



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN
PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
UNIDAD DURANGO**

**RELACIÓN ENTRE LOS NIVELES DE EUTROFIZACIÓN Y LA
PRESENCIA DE ALGAS EN EL RÍO TUNAL Y RÍO
DURANGO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
PRESENTA**

María Guadalupe Sánchez Martínez

**Directora: Dra. María Elena Pérez López
Codirectora: M.C. Guadalupe Vicencio de la Rosa**



SIP-14-BIS

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Durango, Dgo. siendo las 12:15 horas del día 26 del mes de Noviembre del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR-IPN DGO para examinar la tesis titulada:

Relación entre los niveles de eutrofización y la presencia de algas en el río El Tunal y río Durango.

Presentada por la alumna:

SÁNCHEZ

Apellido paterno

MARTÍNEZ

Apellido materno

MARÍA GUADALUPE

Nombre(s)

Con registro:

B	1	0	1	0	8	6
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN GESTIÓN AMBIENTAL

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis



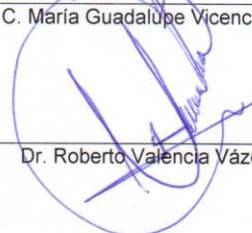
Dra. María Elena Pérez López



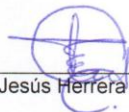
M. en C. María Guadalupe Vicencio de la Rosa



M. en C. Margarita Araceli Ortega Chávez

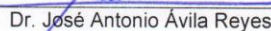


Dr. Roberto Valencia Vázquez



Dr. Jesús Herrera Corral

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


Dr. José Antonio Ávila Reyes





SIP-13-BIS

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTORES DE TESIS

México, D.F. a 7 de Junio del 2011

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR Durango en su sesión ordinaria No. 6 celebrada el día 7 del mes de Junio conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

SÁNCHEZ

MARTÍNEZ

MARÍA GUADALUPE

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre (s)

Con registro:

B	1	0	1	0	8	6
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de: Maestría en Ciencias en Gestión Ambiental

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:

"Relación entre los niveles de eutrofización y la presencia de algas en el río El Tunal y Río Durango"

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:

2.- Se designan como Directores de Tesis a los Profesores:

Dra. María Elena Pérez López y M. en C. María Guadalupe Vicencio de la Rosa3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en: CIIDIR-IPN Unidad Durango

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

Directores de Tesis

Dra. María Elena Pérez López

Aspirante

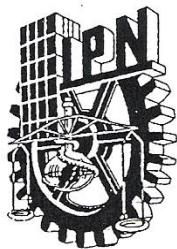
M. en C. María Guadalupe Vicencio de la Rosa

Presidente del Colegio

Lic. María Guadalupe Sánchez Martínez

Dr. José Antonio Ávila Reyes

CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
I.T.D.I.R.
UNIDAD DURANGO
I.P.N.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de **DURANGO, DGO.**, el día **26** el mes de **NOVIEMBRE** del año **2012**, la que suscribe **MARÍA GUADALUPE SÁNCHEZ MARTÍNEZ** alumna del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN GESTIÓN AMBIENTAL** con número de registro **B101086**, adscrita a **CIIDIR-IPN UNIDAD DURANGO**, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de la **DRA. MARÍA ELENA PÉREZ LÓPEZ** y de la **M. EN C. MARÍA GUADALUPE VICENCIO DE LA ROSA** y cede los derechos del trabajo intitulado **RELACIÓN ENTRE LOS NIVELES DE EUTROFIZACIÓN Y LA PRESENCIA DE ALGAS EN EL RÍO EL TUNAL Y RÍO DURANGO**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección magusa.29@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ma. Guadalupe Sánchez Mtz

MARÍA GUADALUPE SÁNCHEZ MARTÍNEZ

Nombre y firma

GRADECIMIENTOS

Agradezco a la Dra. María Elena Pérez López y al M.C. María Guadalupe Vicencio de la Rosa por la dirección del trabajo, por el conocimiento transmitido y todo el tiempo invertido durante su asesoría, su amistad y por facilitar el material y equipo para la realización de este trabajo.

A los Dres. Jesús Herrera Corral, Roberto Valencia Vázquez, así como a los M.C Margarita Araceli Ortega Chávez y Diego García Mendoza, por su revisión del trabajo, sus valiosos comentarios y aportaciones.

Agradezco a CONACyT, por el apoyo económico brindado durante mis estudios de maestría, a través de las becas otorgadas por el Programa Nacional de Posgrados de Calidad.

Al CIIDIR-DGO y su personal, por brindarme la oportunidad para realizar esta maestría.

A mi familia que siempre se han esforzado en darme lo mejor, por su afecto y apoyo en todo momento. Agradezco a mi mamá, a mi abuelita, mi hermana y a todos mis tíos y primos.

A mis amigos Maihualy, Miguel Ángel, Chepin, Gaby, Paty, Laura, Imelda, Diana y Edgar por su compañía, su apoyo, consejos y ánimo para seguir adelante.

ÍNDICE

RELACIÓN DE TABLAS	I
RELACIÓN DE FIGURAS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	¡Error! Marcador no definido.
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Contaminación en cuerpos de agua lóticos	3
2.2. Características e importancia de las algas.....	3
2.3. Algas como indicadores ambientales.....	7
2.4.1. Fósforo y Nitrógeno en los Cuerpos de Agua.....	9
2.5. Floraciones de algas	10
2.5.1. Efectos negativos en los cuerpos de agua por la floración de algas	10
2.6. Floraciones de algas tóxicas	11
2.7. Calidad del agua	14
III. JUSTIFICACIÓN	16
IV. OBJETIVO GENERAL.....	17
4.1. Objetivos específicos	17
V. MATERIALES Y MÉTODOS	18

5.1. Área de estudio	18
5.2. Sitios de muestreo	19
5.3. Muestreo y determinación de parámetros fisicoquímicos	20
5.3.1. Cuantificación de amoniaco	21
5.4. Índice de eutrofización	21
5.5. Índice de calidad del agua	22
5.6. Muestreo de algas.....	24
5.7. Análisis cualitativo de algas	25
5.8. Análisis cuantitativo de algas	25
5.9. Análisis de la información	26
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
6.1. Estado trófico de los sitios de estudio	27
6.2. Índice de Calidad del Agua (ICA)	32
6.3. Composición de los grupos de algas en los sitios de estudio	35
6.3.1. Abundancia de algas	36
6.3.2 Densidad de algas	38
6.4. Géneros de algas tóxicas pertenecientes al grupo de las <i>Cianophytas</i>	40
6.5. Relación de los grupos de algas y los parámetros fisicoquímicos	41
VII. CONCLUSIONES	46
VIII. SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES.....	48

IX. BIBLIOGRAFÍA.....	49
X. ANEXOS.....	54

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1. Características de los principales grupos de algas de agua dulce	6
Tabla 2. Grupos principales de toxinas en cianobacterias, dinoflagelados y diatomeas, indicando su estructura química, sitio y modo de acción, y algunas especies típicas.....	13
Tabla 3. Puntos de muestreo	19
Tabla 4. Valores de Ci y Pi para diferentes parámetros de calidad de agua.....	23
Tabla 5. Valores de Pi	24
Tabla 6. Clasificación y colores propuestos para presentar el ICA	24
Tabla 7. Índice de eutrofización por nutriente para cada sitio, durante el muestreo de junio del 2011	28
Tabla 8. Índice de eutrofización por nutriente para los sitios, durante el muestreo de noviembre del 2011	29
Tabla 9. Índice de eutrofización por nutriente para los sitios, durante el muestreo de abril del 2012.....	30
Tabla 10. Clasificación del ICA por sitios y muestreos.....	34
Tabla 11. Análisis de correspondencia canónica entre grupos de algas y parámetros fisicoquímicos del agua en los ríos El Tunal y Durango	42
Tabla 12. Prueba de significancia del análisis de correspondencia canónica.....	42
Tabla 13. Correlaciones canónicas de los primeros dos ejes	42

