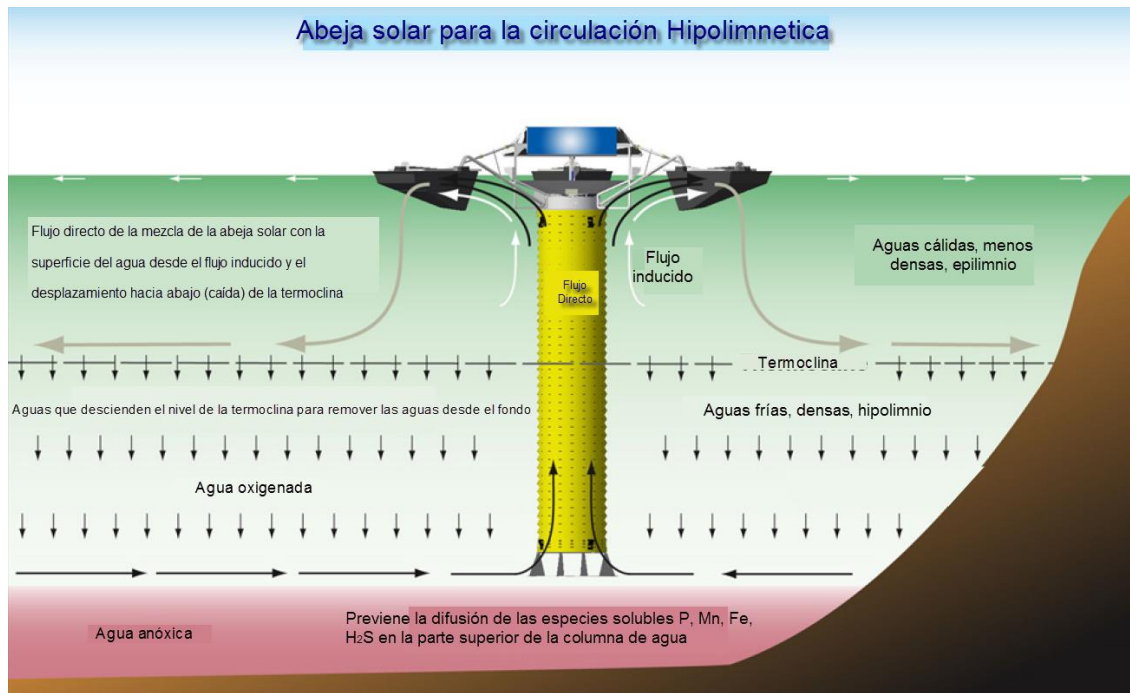


Fig. N° 17 Abeja solar para la circulación hipolimnética

IV.IV.I.II Ventajas de la Abeja Solar

La abeja solar ejerce algunos efectos sobre las cianobacterias que estimulan la calidad del agua en el embalse, es decir, controlan sus efectos nocivos sobre el cuerpo de agua.

- 1.- Controla tanto la circulación horizontal como la vertical, es decir, perturba el entorno donde las algas verde-azules pueden reproducirse (aguas cálidas y tranquilas o estancadas), además de perturbar la capacidad de las cianobacterias para su flotabilidad.
- 2.- Transporta físicamente las cianobacterias fuera de las aguas superficiales, promoviendo que las algas comestibles (por ejemplo diatomeas) compitan con las algas verdes azules por el Nitrógeno y Fósforo soluble. Consecuentemente mejora la cadena trófica del reservorio mientras mejora la claridad del agua.

- 3.- Controla las malezas acuáticas invasivas, debido a que muchas malezas acuáticas invasivas utilizan amoníaco en lugar de nitrato, la circulación de oxígeno del Abeja Solar promueve la limitación del nitrógeno demandadas por las malezas acuáticas.
- 4.- Prevención de la liberación de especies químicas inorgánicas, cuando la manguera de admisión del Abeja Solarse ajusta en la parte inferior, el flujo de retorno laminar de oxígeno-agua de vuelta al sistema (Abeja Solar) “sella” los sedimentos, minimizando la liberación de fósforo soluble, hierro, manganeso y sulfuro de hidrógeno en la columna de agua.
- 5.- Promueve un ahorro sustancial de productos químicos para tratar las aguas en la fuente, es decir, en el embalse.
- 6.- Se mejoran los valores de Transparencia.
- 7.- Las poblaciones de zooplancton aumentaron, ayudando a reducir las concentraciones de clorofila a.
- 8.- Proporciona mayores concentraciones de oxígeno disuelto en la columna de agua.
- 9.- Evita que los peces de temporada mueran.
- 10.- Disminuye las concentraciones de pH y amoníaco.
- 11.- Mantiene los sedimentos litorales oxidados para mejorar el hábitat del desove.

A continuación se presentan dos esquemas comparativos de la no utilización y utilización de la Abeja Solar.