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de las algas con respecto a otros grupos de seres vivos	5
Figura 2. Puntos de muestreo	20
Figura 3. Cámara de Neubauer	26
Figura 4. Abundancia de algas durante los tres muestreos	37
Figura 5. Densidad de algas (ind/mL) por sitio y por muestreo	39
Figura 6. Géneros de algas tóxicas del grupo de las <i>Cyanophytas</i>	40
Figura 7. Gráfico de ordenación de los sitios (símbolos y números), de los grupos de algas (símbolos) y los parámetros fisicoquímicos (flechas). Las puntas de las flechas están dadas por las correlaciones de los parámetros fisicoquímicos, con los ejes. Las posiciones de los grupos de algas se dan por cambios en su abundancia debidos a las variaciones de los parámetros fisicoquímicos. Los sitios se agrupan según la similitud de dichos parámetro.....	43
Figura 8. Gráfico de la relación entre el amoníaco con las <i>Cianophytas</i> y <i>Euglenophytas</i>	45

RELACIÓN ENTRE LOS NIVELES DE EUTROFIZACIÓN Y LA PRESENCIA DE ALGAS EN EL RÍO TUNAL Y RÍO DURANGO

RESUMEN

Se evaluaron siete puntos a lo largo de los ríos El Tunal y Durango con el objetivo de determinar el grado de eutrofización del agua y su relación con los tipos de algas. Se tomaron dos muestras simples de agua del centro del cauce con un intervalo de 15 minutos entre cada una. Se analizaron aniones por cromatografía iónica (883 Basic IC Plus), pH, conductividad eléctrica y coliformes fecales (APHA, 1995) e *In situ* se midió oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno y temperatura a una profundidad de 30 cm, usando un medidor HACH HQ40d. Los niveles de eutrofización del agua fueron determinados con el índice de eutrofización por nutriente (IE) propuesto por Karidys (1983) y el índice de calidad del agua (ICA) en base a la ecuación propuesta por Pesce y Wunderlin (2000). Las muestras de algas se obtuvieron de diferentes profundidades y sustratos, se preservaron en una solución ácida de lugol, posteriormente se realizó el análisis cualitativo y cuantitativo para identificar los grupos de algas y su abundancia. La relación entre los grupos de algas y los parámetros fisicoquímicos evaluados se determinó con un análisis de correspondencia canónica (CCA).

Los resultados mostraron que el agua en El Arenal, puente El Tunal, La Punta y puente San Carlos presentaron problemas de mesotrófia y eutrofización; El ICA corroboró que La Punta y el puente San Carlos son los sitios menos aptos para el desarrollo de la vida acuática. La composición de algas encontrada en los ríos estuvo formada principalmente por el grupo de las *Bacillariophytas*, seguidas por las *Cyanophytas*, *Chlorophytas*, *Euglenophytas* y *Cryptophytas* y dentro del grupo de *Cyanophytas* se encontraron seis géneros productores de toxinas. La densidad de algas en promedio fue de 210,268 ind/mL, con un mínimo de 10,000 ind/mL y un máximo de 1,007,500 ind/mL, con una densidad de algas mayor en los sitios mesotróficos y eutróficos. En cuanto al CCA, las *Cyanophytas* y *Euglenophytas* se relacionaron con cantidades altas de fosfatos y amoníaco encontradas en el puente San Carlos, en tanto que las *Chlorophytas* respondieron al cambio de temperatura, siendo más abundantes en los sitios con temperatura más alta y las *Cryptophytas* respondieron al aumento de pH; las *Bacillariophytas* se comportaron como un grupo generalista o poco sensible a los cambios fisicoquímicos. En conclusión los tramos del Río EL Tunal que reciben descargas de aguas residuales de la ciudad de Durango o de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) presentan problemas de mesotrófia o eutrofia y por tanto un deterioro de la calidad del agua, causando cambios en la comunidad algal. Los seis géneros tóxicos de *Cyanophytas* y las altas densidades de estas pueden representar un peligro para la fauna y la salud humana que utilizan los ríos como proveedor de agua, principalmente cuando se presenten condiciones de eutrofización.

Palabras clave: Eutrofización, calidad de agua y algas, índices de calidad de agua, Durango

RELATIONSHIP BETWEEN LEVELS OF EUTROPHICATION AND THE PRESENCE OF ALGAE IN TUNAL RIVER AND DURANGO RIVER

ABSTRACT

I evaluated seven points through the rivers El Tunal and Durango with the objective to determine the grade of eutrophication of water and the relation of groups of algae with the level of eutrophication. I took two simple samples of water from the center of the channel with a interval of 15 minutes between each sample. I measured anions by ion chromatography (883 Basic IC Plus), pH, electrical conductivity and fecal coliforms (APHA, 1995) and in situ was measured dissolved oxygen, percent saturation of oxygen and temperature to a depth of 30 cm, using a HACH HQ40d meter. The water eutrophication levels were determined with eutrophication by nutrient index (EI) proposed by Karidys (1983) and the water quality index (ICA) based on the equation proposed by Pesce and Wunderlin (2000). Algal samples were collected from different depths and substrates the algal samples were preserved in an acid solution of Lugol, the were performed the qualitative and quantitative analysis to identify groups of algae and its abundance. The relationship between algal groups and physicochemical parameters evaluated were determined with a canonical correspondence analysis (CCA).

El Arenal, puente El Tunal, La Punta and puente San Carlos presented mesotrophia problems and eutrophication. The ICA corroborated that La Punta and puente San Carlos were less suitable sites for the development of aquatic life. The composition of algae was formed mainly of *Bacillariophytas* group, followed by *Cyanophytas*, *Chlorophytas*, *Euglenophytas* and *Cryptophytas* and within the *Cyanophytas* group were found six genera producers of toxins. The average density of algae was 210,268 ind/mL, with a minimum of 10.000 ind/mL and a maximum of 1,007,500 ind/mL, with a density of algae higher mesotrophic and eutrophic sites. As for the CCA, the *Euglenophytas* and *Cyanophytas* were associated with high amounts of phosphates and ammonia, while the *Chlorophytas* responded to temperature change were more abundant at sites with higher temperature and *Cryptophytas* responded to higher pH, the *Bacillariophytas* behaved as a generalist group or a little sensitive to physicochemical changes. In conclusion the river El Tunal through the city of Durango or the PTAR receives wastewater discharges from the city has mesotrofia or eutrophication problems and therefore a deterioration of water quality, which is reflected in the composition of the algal community, that responsive to these changes. The six genders of *Cyanophytas* toxic and high densities of these may represent a hazard to human health and wildlife that use the river as a water supplier, especially when there are conditions of eutrophication.

Key words: Eutrophication, water quality and algae, water quality index, Durango

I. INTRODUCCIÓN

El agua limpia es un recurso crucial para todo tipo de actividad antropogénica y para el paisaje en general. Desde siempre los humanos han vivido y se han desarrollado cerca de los cursos de agua, usándolos también para tirar sus desechos. Lo cual se ha visto que con el crecimiento de la población, esta costumbre ha sobrecargado la capacidad de depuración de las aguas, provocando la contaminación de la mayoría de los ríos, lagos y costas (Carpenter, *et al.*, 1998).

A nivel mundial, el deterioro más común de las aguas superficiales es la eutrofización causada por el excesivo ingreso de fósforo y nitrógeno proveniente de la degradación de la materia orgánica de los desechos vertidos en ellas y/o de las escorrentías de zonas agropecuarias, lo cual tiene varios efectos negativos sobre los ecosistemas acuáticos, quizás la consecuencia más visible sea la proliferación de algas y macrófitas (plantas acuáticas) cuya presencia degrada la calidad del agua e interfiere con el uso de la misma para pesca, recreación, industria, agricultura y bebida (Fontúrbel, 2005).

En aguas dulces, los florecimientos de cianobacterias (algas verde-azules) son un síntoma prominente de eutrofización. Estos florecimientos contribuyen a un amplio rango de problemas que incluyen la muerte de peces en verano, mal olor y mal sabor en el agua de beber. Además producen compuestos solubles tóxicos para el sistema nervioso y el hígado, que son liberados cuando éstas mueren o son ingeridas. Estos compuestos pueden matar al ganado y constituir un serio peligro para la salud humana (Carpenter, *et al.*, 1998).

El desarrollo de estos organismos provoca opacidad, que impide que la luz penetre hasta regiones profundas de la columna de agua, impidiendo que se lleve a cabo la fotosíntesis en lugares cada vez menos profundos y por lo tanto, disminución en la producción de oxígeno libre; simultáneamente aumenta la actividad metabólica consumidora de oxígeno de los organismos descomponedores, que empiezan a recibir excedentes de materia orgánica generados en la superficie.

Lo anterior hace que el fondo del ecosistema acuático se vaya convirtiendo gradualmente en un ambiente anaerobio, con el consecuente aumento en la generación de gases como anhídrido sulfuroso (H_2S), metano (CH_4) y anhídrido carbónico (CO_2), haciendo poco factible la vida de la mayoría de las especies y provocando mortandad de la biota en general, así como bioacumulación de sustancias tóxicas, aumentando la sedimentación en los cuerpos de agua, proliferación de organismos patógenos y vectores de enfermedad (Moreno, *et al.*, 2010).

El Río El Tunal que pasa a un lado de la mancha urbana de la Ciudad de Durango, no está exento de estos problemas, donde la calidad del agua superficial del río se ha visto afectada por el vertido de agua residual industrial y/o doméstica y del agua tratada de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Oriente (PTAR) que no cumple con las características fisicoquímicas y microbiológicas requeridas por la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Pérez, *et al.*, 2006).

Dicho río cambia de nombre por el de Río Durango cuando entra al municipio de Nombre de Dios, en el cual persiste el problema de calidad generado aguas arriba. Además, estos ríos pasan por zonas rurales con actividades: agrícolas, de ganadería y de recreación, por lo que son susceptibles a la eutrofización, presentándose algunos tramos ya con este problema.

Por consiguiente en este trabajo se evaluaron algunos sitios de los ríos El Tunal y Durango, donde se determinó el grado de eutrofización y su relación con los tipos de algas, para con ello establecer el riesgo que existe para las personas y fauna en general, principalmente por la presencia de grupos tóxicos como las cianobacterias.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Contaminación en cuerpos de agua lóticos

Dentro de las aguas continentales, los ríos son ambientes con características que los hacen ser dinámicos ya que son sistemas abiertos, cambiantes a lo largo del tiempo y de su curso, sometidos a la influencia del clima y a las características de la cuenca. Los ríos se definen como sistemas lóticos por tener un flujo unidireccional de agua dentro de un canal y poseen una gran heterogeneidad espacial y temporal, lo que brinda a los organismos que habitan en ellos, un gran número de microambientes susceptibles de ser colonizados (Bojorge, *et al.*, 2007; Castañe, *et al.*, 1998).

El funcionamiento de los ríos y de otros tipos de sistemas acuáticos se ve afectado por la contaminación de sustancias orgánicas o inorgánicas, provocando una serie de modificaciones fisicoquímicas en el agua, lo que repercute en la composición y distribución de las comunidades. La magnitud de los cambios en los organismos va a depender del tiempo que dure la perturbación en el sistema acuático, su intensidad y su naturaleza (Ospina, *et al.*, 2004).

A través de distintos estudios realizados por ficólogos y limnólogos en este tipo de flora (Sabater, 2005; Aboal, 2005; Kelly, 2005; Lindstrom, 2005; Blanco 2005), se sabe que los cambios en las comunidades algales “delatan” el inicio de contaminación que pueda existir en un sistema acuático, lo cual se refleja en las modificaciones de la estructura poblacional y en la proliferación de especies asociadas a determinados aportes (Luján, 2000).

2.2. Características e importancia de las algas

Integran la comunidad de algas, organismos muy antiguos que prácticamente habitan en todos los ecosistemas del planeta, presentando amplia gama de tamaños, formas, estructura celular y estrategias ecológicas y fisiológicas (González, 1987; Cabioc'h, *et al.*, 1995; Peña, *et al.*, 2005).

Etcheverry (1986) y Peña, *et al.* (2005) mencionan que a pesar de la gran heterogeneidad de algas, éstas poseen las siguientes características que las identifican como grupo:

1. Su organización morfológica carece de un transporte vascular organizado de los materiales elaborados mediante el metabolismo, no presentan diferenciación de raíz, tallo y hojas características de las plantas superiores
2. No desarrollan embrión.
3. Son organismos autótrofos, porque pueden transformar en materia orgánica, los compuestos inorgánicos que toman del medio, a través del proceso fotosintético

El término *Algae*, está desprovisto de significado taxonómico y no corresponde a ninguna nomenclatura. Es simplemente un término colectivo para un grupo de organismos extremadamente heterogéneo (Parra, 2006) (figura 1).

El grupo de algas se divide a su vez en más de una docena de grupos, división basada principalmente en los siguientes criterios: pigmentos fotosintetizadores, estructura del cloroplasto, naturaleza química de la pared celular, naturaleza química y almacenamiento de los productos de reserva, características asociadas al aparato flagelar y características citológicas (Parra, 2006), (tabla 1).