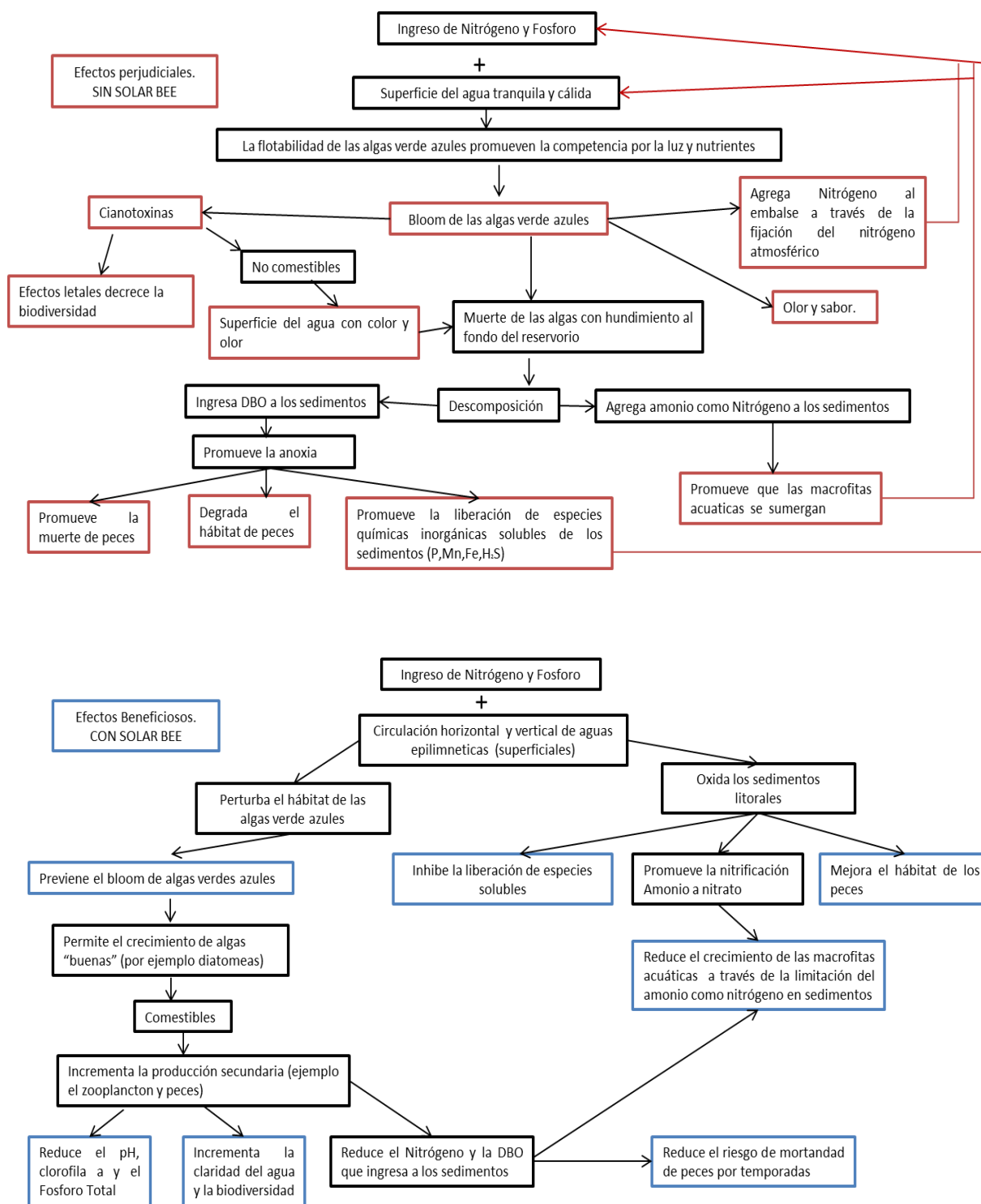


Fig. N° 18 Esquema de efectos beneficios y perjudiciales de la Abeja Solar

Parámetros	Promedio	Mínimo	Máximo
Sin Abeja solar			
pH	8,79	8,24	9,12
Temperatura °C	19,1	12,6	24,8
Turbiedad (NTU)	6,66	2,7	9,3
Clorofila a (µg/l)	13,5	5,3	24,9
TSI (Clo a)	56	47	62
Estado trófico	Eutrófico	Mesotrófico	Eutrófico
Disco secchi (pies)	3	3	4
Con Abeja solar			
pH	8,46	8,13	8,97
Temperatura °C	20,3	13,6	25,6
Turbiedad (NTU)	5,21	0,7	12
Clorofila a (µg/l)	6,6	2	20,1
TSI (Clo a)	49	37	60
Estado trófico	Mesotrófico	Oligotrófico	Eutrófico
Disco secchi (pies)	6	3	14

Tabla Nº 52 Embalse que presenta la comparación de la utilización y no utilización de la tecnología Abeja Solar durante el período de un año.

En esta comparación de la utilización de la tecnología Abeja Solar con la no utilización de esta tecnología, es apreciable los beneficios que aporta a cuerpos de agua eutrofizados, se evidencia la disminución de parámetros como el pH, Turbiedad, Clorofila a, aumento de la Transparencia y como consecuencia de la variación de estos parámetros el estado trófico del cuerpo de agua.

IV.IV.I.III Economía Abeja Solar

Abeja Solar tiene una cobertura de 40 acres aproximadamente que corresponden a 40.000 \$ por unidad instalada.

1000 \$ por acre/año costo inicial.

0\$ costo por acre/año en los próximos 24 años.

Sobre un período de 25 años = 40 \$ / acre /año, costo total= 40.000 \$

Aireación, químicos, entre otros, de 100 \$-500 \$ acre/año

Sobre un período de 25 años, costo total por 40 acres = desde 100.000 \$ hasta 500.000 \$

Es notoria la diferencia en costo de la tecnología Abeja Solar con tecnologías tradicionales como la aplicación de químicos y aireación en cuerpos de agua tipo embalses.

IV.IV.IV Ingeniería de la Abeja Solar

A continuación son presentadas las longitudes tomando como referencia el centro del equipo, el área impactada y la velocidad del flujo generado por esta tecnología.

Distancia desde el centro del equipo, Radio (pies)	Diámetro del flujo (pies)	Área, (acres)	Longitud lineal de flujo, Circunferencia (pies)	Área de flujo (pies ²)	Velocidad de flujo (pies/seg)	Velocidad de flujo (pies/min)	Velocidad de flujo (pies/h)
8	16	0,0046	50,3	50	0,133	8,0	479
50	100	0,1803	314	314	0,021	1,3	77
100	200	0,721	628	628	0,011	0,6	38
200	400	2,885	1257	1257	0,005	0,3	19
300	600	6,491	1885	1885	0,0035	0,2	13
400	800	11,5	2513	2513	0,0027	0,16	10
500	1000	18,0	3142	3142	0,0021	0,13	8
600	1200	26,0	3770	3770	0,0018	0,11	6
800	1600	46,2	5027	5027	0,0013	0,08	5

Tabla Nº 53 Valores referenciales de la tecnología Abeja solar.