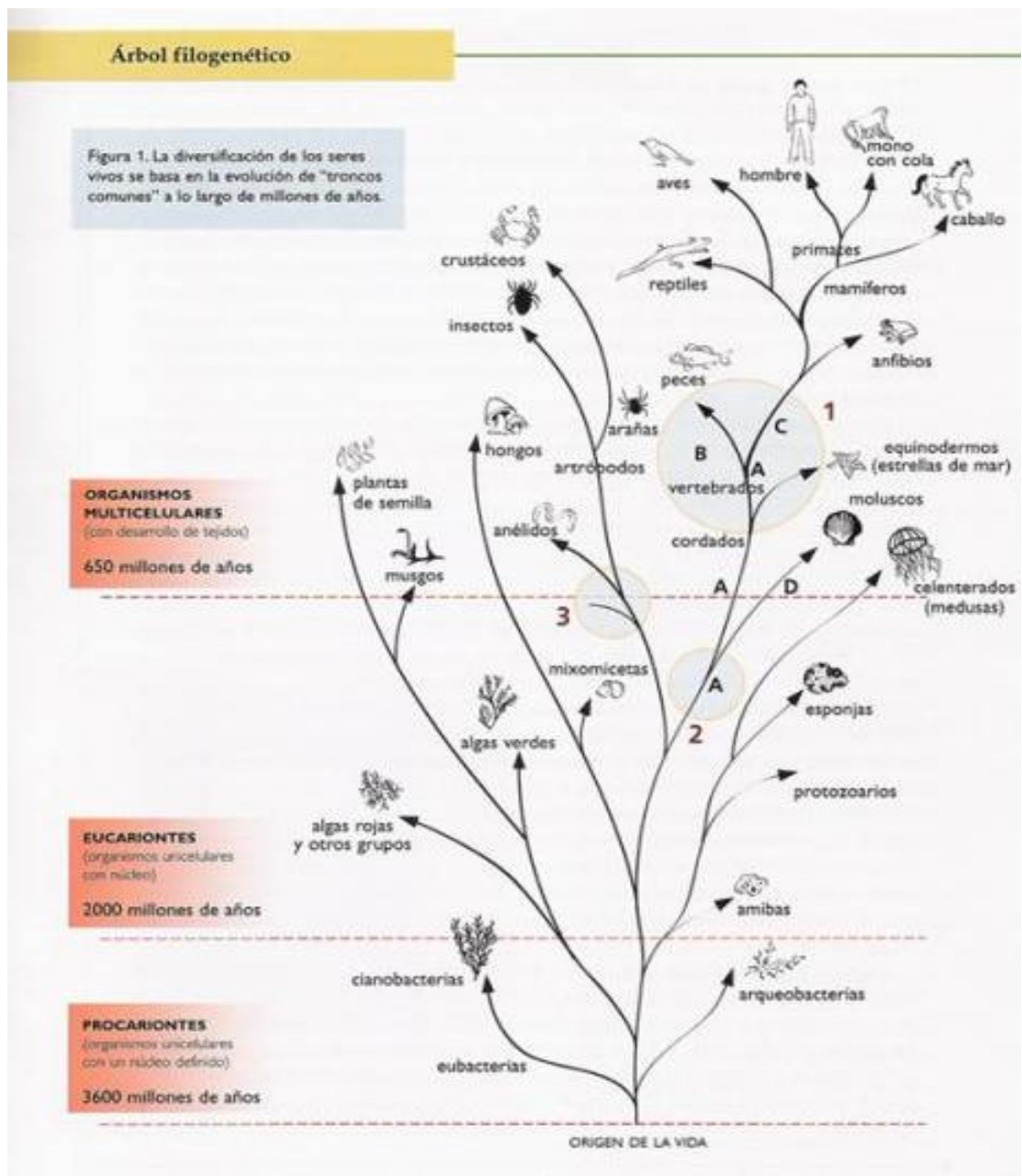


Figura 1. Ubicación de las algas con respecto a otros grupos de seres vivos

Tabla 1. Características de los principales grupos de algas de agua dulce

Grupos	Pigmentos dominantes	Pared celular	Hábitats	N°. Aproximado de especies	Importancia ecológica
Cyanobacteria	Chla, ficobilinas	peptidoglycano	Aguas oligotróficas y eutróficas, resiste ambientes hostiles	1,200-5,000	Algunas fijan nitrógeno, algunas tóxicas, ocasionan floraciones en la superficie de lagos ricos en nutrientes
Rhodophyceae (algas rojas)	Chla, ficobilinas	celulosa	Aguas dulces y ambientes marinos	1,500-5,000	Grupo raro en agua dulce excepto <i>Batrachospermum</i>
Chrysophyceae	Chla, Chlc, carotenoides	crisolaminarina	Aguas dulces, templadas, plantónicas	300-1,000	<i>Dinobryon</i> domina en el plancton
Bacillariophyceae (diatomeas)	Chla, Chlc, carotenoides	Frustulo de sílice	Plancton y bentos	5,000-12,000	Principales productores primarios en agua dulces
Dynophyceae	Chla, Chlc, carotenoide	celulosa	Principalmente plantónico	230-1,200	Algunas tóxicas, fagotróficas, involucrados en muchas interacciones simbióticas
Euglenophyceae	Chla, chl _b	Proteína	comunes en aguas eutróficas y asociadas a sedimentos	400-1,000	Algunas especies son fagotróficas, son indicadoras de aguas eutróficas
Chlorophyceae (algas verdes)	Chla, chl _b	Desvainadas, celulosa o calcificadas	Aguas oligotróficas y eutróficas, plantónicas y bentónicas	6,500-20,000	Morfología muy variable, importantes productores primarios, en ríos generalmente son especies filamentosas y en el plancton especies unicelulares
Charophyceae	Chla, chl _b	Celulosa, muchas calcificadas	Bentónicas y en aguas que fluyen lentamente	315	Forman depósitos calcáreos

Fuente: South y Whittick (1987) y Vymazal (1995)

Una de las características más importantes de las algas es su capacidad depuradora del medio ambiente ya que a través del proceso de fotosíntesis incorporan oxígeno al medio acuático donde viven, contribuyendo de esta manera a la oxidación de la materia orgánica, también constituyen la base de las cadenas tróficas y son la entrada de energía a los ecosistemas acuáticos (Luján, 2000).

En los cuerpos de agua las algas se pueden encontrar en suspensión integrando comunidades fitoplanctónicas o adheridas a un sustrato conformando comunidades fitobentónicas (Ramírez, *et al.*, 2000; Parra, 2006; Bellinger, *et al.*, 2010).

2.3. Algas como indicadores ambientales

Las algas tienen ciclos de vida cortos que las hacen indicadoras adecuadas para impactos a corto plazo; los hábitos de fijación de la mayoría de las especies hacen que sean afectadas directamente por los cambios físicos y químicos en la columna del agua; por ser productores primarios, son sensibles a contaminantes que no tienen efecto sobre organismos heterótrofos y además son fácil de muestrear (Peña, 2005).

Estos organismos responden por lo general a los impactos antropogénicos, como exceso de nutrientes que desencadenan el fenómeno de la eutrofización, por lo cual las algas han sido usadas ampliamente como indicador del estado trófico, así como en la detección y seguimiento de presiones debidas a:

- Contaminación térmica.
- Cambios en la mineralización del agua en la composición de los iones mayoritarios disueltos.
- Altas concentraciones de sílice y otros cationes, por ejemplo el hierro.
- Contaminación orgánica que puede ser soluble o en partículas.
- Es indicador de las presiones hidromorfológicas que determinan cambios en la tasa de renovación de lagos y embalses.
- Salinidad

- Acidificación
- Contaminación por metales pesados

(Marco del agua en la Confederación hidrográfica del Ebro, 2005)

2.4. Eutrofización

Las algas responden a la eutrofización cuyo proceso ocurre en los cuerpos de agua donde se produce un enriquecimiento con nutrientes, lo que conlleva a un incremento de la biomasa vegetal, provocando un deterioro de la calidad del agua e interfiriendo con el uso de la misma.

El vocablo eutrofización está formado por las raíces griegas *EU*: bien, bueno y *TROFÉ*: alimentación, nutrición; por lo que su significado literal es “resultado o efecto de una buena alimentación”. La eutrofización se consideraba un proceso natural de envejecimiento por el cual los lagos cálidos poco profundos evolucionaban a tierras secas. Sin embargo, este término se utilizó posteriormente para definir el fenómeno provocado por los vertidos de los desechos de actividades humanas, llamándolo: *Proceso de eutrofización cultural o simplemente eutrofización* (Aranda, 2004; Moreno, *et al.*, 2010).

Se reconocen tres clases de cuerpos de agua según su grado de enriquecimiento de nutrientes (estado trófico) y materia orgánica: oligotróficos, mesotróficos y eutróficos. Los cuerpos de agua oligotróficos son insuficientes en cuanto a nutrientes; tienen niveles bajos de algas, micrófitas y materia orgánica; buena transparencia y oxígeno abundante. Los cuerpos de agua eutróficos son ricos en nutrientes; tienen niveles altos de algas, macrófitas y materia orgánica; poca transparencia, y a menudo falta el oxígeno en el hipolimnion (zona profunda de temperatura más fría). Los lagos mesotróficos presentan características intermedias, muchas veces con abundancia de peces porque tienen niveles elevados de producción de materia orgánica y suministro adecuado de oxígeno (Mihelcic, *et al.*, 2001).

En condiciones de oligotrofia a mesotrófia existe un equilibrio en donde todos los aportes de masa y nutrientes inorgánicos son procesados completamente,

impidiendo la acumulación de biomasa en descomposición. Cuando las actividades humanas aportan nutrientes en exceso, la secuencia de eventos se dinamiza y la fase de crecimiento y mortalidad de la biomasa superan la capacidad de remineralización (UNESCO, 2009).

La principal causa que desencadena el pasaje de un estado oligotrófico a uno eutrófico es el aporte de una carga de fósforo y/o nitrógeno en una tasa mayor a la que el sistema acuático puede procesar, esta entrada de nutrientes se debe en su mayoría a la descarga directa de las aguas residuales crudas o parcialmente tratadas, desechos urbanos, industriales y agrícolas, así como la deforestación (Aranda, 2004).

2.4.1. Fósforo y Nitrógeno en los Cuerpos de Agua

Por lo general, se suele encontrar en el agua proporciones estables de nutrientes, es decir, que por cada unidad de fósforo, existen quince unidades de nitrógeno disponibles y cien unidades de carbono en el medio, por lo que el fósforo se constituye como el elemento limitante en los procesos de producción primaria (Chávez, 2007).

El fósforo (P) puede estar presente en forma de orto-fosfatos (PO_4^{-3}) y fósforo orgánico. Los fosfatos son usados por plantas acuáticas, principalmente el fitoplancton que lo obtiene cuando los sistemas celulares de incorporación del nutriente se activan y el PO_4^{-3} disponible es rápidamente utilizado por los organismos. Como resultado, la concentración de PO_4^{-3} ambiental decrece hasta un nivel estacionario, llamado valor umbral. La incorporación y el crecimiento posterior es posible solo si la concentración ambiental de PO_4^{-3} excede este valor umbral. (UNESCO, 2009).

El nitrógeno puede ser obtenido del agua a través de la incorporación activa como amonio (NH_4^+), nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-) (Nitrógeno inorgánico disuelto, NID). La oxidación del ion amonio a nitritos y nitratos se efectúa por la acción de bacterias autótrofas, nitrosomonas y nitrobacterias, que dependiendo de la fuente de nitrógeno

la asimilación requiere de varias etapas para reducirlo, por lo tanto, el NH_4^+ es la fuente de nitrógeno energéticamente menos costosa de asimilar por las algas (Camargo, 2007).

El nitrógeno es más móvil que el fósforo y puede ser lavado a través del suelo, irse a la atmósfera por evaporación del amoníaco o desnitrificación y también puede ser extraído de la ambiente por determinados microorganismos. El fósforo es absorbido con más facilidad por las partículas del suelo y es arrastrado por la erosión o disuelto por las aguas de escorrentía superficiales (Mihelcic, *et al.*, 2001).

2.5. Floraciones de algas

Una de las respuestas inmediatas y evidentes de la eutrofización son las floraciones algales, las cuales se dan por la multiplicación y acumulación de diversas especies pertenecientes a las Clases *Bacillariophyceae* (diatomeas), *Chlorophyceae* (algas verdes), *Dinophyceae* (dinoflagelados), *Chrysophyceae*, *Cryptophyceae* o *Cyanophyceae* (cianobacterias) (De León, 2002; De León, 2005).

En general las cianobacterias suelen ser las más frecuentes y en mayor cantidad en medios eutróficos ya que son capaces de fijar nitrógeno atmosférico y/o de regular su flotabilidad mediante vacuolas de gas, lo que les brindan ventajas para dominar el fitoplancton y desplazar a las algas eucariotas. Además algunas especies de cianobacterias son tóxicas (UNESCO, 2009).

2.5.1. Efectos negativos en los cuerpos de agua por la floración de algas

- Reducción de oxígeno por el incremento de la actividad bacteriana durante la degradación de la materia orgánica de las algas muertas.
- Anoxia (ausencia de oxígeno) en los niveles más profundos del sistema acuático, lo que ocasiona la muerte de peces, especialmente de los que viven próximos al sedimento.
- Olor y sabor desagradable del agua y de los productos acuáticos, debido a la producción de compuestos volátiles generados por las cianobacterias y

hongos o de ácido sulfhídrico (H_2S) generado por bacterias reductoras del sulfato en condiciones de anoxia y liberado al medio.

- Colmatación de las agallas de los peces debido al incremento de microalgas, que impiden el intercambio gaseoso.
- Intoxicación directa o indirectamente, a los organismos a través de la cadena trófica (Carpenter, *et al.*, 1998).

2.6. Floraciones de algas tóxicas

Entre los principales grupos de algas tóxicas que se presentan cuando ocurre una floración están las cianobacterias, dinoflagelados y diatomeas.

Los dinoflagelados o algas marrón-rojizas, son más abundantes y diversos en estuarios y ecosistemas costeros que en los ecosistemas continentales, este tipo de algas son las causantes de las mareas rojas. Diatomeas o algas silíceas, son abundantes y diversas en el medio marino, pero también pueden serlo en el medio acuático continental; varias especies del género *Pseudo-nitzschia* han estado implicadas en procesos de toxicidad para algunos animales marinos (Camargo, *et al.*, 2006; Camargo, 2007).

Las cianobacterias o algas verde-azuladas, son organismos ampliamente distribuidos a nivel mundial, generalmente suelen ser el grupo con mayor abundancia y diversidad en los ecosistemas acuáticos límnicos que en los estuarios y costeros.

A nivel mundial, estiman que más del 50 % de las floraciones de cianobacterias de aguas continentales, son tóxicas, ya que algunas especies producen cianotoxinas. Básicamente estos compuestos tienen acción neurotóxica, dermatotóxica, gastrotóxica y hepatotóxica, que en el hombre pueden causar desde ligeros malestares digestivos hasta muerte por asfixia o deshidratación, los efectos van a depender de la especie dominante en la floración, su nivel de toxicidad, el tipo de toxina, el grado de exposición a la toxina y las características del organismo afectado (Roset, *et al.*, 2001).

Los registros más frecuentes de intoxicaciones por cianotoxinas están relacionados con animales domésticos o silvestres. El riesgo mayor esta con la ingestión de dosis bajas (subletales) de microcystina durante un tiempo prolongado, porque promueve el desarrollo de enfermedades hepáticas crónicas a mediano y largo plazo, o causan malestares hepáticos y digestivos a corto plazo. Esta forma de ingestión puede darse, por ejemplo, disuelta en el agua potable o con tratamientos insuficientes para eliminar la toxina (De León, 2005; Ruibal, *et al.*, 2005).

Los riesgos por contacto con aguas de recreación que contengan estas toxinas se manifiestan con irritación dérmica y/o síntomas gastrointestinales (nauseas, vómitos), en casos más graves se reporta internación y asistencia intensiva debido a neumonía.

Los niveles de toxicidad varían para la misma especie y durante una floración, aún se desconoce con precisión el factor que desencadena la síntesis de toxinas. Ésta se atribuye a la temperatura, la luz, la estabilidad de la columna de agua y al pH, sin descartar otros factores ambientales y biológicos (UNESCO, 2009, González, 1987). En la tabla 2 se muestran los principales grupos de toxinas que producen las cianobacterias, dinoflagelados y diatomeas.

Tabla 2. Grupos principales de toxinas en cianobacterias, dinoflagelados y diatomeas, indicando su estructura química, sitio y modo de acción, y algunas especies típicas

Toxinas	Sitio y modo de acción	Especies
Neurotóxicas		
a) Anatoxina –a	Mimetiza la acetilcolina, sobre-estimulando las células musculares.	<i>Anabaenaflos-aquae</i> <i>Aphanizomenonflos-aquae</i>
b) Anatoxinas –b (s)	Inhibe la acetilcolinesterasa, sobre-estimulando las células musculares.	<i>Anabaenaflos-aquae</i> <i>Anabaenalemmermannii</i>
c) Brevetoxinas	Se traban en los canales del sodio y alteran la conducción del impulso nervioso.	<i>Karenia brevis</i> <i>Pseudo-nitzschia multiseries</i>
d) Ácido domoico	Se une a ciertos receptores, causando la despolarización y muerte de neuronas.	<i>Pseudo-nitzschia seriata</i>
Otras toxinas		
Hemolisinas	Perturban la estructura de las membranas, causando la lisis celular.	<i>Alexandrium monilatum</i> <i>Gymnodinium aureolum</i>
Microcistinas	- Hígado, hepato-páncreas - Alteran el citoesqueleto, deformando las células y causando hemorragias.	<i>Nodularia spumigena</i>
Saxitoxinas	Se traban en los canales del sodio, y alteran la conducción del impulso nervioso	<i>Alexandrium tamarense</i> <i>Gymnodinium catenatum</i>

Fuente: Adaptado de Camargo y Alonso, 2006

Los factores que desencadenan las floraciones de algas son diversos y actúan en forma combinada. Entre los procesos asociados a actividades humanas que ocasionan la eutrofización y por consiguiente floraciones de algas son:

- Los aportes puntuales, provenientes de aguas residuales domésticas o industriales no tratadas, que son vertidas directa o indirectamente a los sistemas acuáticos.
- Los aportes difusos provenientes de aguas de escorrentía debido al lavado de suelos de áreas cultivadas y fertilizadas, de suelos deforestados o de campos con ganadería (ya sea extensiva, ambos, etc.).

- La aridez de regiones próximas o dentro de la cuenca hidrográfica, o los efectos similares debidos a suelos sin vegetación.
- El manejo de los flujos de salida (manejo de las compuertas de las represas) mediante el cual es posible regular el tiempo de residencia del agua en los embalses.