Como tecnología propuesta para mejorar la calidad de las aguas del embalse Camatagua, la Abeja Solar se dispondría aproximadamente a 500 metros de la Torre Toma, distancia donde está ubicada la estación de monitoreo de precipitación del Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo y Aguas (la cual no se encuentra en funcionamiento), podría disponerse alineada con esta infraestructura, ya que desde este punto se realiza la captación de muestras y algunos tratamientos que han sido aplicados en el cuerpo de agua y cuyo efecto positivo ha resultado en mejorar la calidad del agua pero en un período de tiempo corto, es decir, tratamientos *in situ* de

corto plazo, sin embargo con la Abeja Solar el tratamiento de las aguas sería constante y sus efectos positivos y prologados.

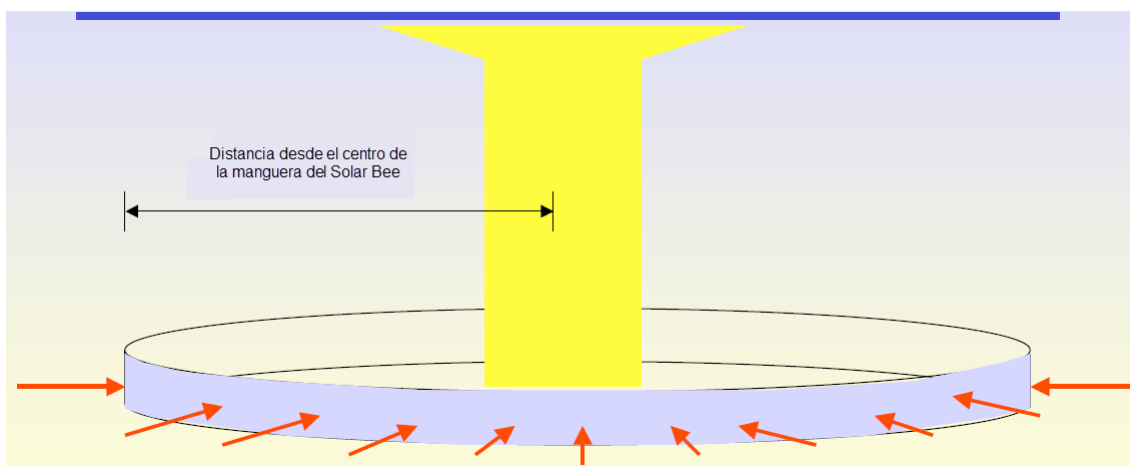


Figura Nº 19 Ilustra las distancias desde el centro de la manguera de la tecnología Abeja Solar.



Imagen Nº 18 Relación de escala que permite visualizar las dimensiones del Abeja Solar.

V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- .- No queda lugar a dudas que debe ser modificado cuanto antes el tratamiento de agua en la Planta de Tratamiento Caujarito al tratamiento alternativo (planta piloto), la aplicación de esta medida se pudiese implementar en el corto plazo, con respecto al control de vertidos de aguas residuales domésticas e industriales en la cuenca del Embalse Camatagua (a través del Río Guárico) lo cual es una medida que por extensión territorial resultaría de mediano a largo plazo.
- .- Los resultados de remoción de especies físico-químicos y biológicos contaminantes obtenidos demuestran que la Planta Piloto disminuiría los problemas de tratamiento de agua que posteriormente son introducidas en la red de distribución de agua de la Gran Caracas.
- .- Desde el punto de vista financiero, el sistema de tratabilidad (Planta Piloto), según el análisis costo – beneficio realizado en la investigación representaría un ahorro monetario por la disminución en las dosis de las sustancias químicas requeridas para el tratamiento del agua proveniente del Embalse Camatagua.
- .- Desde enero hasta diciembre del año 2015 la cota del embalse Camatagua disminuyó constante y notablemente, siendo este de los años más afectados por el fenómeno climático “El Niño”.
- .- En el embalse Camatagua para el año 2015 de acuerdo a la variable de agrupación “Épocas climáticas que influyen en los cuerpos de agua” existió variación en parámetros tales como: pH, Turbiedad, Color Aparente, Fósforo Total, Fósforo Reactivo Disuelto y Nitrógeno Amoniacal, es decir, estas especies presentan variaciones en concentración de acuerdo a la época climática del año, de esta manera la investigación logra predecir de acuerdo a la época climática del año los posibles comportamientos y tecnologías que pudiesen aplicarse en el Embalse Camatagua.
- .- En el embalse Camatagua para el año 2015 de acuerdo a la variable de agrupación “Profundidades de captación de muestras en las tomas selectivas del perfil vertical del embalse Camatagua” los parámetros pH y Alcalinidad total presentaron el comportamiento químico esperado a lo largo de toda la columna de agua. A medida que disminuye el pH, la Alcalinidad total aumenta. Por otra parte el Hierro Total y Manganeseo Total se distribuyeron de manera similar y por último para los aniones y

caciones mayoritarios no se apreciaron tendencias de comportamiento químico constante, con esta conclusión se puede predecir las compuertas que serán aperturadas para iniciar la aducción desde el Embalse Camatagua a la Planta de Tratamiento Caujarito.

.- De acuerdo a la prueba estadística T de student (comparación de medias) el pH, el índice de Saturación de Langelier y los Cloruros presentan un comportamiento que se relaciona con la época de verano en el embalse Camatagua, es decir, no son aleatorios los resultados obtenidos en estos parámetros para la mencionada época climática.

.- La aplicación del modelo de análisis factorial, en este caso Análisis de Componentes Principales, represento una herramienta valiosa para comparar y relacionar el parámetro físico químico con la variable de agrupación “Épocas climáticas que influyen en los cuerpos de agua”, de esta manera las estrategias, operaciones y maniobras en el cuerpo de agua serán las más adecuadas para el tratamiento químico aguas arriba.