Los factores físicos y biológicos también tienen una influencia en la composición y abundancia de algas y dependen de lo siguiente elementos (Marco del agua en la Confederación hidrográfica del Ebro, 2005):

- Condiciones físicas e hidrológicas: luz, temperatura, turbulencia/estabilidad del agua, tiempo de residencia del agua y tasa de sedimentación del plancton.
- Composición química del agua: nutrientes y materia orgánica, mineralización (compuestos de proporcionalidad constante) y pH, oligoelementos, etc.
- Factores biológicos: Depredación por parte de filtradores planctófagos (zooplancton y peces) y relaciones entre especies (efectos alelopáticos y toxicidad inducida por algunas especies). Parasitismo fúngico: infecciones por parte de hongos y cromistas heterótrofos flagelados capaces de reducir densas poblaciones fitoplactónicas.

2.7. Calidad del agua

Como se mencionó anteriormente, la eutrofización y el consiguiente aumento de algas y macrófitas impactan negativamente la calidad del agua. Definir la calidad del agua significa ir más allá de sus atributos fisicoquímicos o biológicos; implica tomar en cuenta el contexto ecológico, así como los usos y valores que la sociedad les otorga (Aguilar, 2010).

Los parámetros de mayor manejo para evaluar la calidad del agua son: alcalinidad, cloruros, coliformes fecales, color, conductividad, surfactantes, dureza, pH, sólidos suspendidos totales, fosfatos, grasas y aceites, nitrógeno amoniacal y nitratos, DBO₅, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos, metales pesados y turbidez (Aguilar, 2010).

La información aportada por los parámetros evaluados suele presentarse mediante índices que tienen como propósito englobar en una expresión numérica las características positivas o negativas de una fuente de agua. Su ejercicio es una práctica común por la simplicidad de entregar la información y son fáciles de comprender por todos, además permite identificar tendencias y evaluar los cambios en la calidad de las aguas (Pérez, *et al.*, 2008).

Los índices de Calidad de Aguas (ICA), basados en variables físico-químicas se han propuesto desde hace varias décadas. Los ICA, generalmente consisten en subíndices o puntajes asignados a cada variable, los cuales son comparados con una curva de rango (usualmente 0-100 %), opcionalmente a cada variable se le asigna un peso de acuerdo a su importancia como indicador en la calidad del agua y en función del uso que se le dé al agua (Figueroa, 2004).

A pesar de su utilidad son criticados porque la información generada puede quedar enmascarada y los límites de las categorías por fuerza son arbitrarios y dan una falsa impresión de una situación verdadera, otra crítica es que los sistemas son propensos a la subjetividad, porque además, se incluyen sólo algunas de las variables monitoreadas (Salusso, 2005).

El uso de determinaciones físicas y químicas ha sido el método más clásico para evaluar la entrada, distribución y dispersión de contaminantes en los ambientes acuáticos. También se emplean índices bióticos en el sentido que los cambios en la estructura comunitaria, o la presencia/ausencia de especies indicadoras, expresan un efecto actual o pasado sobre el sistema (De la Lanza, 2000; Figueroa 2004).

III. JUSTIFICACIÓN

El Río Tunal y el Río Durango son dañados por descargas de agua residuales, domésticas, escorrentías agrícolas, residuos sólidos y la pérdida de cobertura vegetal, ocasionadas por una infraestructura de saneamiento y sistemas de tratamiento inadecuados, provocando que algunos tramos de dichos ríos tengan una carga excesiva de nutrientes y un incremento en la producción de algas, entre las cuales algunas pueden ser tóxicas y con ello impactar la calidad del agua y los organismos que dependen de ella.

Por lo que es importante evaluar tramos de los ríos El Tunal y Durango que sean vulnerables a este problema para establecer su estado trófico y su relación con la proliferación de algas, ya que hasta el momento no se han realizado estudios de este tipo en Durango y se desconoce el grado de afectación de nuestros ríos. Además con la identificación de los grupos de algas presentes se podrá determinar cuáles son tóxicas y con ello tomar medidas preventivas para evitar intoxicaciones y daños al ecosistema.

El análisis de la calidad del agua en Durango por medio de bioindicadores como las algas, facilitaría el monitoreo de los cuerpos de agua, ya que estos estudios son fáciles de implementar y de menor costo en comparación con los análisis químicos o toxicológicos.

IV. OBJETIVO GENERAL

Determinar la relación entre los niveles de eutrofización y la composición de grupos de algas en el Río Tunal y Río Durango.

4.1. Objetivos específicos

1. Medir la concentración de fósforo, amoníaco y nitratos presentes en sitios de los ríos El Tunal y Durango para establecer su estado trófico.
2. Identificar los grupos de algas que se encuentran en estos ríos y determinar que especies son tóxicas.
3. Correlacionar las variables asociadas a la eutrofización con los grupos y la cantidad de algas en los ríos Tunal y Durango

V. MATERIALES Y MÉTODOS

Se revisaron en tres ocasiones, siete sitios; uno en el canal Acequia Grande, otro en el río Durango y cinco más sobre el río El Tunal, en cada momento se tomaron dos muestras de agua con un intervalo de 15 minutos entre ellas y se les revisaron *in situ*: OD, pH, temperatura ambiente y del agua, en el laboratorio: valores de pH y conductividad, compuestos amoniacales, nitratos y fosfatos, con ello se establecieron índices de calidad para los niveles tróficos (IE) y un índice de calidad del agua general (ICA), los cuales se relacionaron con los grupos algales presentes.

5.1. Área de estudio

La zona de estudio corresponde al Río El Tunal y Río Durango que forman parte de la cuenca San Pedro-Mezquital, dentro de la región hidrológica No. 11 Presidio- San Pedro y en la subregión San Pedro. La cuenca comprende ocho subcuencas de diferentes extensiones (Las de los ríos: La Sauceda, Poanas, Súchil, Graceros, Mezquital, San Pedro y Tunal-Santiago, el arroyo Durango y la cuenca endorreica Laguna de Santiaguillo), ocupando el 92% de la superficie municipal, el clima que predomina en los lugares por los que atraviesan estos ríos es seco y la precipitación media anual es de 300 mm al año (CNA, 2005).

El Río El Tunal atraviesa el municipio de Durango y se alimenta de tres vertientes principales: La Sauceda, Santiago Bayacora, y El Tunal, donde las dos primeras se reúnen con la tercera en un solo cauce para luego avanzar algunos kilómetros más e ingresar al municipio de Nombre de Dios, donde cambia de nombre por el de Río Durango; también llamado Mezquital cuando llega al municipio de ese nombre, para finalmente llamarlo San Pedro en el estado de Nayarit, antes de su desembocadura en la Laguna Brava de la Costa del Pacífico, las aguas superficiales provenientes de esta cuenca abastecen al municipio de Durango, donde son aprovechadas principalmente en la actividad agrícola a través de los módulos de riego del Distrito 052 (Ordenamiento Ecológico del Territorio del Municipio de Durango, 2005).

5.2. Sitios de muestreo

En este trabajo se eligieron siete puntos a lo largo de la trayectoria del Río El Tunal y Río Durango, de acuerdo a trabajos previos de calidad de agua donde no hubo cambios estadísticamente significativos en el tiempo y en algunos espacios que atraviesan la ciudad de Durango en proceso de eutrofización, lo que permitió considerar que los vertidos a estos ríos son puntuales y constantes (Pérez *et al.*, 2012), por lo que era necesario e importante monitorear la evolución de los sitios. En el tabla 3 se muestran las coordenadas geográfica de los sitios de muestreo y en la figura 2 su ubicación a lo largo de la trayectoria del río.

Tabla 3. Puntos de muestreo

Sitio	Río	Coordenadas geográficas	
		LONG	LAT
El Pueblito	El Tunal	104.733903	23.962447
La Ferrería	El Tunal	104.665344	23.959232
Puente San Carlos	El Tunal	104.532996	24.057019
Puente El Tunal	El Tunal	104.313856	24.053768
El Arenal	El Tunal	104.427602	24.043324
La punta	El Tunal	104.348286	24.046434
El Saltito	Durango	104.313856	23.941061

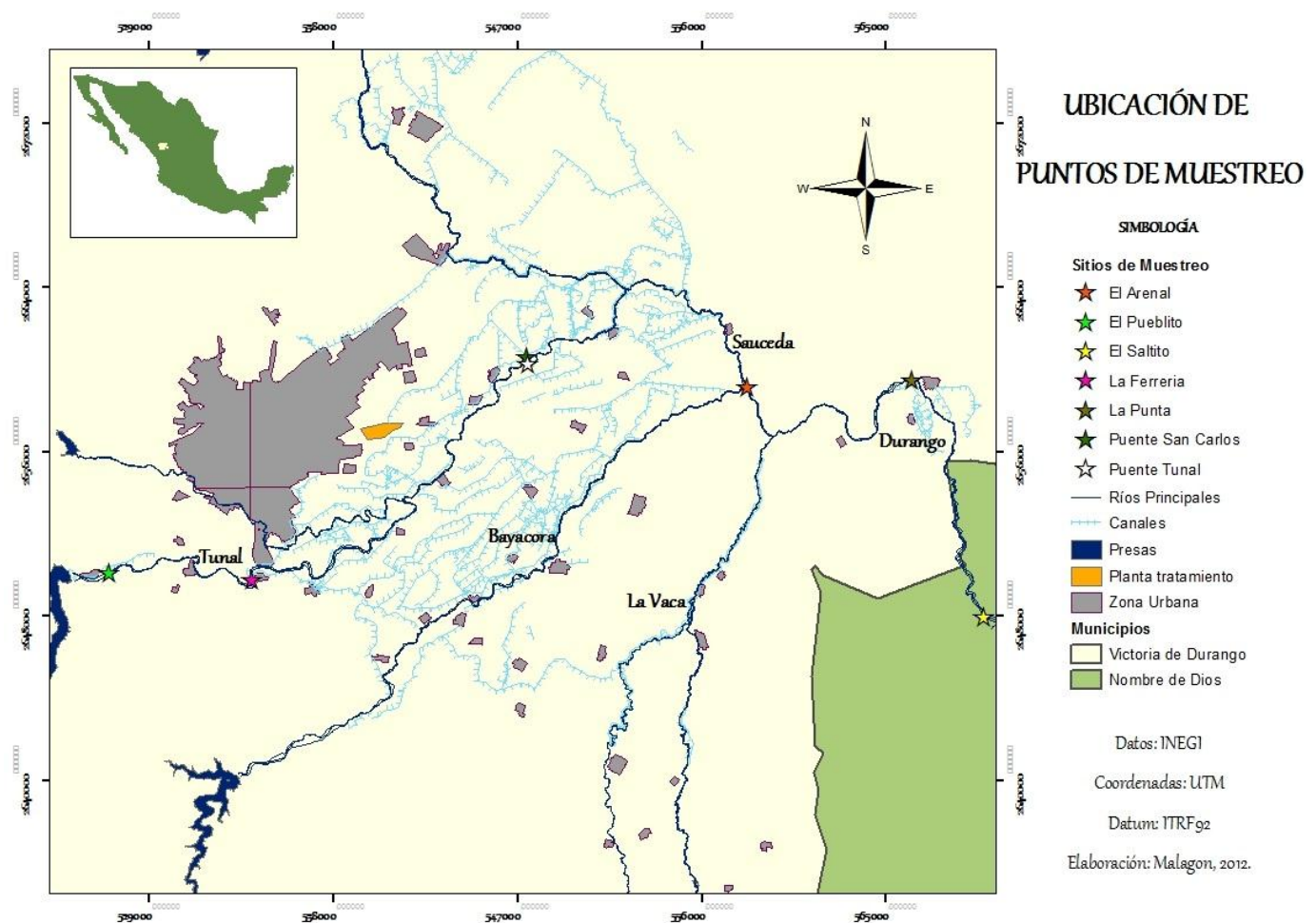


Figura 2. Puntos de muestreo

5.3. Muestreo y determinación de parámetros fisicoquímicos

Los parámetros seleccionados para determinar el estado trófico de los sitios de estudio fueron: nitratos, amoníaco y fósforo, ya que estos compuestos pueden desencadenar el proceso de eutrofización y son esenciales en el desarrollo de biomasa vegetal en los cuerpos de agua.

Se realizaron tres muestreos, el primero en junio del 2011, el segundo en noviembre del 2011 y el tercero en abril del 2012. En cada sitio se tomaron dos muestras simples de agua del centro del río en frascos de plástico de 1L, previamente ambientados con agua del cauce, con un intervalo de tiempo de 15 minutos entre cada una. Para la determinación de amoníaco las muestras se tomaron por separado

en frascos de medio litro y se fijaron con un mililitro de ácido sulfúrico. Las muestras fueron transportadas al laboratorio en hieleras.

Adicionalmente en cada uno de los puntos de muestreo se midió la temperatura, oxígeno disuelto (OD), pH, conductividad y porcentaje de saturación de oxígeno en el agua usando un medidor de OD (HACH HQ 40d) a 30 cm de profundidad en el centro del cauce. El equipo se calibró según las especificaciones del fabricante. También se midió la temperatura ambiente con un termómetro de bulbo.

En el laboratorio parte de las muestras de agua fueron filtradas con membranas de poro de 1.22 μm (microfibra de vidrio, Whatman®) y 0.45 μm (Millipore®) hasta obtener un volumen de 10 mL aproximadamente, el filtrado fue analizado en el equipo de cromatografía iónica (883 Basic IC Plus) para cuantificar el contenido de NO_3^- y PO_4^{3-} .

5.3.1. Cuantificación de amoníaco

El contenido de amoníaco en el agua fue determinado por fotometría, con la técnica NEN 6472, 1983.

Para lo cual se tomó una alícuota de 2 mL de muestra de agua a temperatura ambiente. Posteriormente se añadieron 4 mL de salicilato de sodio y 4 mL de diclorocianurato de sodio, se aforó a 50 mL con agua destilada, se mezcló y dejó reposar 3 horas. Posteriormente se midió la absorbancia en el espectrofotómetro marca HACH 5000 a una longitud de onda de 655 nm.

Previamente se corrió una curva de calibración con las siguientes concentraciones del estándar de NH_4Cl : 0, 0.5, 1, 2, 3, 5, 7 y 10 mg/L.

5.4. Índice de eutrofización

Una vez que se obtuvieron las concentraciones de fósforo, amoníaco y nitratos se usó el índice de eutrofización por nutriente de Karydis (1983), para clasificar cada uno de los sitios por su estado trófico.

Este índice fue desarrollado bajo los siguientes criterios:

- Ser específico para cada nutriente.
- Tomar en consideración el aporte del nutriente en el área específica.
- Ser adimensional y poder ser utilizado en varios tipos de agua.
- Ser sensible a los efectos de eutrofización y ser sencillo en el manejo de datos al realizar su cálculo (Aranda, 2004).

Se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$IE = \frac{C}{C - X_i} + \log A$$

Dónde:

IE: es el índice de eutrofización por nutriente de cada estación de muestreo, durante el periodo de estudio, compuesto por M muestreos.

A: es el número de estaciones de muestreo durante el periodo de estudio.

C: es el logaritmo de la concentración total del nutriente durante el periodo de estudio, es decir, es la suma de las concentraciones X_i del nutriente obtenidas en cada uno de las A_i estaciones durante los M muestreos.

X_i : es la concentración total del nutriente en la estación A_i durante el periodo de estudio; es decir, es la suma de las concentraciones del nutriente obtenido en la estación A_i durante los M muestreos.

Su significado para los valores de $IE < 3$ el estado trófico es oligotrófico, para $3 \leq IE \leq 5$ es mesotrófico, y para $IE > 5$ eutrófico.

5.5. Índice de calidad del agua

Para calificar y clasificar el agua de cada uno de los sitios por temporada se determinó el índice de calidad del agua (ICA), para este índice fueron utilizados todos los parámetros evaluados y se calculó en base a la ecuación propuesta por Pesce y Wunderlin (2000). Dicho índice fue utilizado ya que anteriormente calificó

adecuadamente la calidad del agua del río Mezquital de Durango (Vicencio, *et al.*, 2007).

$$ICA = \frac{k \sum_i C_i P_i}{\sum_i P_i}$$

Dónde:

k = constante subjetiva, representa la impresión visual de la contaminación del río, evaluada por una persona sin ninguna relación con el área ambiental.