.- En el principal afluente del embalse Camatagua, Río Guárico, las tendencias de comportamiento de los parámetros físico químicos son similares a las obtenidas en el embalse Camatagua, a pesar de la sequía del año, el afluente continua siendo un buen estimador de las condiciones que tendrá el reservorio; en este sentido la integralidad de esta investigación resalta evitar las especulaciones en cuanto al comportamiento del Río Guárico a lo largo del año.

.- De los 20 años de estudio del embalse Camatagua, el año 2006 representó un punto de inflexión en las condiciones de intervención antrópica a las que fue sometido el cuerpo de agua, delimita el antes y el después del período de estudio. Resulta contundente la diferencia en las condiciones físico químicas, biológicas y organolépticas; la afectación ocurrida en el período DIA (Después de la Intervención Antrópica) con respecto al período AIA (Antes de la Intervención Antrópica), este aspecto es uno de los más resaltantes de la investigación ya que evidencia las graves y perjudiciales afectaciones generadas a este cuerpo de agua.

.-De acuerdo a las Regresiones Múltiples aplicadas se obtuvo un relación lineal para los parámetros Índice de Saturación de Langelier y el pH. Este hecho corrobora la relación teórica existente entre estos dos parámetros.

- .- Adicionalmente la relación cuadrática entre el Color Aparente y la Turbiedad también aporta desde el punto de vista estadístico una óptima correlación.
- .- Para el período DIA (Después de la Intervención Antrópica), en la estación climática de Lluvia, la estación climática Lluvia se correlacionó con la Transparencia además del Cloruro y la estación climática Sequía resultó en correlación nuevamente con el Cloruro y la Conductividad Específica.
- .- Por la numerosa cantidad de datos para el estudio del embalse Camatagua durante los 20 años fue posible realizar una integración de las variables de agrupación “Épocas climáticas que influyen en los cuerpos de agua” y “Profundidades de captación de muestras en las tomas selectivas del perfil vertical del embalse Camatagua” con los parámetros físico químicos, reafirmando que la herramienta estadística Análisis de Componentes Principales para este tipo de estudio resulta idónea para evaluar comportamientos químicos.
- .- Al comparar resultados “*in situ*” en el muestreo compuesto realizado a ambas plantas (Planta Piloto y Planta de Tratamiento Caujarito), la aplicación de las diferentes dosis de coagulantes así como su estado físico (es decir sólido ó líquido) aporta información valiosa desde el punto de vista operacional para ajustar tanto dosis como estado físico de coagulantes.
- .- La tecnología alternativa de tratabilidad (Planta Piloto) evidenció su eficiencia con respecto a la Planta de Tratamiento Caujarito, en especial en la remoción de parámetros organolépticos como la Turbiedad 68% y el Color Aparente 57% (porcentaje de remoción, correspondiente a la media de las 5 campañas de muestreo para cada uno de los parámetros).
- .- La tecnología alternativa de tratabilidad (Planta Piloto) evidenció su eficiencia con respecto a la Planta de Tratamiento Caujarito, en parámetros embebidos en la matriz de biomasa Fósforo Total 45%, Fósforo Reactivo 48% Disuelto y Nitrógeno Amoniacal 34% (porcentaje de remoción, correspondiente a la media de las 5 campañas de muestreo para cada uno de los parámetros).
- .- En los resultados de Clorofila a el comportamiento de eficiencia de la Planta de Piloto con respecto a la Planta de Tratamiento Caujarito también fue notable, 74% (porcentaje de remoción, correspondiente a la media de las 5 campañas de muestreo).

.- La remoción de la nata de flotación con el sistema alternativo, representa sin duda, la mayor ventaja de esta tecnología, ya que de este remanente flotante de biomasa se encuentran una cantidad de contaminantes influyentes en el proceso de tratamiento de agua potable.

.- Los porcentajes de remoción de Fósforo Total 65%, Fósforo Disuelto Total 33%, Fósforo Reactivo Disuelto 52% en la nata de flotación, representan valores indispensables de estudiar al evaluar el tratamiento alternativo, pues se evidencia la eficiencia de planta, pero además se deben evaluar los costos y el ahorro que significa este porcentaje de remoción y los anteriormente presentados correspondientes a otros parámetros.

.- Con respecto a la caracterización del fitoplancton es notable la cantidad de especies observadas en el período DIA (37 especies de fitoplancton) con respecto al período AIA (10 especies de fitoplancton)

.- Para la cuantificación del fitoplancton en organismos por mililitros (org/ml) y fitoplancton en unidades estándar de área por mililitros (USA/ml) los valores registrados corresponden a una magnitud removida por la planta piloto de 70% y 73% respectivamente en comparación a la planta de tratamiento convencional. Estos resultados son notorios, en cuanto a la capacidad de remoción de la Planta Piloto, del fitoplancton, uno de los componentes que ocasiona mayores inconvenientes en términos operacionales en la Planta de Tratamiento Caujarito.

.- Las microalgas para la producción de biodiesel representa una alternativa de ingeniería ambiental para el desarrollo de energías limpias, siempre y cuando se cuente con el apoyo tecnológico-económico para este emprendimiento.

.- De acuerdo al estudio Costo-Beneficio el $VAN > 0$ se recomienda pasar a la próxima etapa del proyecto la instalación de la nueva tecnología pues la rentabilidad o la recuperación de la inversión será a corto plazo, sin embargo es necesario precisar que la connotación de este proyecto resulta en bienestar social y de acuerdo a ese criterio la rentabilidad quedaría relegada a un objetivo secundario.

.- Como alternativa de solución a la problemática presentada en Embalse Camatagua relativa a la calidad de las aguas, la tecnología Abeja Solar, representa una alternativa de interés para evaluar sus promisorias ventajas respecto a sus desventajas, y

posterior impacto en la calidad de las aguas que serán tratadas en el Embalse Camatagua, en la planta de tratamiento y por último el agua que será consumida por los usuarios del servicio.

.- Para paliar y/o revertir la problemática del Embalse Camatagua se debe adecuar la planta de tratamiento de aguas residuales Taiguaiguay para eliminar el vertido que discurre hacia el río Guárico principal afluente del embalse Camatagua que a su vez surte a la Planta de Tratamiento de Agua Potable Caujarito la cual trata las aguas que abastece a más del 50% de la población de la zona metropolitana de Caracas y adicionalmente a grandes poblaciones del estado Miranda.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios de mayor profundidad para restaurar la calidad del agua y sanear la fuente, es decir, el embalse Camatagua.
- Se recomienda estudiar la posibilidad de implementar la tecnología propuesta para mejorar la calidad de las aguas en el reservorio, la Abeja Solar.
- Se recomienda agilizar los procesos de redimensionamiento y reestructuración de la tecnología de tratamiento en la Planta de Tratamiento Caujarito.
- Se recomienda implementar a corto plazo la nueva tecnología en la planta de tratamiento pues la inversión será revertida en menos de un año.
- .- Se recomienda a las autoridades competentes ajustar el pago del servicio público, agua potable, a un pago justo para la empresa y para el consumidor final.
- Se recomienda culminar el Sistema Tuy IV a fin de paliar la frecuencia, cobertura y calidad del agua a los habitantes de la Gran Caracas.

VI.- REFERENCIAS

- Acero JL, Rodríguez E, Meriluoto J. (2005). **Kinetics of reactions between chlorine and the cyanobacterial toxins microcystins.** Water Research N° 39 pp 1628–38
- Al-Tebrineh J, Mihali TK, Pomati F, Neilan BA.(2010). **Detection of saxitoxin- producing cyanobacteria and Anabaena circinalis in environmental water blooms by quantitative PCR.**Appl Environ Microbiology N°76 pp. 7836–42.
- Arias, F. (2006). **El Proyecto de Investigación, introducción a la metodología científica** (5 ta Edición). Caracas: Editorial Episteme.
- Barón-Sola Á, Ouahid Y, del Campo FF (2012). **Detection of potentially producing cylindrospermopsin and microcystin strains in mixed populations of cyanobacteria by simultaneous amplification of cylindrospermopsin and microcystin gene regions.** Ecotoxicology Environmental Saf; N° 75 pp.102–8.
- Baxa DV, Kurobe T, Ger KA, Lehman PW, Teh SJ (2010). **Estimating the abundance of toxic Microcystis in the San Francisco Estuary using quantitative real-time PCR.**HarmfulAlgae N° 9 pp 342–9.
- Bond, T., Templenton, M., Graham, N. (2012).**Precursors of nitrogenous disinfection by- products in drinking water – A critical review and analysis.** Journal of Hazardous Material N° 236-236, pp. 1-16.
- Bourne DG, Blakeley RL, Riddles P, Jones GJ.(2006)**Biodegradation of the cyanobacterial toxin microcystin LR in natural water and biologically active slow sand filters.** Water Res N° 40 pp 1294– 302
- Brient L, Lengronne M, Bertrand E, Rolland D, Sipel A, Steinmann D (2008) **A phycocyanin probe as a tool for monitoring cyanobacteria in freshwater bodies.** J Environmental Monitoring N° 10 pp. 248–55.
- Byth S. (1980). **Palm Island mystery disease.**Med J Aust N°2 pp. 40– 2.

- Briley DS, Knappe DRU (2002). **Optimizing ferric sulfate coagulation of algae with streaming current measurements.** J Am Water Works Assoc N°94 pp. 80–90.
- CALTEC, 1991. Análisis hidráulico de la Planta de Tratamiento Caujarito.
- Campinas M, Rosa MJ. (2010a). **Removal of microcystins by PAC/UF.** Sep Purif Technol N° 71 pp. 114–20
- Carlson, R.E.(1977). **A trophic state index for lakes.** Limnology & Oceanography N° 22, pp 361-369.
- Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente CEPIS (1989). **Curso básico sobre eutrofización, (CBE).** Organización Panamericana de la Salud. Programa de Salud Ambiental.
- Cerda, A. (2010). **Análisis costo-beneficio, costo-efectividad y su aplicación en la gestión pública de los recursos ambientales y naturales.** Facultad de Ciencias Empresariales, Universidad de Talca, Chile.
- Dawson RM. (1998) **The toxicology of microcystins.** Toxicon N° 36 pp 953–62.- dos Anjos FM, Bittencourt-Oliveira MdC, Zajac MP, Hiller S, Chri Erler K, (2006). **Detection of harmful cyanobacteria and their toxins by both PCR amplification and LC-MS during a bloom event.** Toxicon N° 48 pp 239–45.
- Drikas M, Chow CWK, House J, Burch MD.(2001). **Using coagulation, flocculation, and settling to remove toxic cyanobacteria.** J Am Water Works Assoc N° 93 pp 100–11.
- Dixon MB, Richard Y, Ho L, ChowCWK, O'Neill BK, Newcombe G. **A coagulation-powdered activated carbon-ultrafiltration—multiple barrier approach for removing toxins from two australian cyanobacterial blooms** (2011a). J Hazard Mater N° 186 pp1553–9.
- Dixon MB, Falconet C, Ho L, Chow CWK, O'Neill BK, Newcombe G. **Nanofiltration for the removal of algal metabolites and the effects of fouling.** (2010). Water Sci Technol N ° 61 pp 1189–99.

- Dixon MB, Falconet C, Ho L, Chow CWK, O'Neill BK, Newcombe G. (2011b). **Removal of cyanobacterial metabolites by nanofiltration from two treated waters.** J Hazard Mater N ° 188:288–95.
- Donati C, Drikas M, Hayes R, Newcombe G. (1994). **Microcystin-LR adsorption by powdered activated carbon.** Water Res N° 28 pp 1735–42.
- Chow CWK, Panglisch S, House J, Drikas M, Burch MD, Gimbel R (1997). **A study of membrane filtration for the removal of cyanobacterial cells.** J Water Supply Res Tecnol-AQUA N° 46 pp 324–34.
- Falconer IR. **An overview of problems caused by toxic blue-green algae (cyanobacteria) in drinking and recreational water** (1999). Environmental Toxicology N ° 14 pp. 5–12.
- Falconer IR.(1991)**Tumor promotion and liver injury caused by oral consumption of cyanobacteria.** Environ Toxicol Water Qual N° 6 pp 177–84.
- Fernandez-Linares, LC., Montoya, J., Oropeza, A., Corona, A. (2012). **Producción de biocombustibles a partir de microalgas.** Ra Ximhai N° 3 pp 101-115.
- Fischer WJ, Hitzfeld BC, Tencalla F, Eriksson JE, Mikhailov A, Dietrich DR. (2000) **Microcystin- LR toxicodynamics, induced pathology, and immuno histochemical localization in livers of blue-green algae exposed rainbow trout (Oncorhynchus mykiss).**Toxicology Science N° 54 pp 365–73.
- Fristachi A, Sinclair JL. (2008) **Occurrence of cyanobacterial harmful algal blooms workgroup report.** In: Hudnell KH, editor. **Cyanobacterial harmful algal blooms: state of the science and research needs.** New York, USA:Springer; pp. 45–103.
- Grases, J. (2006). **Ingeniería forense y estudios de sitio. Guía para la preservación de gestión de riesgos.** Caracas, Banesco Seguros.

- Griffiths DJ, Saker ML.(2003).**The Palm Island mystery disease 20 years on: a review of research on the cyanotoxin cylindrospermopsin.** Environmental Toxicology N° 18:78–93.
- Grützmacher G, Böttcher G, Chorus I, Bartel H. (2002).**Removal of microcystins by slow sand filtration.** Environmental Toxicology N°17 pp 386–94.
- González, E. (2015). **Evaluación limnológica del embalse Camatagua (Edos. Aragua y Guárico).** Informe final del proyecto PEII20110001396.Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Instituto de Biología Experimental.
- González Landazábal, A. (2001). **Agua para el siglo XXI para América del Sur. De la visión a la acción. Informe Venezuela.** Editorial Tiempo Nuevo. Asociación Mundial del Agua (GPW), Comité Asesor Técnico para Sudamérica (SAMTAC). División de Recursos Naturales e Infraestructura, CEPAL. Santiago, 69 pp.
- Gupta N, Pant SC, Vijayaraghavan R, Rao PVL. (2003) **Comparative toxicity evaluation of cyanobacterial cyclic peptide toxin microcystin variants (LR,RR, YR) in mice.** Toxicology N° 188 pp 285-96.
- Hall T, Hart J, Croll B, Gregory R. (2000) **Laboratory-scale investigations of algal toxin removal by water treatment.** J Chart Inst Water Environmental Management N° 14 pp 143–9.
- Heisler J, Glibert PM, Burkholder JM, Anderson DM, Cochlan W, Dennison WC, (2008).**Eutrophication and harmful algal blooms: a scientific consensus.** Harmful Algae N° 8 pp.3–13.
- HIDROCAPITAL (2002). **Un esfuerzo que fluye con la gente.** Caracas, Veta Producciones C.A.
- HIDROVEN (2008).**Indicadores de gestión del año 2008.**
- Hisbergues M, Christiansen G, Rouhiainen L, Sivonen K, Börner T (2003). **PCR- based identification of microcystin- producing genotypes of different cyanobacterial genera.** Arch Microbiol N ° 180 pp 402–10.

- Ho L, Meyn T, Keegan A, Hoefel D, Brookes J, Saint CP, (2006a) **Bacterial degradation of microcystin toxins within a biologically active sand filter.** Water Research N° 40 pp 768–74.
- Ho L, Hoefel D, Saint CP, Newcombe G.(2007)**Isolation and identification of a novel microcystin degrading bacterium from a biological sand filter.** Water Research N° 41 pp 4685–95.
- Huang WJ, Cheng BL, Cheng YL.(2007) **Adsorption of microcystin- LR by three types of activated carbon.**J Hazard Mater N° 141 pp 115–22.
- Ibelings BW, Chorus I.(2007). **Accumulation of cyanobacterial toxins in freshwater “seafood” and its consequences for public health: a review.**Environmental Pollution N° 150 pp 177–92.
- Instituto Metropolitano de Urbanismo Taller Caracas (IMUTC) (2012). **Avances del Plan Estratégico Caracas Metropolitana 2020.** Caracas, Alcaldía Metropolitana de Caracas. 236 pp.
- Instituto Nacional de Estadística (INE) (2013). **XIV Censo Nacional de Población y Vivienda.** Resultados por Entidad Federal y Municipios.
- Johnson HE, King SR, Banack SA, Webster C, Callanaupa WJ, Cox PA (2008). **Cyanobacteria (Nostoc commune) used as a dietary item in the Peruvian highlands produce the neurotoxic amino acid BMAA.** J Ethnopharmacol N° 118 pp159–65.
- Jouravlev, A. (2004). **Los servicios de agua potable y saneamiento en el umbral del Siglo XXI.** Serie Recursos Naturales e Infraestructura N°74. Naciones Unidas. CEPAL, Santiago de Chile, 70 pp.
- Kaebernick M, Neilan BA (2001). **Ecological and molecular investigations of cyanotoxin production.** FEMS Microbiol Ecol N° 35 pp 1–9.
- Konno H (1993). **Settling and coagulation of slender type diatoms.** Water SciTechnol N° 27 pp 231–40.

- Kosol S, Schmidt J, Kurmayer R (2009). **Variation in peptide net production and growth among strains of the toxic cyanobacterium *Planktothrix* spp.** Eur J Phycol N° 44 pp 49– 62.
- Krasner,S.W. Weinberg,H.S. . Richardson,S.D Pastor, S.J.Chinn,R. Sclimenti, M.J. Onstad, G.D. Thruston,A.D. (2006) .**Occurrence of a new generation of disinfection byproducts,** Environmental Science Technology N° 40 pp 7175–7185.
- Kuiper-Goodman T, Falconer I, Fitzgerald J.(1999) **Human health aspects. In: Chorus I, Bartram J, editors. Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management. London, UK: E & FN Spon; pp 113–53.**
- Kurmayer R, Christiansen G(2009). **The genetic basis of toxin production in cyanobacteria.**Freshwater Review N° 2 pp 31– 50.
- Kurmayer R, Kutzenberger T (2003). **Application of real-time PCR for quantification of microcystin genotypes in a population of the toxic cyanobacterium *Microcystis* sp.**Appl Environ Microbiol N° 69 pp 6723–30.
- Leenheer,J.A. , Dotson,A.,Westerhoff,P. (2007). Dissolved organic nitrogen fractionation, Annual Environmental Science N° 1 pp 45– 56.
- Lansdell, M. y asociados (2014). **Acueducto de Caracas, Ingeniería, Procura y Rehabilitación en Planta de Tratamiento Caujarito, Estado Miranda. Estudios en Planta Piloto, Informe de avance N° 2.** Caracas.
- Lee J, Walker HW (2008). **Mechanisms and factors influencing the removal of microcystin-LR by ultrafiltration membranes.**J Membr Science N° 320:240–7.
- Loera Quezada, M., Olguín, E. (2010). **Las microalgas oleaginosas como fuente de biodiesel: retos y oportunidades.** Revista Latinoamericana Biotecnología Ambiental Algal N° 1 pp 91-116.

- MacKintosh C, Beattie KA, Klumpp S, Cohen P, Codd GA (1990). **Cyanobacterial microcystin-LR is a potent and specific inhibitor of protein phosphatases 1 and 2a from both mammals and higherplants.** FEBS Lett N° 264 pp 187–92.
- Margalef, R. (1983). **Limnología.** Ed. Omega, Barcelona, España pp 1010.
- Martínez, R. (2012). **Las Redes de Infraestructura Hidráulica y su Incidencia en el Desarrollo Urbano.** Monografía presentada como requisito para optar al grado académico de Doctor en Arquitectura. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Caracas, Universidad Central de Venezuela.
- Martínez, R. (2013). **La gestión del agua potable y el saneamiento en el Área Metropolitana de Caracas.** Instituto Latinoamericano de Investigaciones Sociales (ILDIS). Caracas, Oficina en Venezuela de la Fundación Friedrich Ebert. 23 pp.
- Martínez, R.; Fernández, M.; Ortega, F. y Schaper, A. (2013). **Urban Sustainability Assessment of the Caracas Metropolitan Region. Technical Workshop of Sustainable Cities in Latin America and the Caribbean.** Banco Interamericano de Desarrollo. Mimeo. Washington, D.C.
- Matos; M.L. (1992). **Estudio Integral del Fitoplancton del embalse Camatagua: Sistemática, Distribución vertical, Abundancia, Biomasa y Producción Primaria.** Trabajo de Grado de maestría no publicado Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Maya; E. (2009). **Principios y aplicaciones del Análisis Costo-Beneficio** Primer encuentro técnico sobre la estructuración de proyectos de asociación público – privada. México, Distrito Federal.
- Mazzeo; N. , Clemente J., Rodríguez, F., Gorga, J., Kruk, C., Larrea, D., Meerhoff, M., Quintans, F., Gallego, L., Scasso, F. (2001). **Eutrofización: Causas, Consecuencias y Manejo.** Grupo de Ecología y Rehabilitación de Sistemas Acuáticos Someros, Sección Limnología, Departamento de Ecología. Facultad de Ciencias. Iguá.

- Merel, S.; Walker, D. ; Chicana; R. ;Snyder, S.; Baurés,S.; Thomas,O. (2013).
State knowledge and concerns on cyanobacterial blooms and cyanotoxins. Environmental International N° 59 pp 303-327.
- Medora Corporation (2017).Lakes and raw water reservoirs.Dikinson:
Medoraco.<https://www.medoraco.com/applications/lakes-raw-water-reservoirs> visitada en 22/06/2017.
- Miao, H; Tao, W (2009). **The mechanisms of ozonation on cyanobacteria and its toxins removal.** Separations Purifications Technologies N° 66: pp187-193.
- Mur LR, Skulberg MO, Utkilen H. (1999). **Cyanobacteria in the environment.** In: Chorus I, Bartram J, editors. **Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management.** London, UK: E & FN Spon;. pp. 15–40.
- Newcombe G, Nicholson B.(2004).**Water treatment options for dissolved cyanotoxins.**J Water Supply Res Technol-AQUA N° 53 pp 227–39.
- Nicholson BC, Rositano J, Burch MD (1994). **Destruction of cyanobacterial peptide hepatotoxins by chlorine and chloramine.**Water Res N° 28 pp 1297–303.
- Nishiwaki-Matsushima R, Ohta T, Nishiwaki S, Suganuma M, Kohyama K, Ishikawa T, (1992). **Liver tumor promotion by the cyanobacterial cyclic peptide toxin microcystin-LR.**J Cancer Res ClinOncol N° 118 pp 420–4.
- Nitrogen, (2005) **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater** , American Water Works Association.
- Oliver, B.G. (1983). **Dihaloacetoneitriles in drinking-water – algae and fulvic-acid as precursors,** Environmental Science Technology N° 17 pp 80–83.
- Orr PT, Jones GJ (1998). **Relationship between microcystin production and cell division rates in nitrogen-limited microcystis aeruginosa cultures.** Limnology Oceanography N° 43 pp.1604–14.

- Ostermaier V, Kurmayer R(2010). **Application of real-time PCR to estimate toxin production by the cyanobacterium Planktothrix sp.**Appl Environmental Microbiology N° 76 pp. 3495–502.
- Pérez Lecuna, R. (2005). **El Río Guaire, su canalización a su paso por la ciudad de Caracas.** Boletín de la Academia de Ingeniería y Hábitat, N° 11: 32-55.
- Peñaranda, M., Roldán, A., Villanueva,R., (2013). **Producción de Biodiesel a partir de microalgas: parámetros del cultivo que afectan la producción de lípidos.** Acta Biológica Colombiana N° 1 pp 43-68.
- Phosphorus, (2005) **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, American Water Works Association.
- Pieterse AJH, Cloot A.(1997).**Algal cells and coagulation, flocculation and sedimentation processes.** Water Science Technology N° 36 pp 111–8.
- Plewa, M.J. ,Wagner,E.D. (2009)**Mammalian Cell Cytotoxicity and Genotoxicity of Disinfection By-Products**, Water Research Foundation.
- Rellán S, Osswald J, Saker M, Gago-Martinez A, Vasconcelos V (2009). **First detection of anatoxin-a in human and animal dietary supplements containing cyanobacteria.** FoodChemToxicol N° 47 pp 2189–95.
- Reynolds, K.A. (2002). **Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. Identificación del problema.** Universidad Técnica de Manabí. Facultad de Ciencias Veterinarias/Carrera de Ingeniería en Acuicultura y Pesquerías/Acuicultura/08/Tratamiento de Aguas Residuales. Agua Latinoamérica.
- Rodríguez E, Onstad GD, Kull TPJ, Metcalf JS, Acero JL, von Gunten U (2007a). **Oxidative elimination of cyanotoxins: comparison of ozone, chlorine, chlorine dioxide and permanganate.** Water Res N° 41 pp 3381–93.

- Rodríguez EM, Acero JL, Spoof L, Meriluoto J (2008). **Oxidation of MC-LR and -RR with chlorine and potassium permanganate: toxicity of their action products.** Water Res N° 42 pp 1744–52.
- Rook, J.J (1974). **Formation of haloforms during chlorination of natural water,** Water Treatment. Exam. N° 23 pp 234–243.
- Sarazin G, Quiblier-Llobéras C, Bertru G, Brient L, Vezie C, Bernard C, (2002). **First assessment of the toxical risk associated with fresh water cyanobacteria in France: the EFFLOCYA research program.** J Water Science N° 15 pp. 315–26.
- Saker ML, Jungblut AD, Neilan BA, Rawn DFK, Vasconcelos VM. (2005). **Detection of microcystin synthetase genes in health food supplements containing the freshwater cyanobacterium Aphanizomenon flos-aquae.** Toxicon N° 46 pp 555–62
- Schneider, B (2011). **PO₄ release at the sediment surface under anoxic conditions: a contribution to the eutrophication of the Baltic Sea?** Oceanologia N° 53 pp 415-429.
- Sevilla E, Martin-Luna B, Vela L, Bes MT, Fillat MF, Peleato ML (2008). **Iron availability affects mcyD expression and microcystin-LR synthesis in Microcystis aeruginosa PCC7806.** Environ Microbiol N° 10 pp 2476-83.
- Sivonen K, Jones G. Cyanobacterial toxins. In: Chorus I, Bartram J, editors (1999). **Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management.** London, UK: E & FN Spon; pp. 41–111.
- Teixeira, M.R.; Rosa M.J. (2006); **Comparing dissolved air flotation and conventional sedimentation to remove cyanobacterial cells of Microcystis aeruginosa, Part I: The key operating conditions.** Separation and Purification Technology N°52 pp: 84- 94.

- Tonk L, Visser PM, Christiansen G, Dittmann E, Snelder E, Wiedner C, et al.(2005) **The microcystin composition of the cyanobacterium *Planktothrix agardhii* changes toward a more toxic variant with increasing light intensity.**Appl Environmental Microbiology N° 71 pp 5177–81.
- Tsuji K, Watanuki T, Kondo F, Watanabe MF, Nakazawa H, Suzuki M, et al (1997). **Stability of microcystins from cyanobacteria—iv. Effect of chlorination on decomposition.**Toxicon N° 35 pp 1033–41.
- Velzeboer R, Drikas M, Donati C, Burch M, Steffensen D(1995). **Release of geosmin by *Anabaena circinalis* following treatment with aluminium sulphate.** Water SciTechnol N° 31 pp 187–94.
- Villanueva,C.M, Cantor, K.P. , Cordier, S., Jaakkola, J.J.K, King, W.D. Lynch, C.F. Porru, S. ,Kogevinas, M. (2004). **Disinfection byproducts and bladder cancer: a pooled analysis,** Epidemiology (Cambridge, Mass.) N ° 15 pp. 357–367.
- Water Quality and Treatment (1990). **A handbook of community water supplies.**Mc Graw Hill.Fourth edition.
- Westerhoff, P., Mash, H. (2002).**Dissolved organic nitrogen in drinking water supplies: a review,** J. Water Supply Res. Technol. – AQUA 51 pp 415–448.
- Zho,Y.,Xia, X.H.,Yang,Z.F.,Wang,F. (2012). **Assesment of water quality in Baiyangdian Lake using multivariate statistical techniques.** Procedia Environmental Sciences 13 pp 1213-1226

Fuentes de tipo legal

- Constitución Nacional de la República Bolivariana de Venezuela
- Ley Orgánica del Ambiente. Gaceta Oficial Extraordinaria N° 5.833 del 22 de diciembre de 2006.
- Ley de Aguas. Gaceta Oficial N° 38.595 de fecha 02 de Enero de 2007.
- Ley Penal del Ambiente. Gaceta Oficial N° 39.913 del 2 de mayo de 2012.
- Ley Orgánica para la Prestación de los Servicios de Agua Potable y de Saneamiento. Gaceta Oficial N° 5.568 extraordinario de fecha 31 de diciembre de 2001.
- COVENIN 2709:2002. Aguas Naturales, Industriales y Residuales. Guía para las técnicas de muestreo (1^{era} revisión)
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.