C_i = valor normalizado del parámetro

P_i = peso relativo asignado a cada parámetro.

En éste trabajo no se consideró la constante k en el cálculo del ICA, para evitar introducir una evaluación subjetiva.

En la tabla 4 se muestran los valores sugeridos para C_i y P_i, usados en el cálculo del ICA, los cuales están basados en el Estándar Europeo (1975) de acuerdo a la preservación de la vida acuática.

Tabla 4. Valores de C_i y P_i para diferentes parámetros de calidad de agua

	P _i	C _i										
		100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
T ^a	1	21/26	22/15	24/14	26/12	28/10	30/5	32/0	36/-2	40/-4	45/-6	>45/<-6
pH	1	7	7-8	7-8.5	7-9	6.5-7	6-9.5	5-10	4-11	3-12	2-13	1-14
CE ^b	2	<0.75	<1.00	<1.25	<1.50	<2.00	<2.5	<3.00	<5.00	<8.00	<12.0	>12.0
OD	4	≥7.5	>7.0	>6.5	>6.0	>5.0	>4.0	>3.5	>3.0	>2.0	>1.0	<1.0
NH ₃	3	<0.01	<0.05	<0.10	<.020	<0.30	<0.40	<0.50	<0.75	<1.00	<1.25	>1.25
NO ₃	2	<0.5	<2.0	<4.0	<6.0	<8.0	<10.0	<15.0	<20.0	<50.0	<100	>100
PO ₄	1	<0.2	<1.6	<3.2	<6.4	<9.6	<16.0	<32.0	<64.0	<96.0	<160	>160
SST	4	<20	<40	<60	<80	<100	<120	<160	<240	<320	<400	>400
CF ^c	3	<50	<500	<1000	<2000	<3000	<4000	<5000	<7000	10000	≤14000	>14000

Se asignaron valores a Pi, donde los parámetros de mayor importancia y los que más influyen en la vida acuática se les dio el valor máximo de 4, a los de menor relevancia se les asignó un valor de 1. Quedando de la siguiente manera:

Tabla 5. Valores de Pi

Parámetro	Valor de Pi
Fósforo soluble (PO_4^{-3})	1
Nitratos (NO_3^-)	2
Amoníaco (NH_3)	3
Oxígeno disuelto (OD)	4
pH	1
Conductividad eléctrica (CE)	2
Temperatura	1

El valor numérico del índice, la clasificación del agua y color se muestran en la tabla 6 (Vicencio, *et al.*, 2007).

Tabla 6. Clasificación y colores propuestos para presentar el ICA

Descriptores	ICA	Colores
Muy mala	0-25	Rojo
Mala	25-50	Anaranjado
Media	51-70	Amarillo
Buena	71-90	Verde
Excelente	91-100	Azul

5.6. Muestreo de algas

En cada uno de los sitios se recolectaron algas que flotaban libremente o estaban formando masas de apariencia y consistencia definidas en la columna de agua, en frascos de plástico.

También se colectaron algas que estaban adheridas a sustratos sumergidos como: trozos de madera, roca, ramas y plantas, la muestra se tomó con una espátula,

raspando las partes más conspicuas. El material colectado se preservó con una solución de formaldehído al 4% y/o con una solución ácida de lugol.

5.7. Análisis cualitativo de algas

Para el análisis cualitativo se tomó una alícuota de 0.1 mL de las muestras de algas, posteriormente los organismos se observaron en un microscopio óptico con el objetivo 40x y se fueron identificando los grupos algales con las claves taxonómicas basadas en van Den Hoek, *et al.*, 1995; Bellinger, *et al.*, 2010; Wehr y Sheath, 2010. De cada una de las muestras de algas se siguió el mismo procedimiento tres veces.

Las cianobacterias se clasificaron a nivel de género para determinar cuáles coincidían con los reportados como géneros tóxicos.

5.8. Análisis cuantitativo de algas

El conteo de algas se realizó en una cámara de Neubauer, la cual está dividida en una cuadrícula, donde los cuadrados grandes tiene un área de 1 mm^2 y al colocar el cubre-objetos sobre el porta-objetos se tiene una profundidad de 0.1mm, de forma que el volumen contenido en cada uno de los cuadrados grandes será 0.1 mm^3 ($1.0 \text{ mm}^2 \times 0.1 \text{ mm} = 0.1 \text{ mm}^3$) (figura 3).

El cubreobjetos se ponía encima de la cámara y con una pipeta se agregaba una gota de muestra de algas en una de las ranuras de la cámara y por capilaridad las algas se distribuían en la cámara, la cual se fijaba al microscopio para realizar el conteo con el objetivo 40x. Los cuadros grandes laterales se utilizaron para la cuantificación (figura 3). Para obtener el número de algas por mililitro, se utilizó la siguiente fórmula: $\text{Número de células en } 0.1 \text{ mm}^3 = \text{Número total de células contadas} / \text{Número de cuadros } 1 \text{ mm}^2 \text{ en el conteo}$. Este valor correspondía al número total de células en 0.1 mm^3 y para obtener el número por mL, se multiplicaba por 10,000.

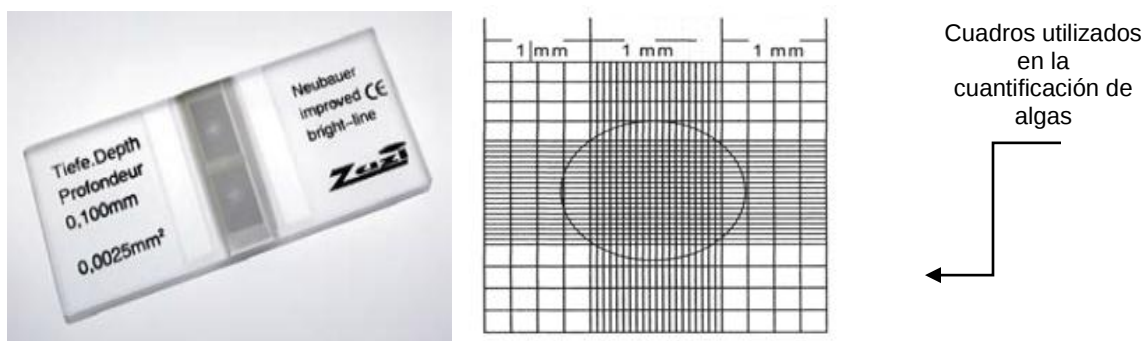


Figura 3. Cámara de Neubauer

5.9. Análisis de la información

Para validar las diferencias entre sitios y temporadas se utilizó un ANOVA de arreglo factorial 7x3, donde el siete representa a los sitios y el tres el número de muestreos. Para conocer las diferencias específicas entre sitios y fechas se utilizó la prueba Student-Newman-Keuls. Todos los análisis se realizaron en el programa de Statistica ver. 7.0 con valor de significancia de 0.05.

Para obtener la relación entre los grupos de algas y los parámetros fisicoquímicos evaluados se utilizó un análisis de correspondencia canónica (CCA). El CCA es una técnica de ordenación multivariada que permite ordenar especies y sitios a lo largo de gradientes ambientales de una manera directa, llevando a cabo regresiones interactivas entre los datos de las especies y datos ambientales (Amancio, 2007).

Para desarrollar el CCA se requirió de dos matrices con el mismo número de muestras, por lo cual, se elaboró una matriz de abundancia con los grupos algales encontrados en los sitios de estudio y otra matriz con los valores de los parámetros fisicoquímicos medidos. Los datos se corrieron en el software canoco y con las correlaciones y gráficos obtenidos se identificó cuales grupos de algas se relacionaban con los sitios eutrofizados o mesotróficos.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los análisis de agua se encuentran en el anexo 1 y con ayuda del índice de eutrofización por nutriente (IE) se estableció el estado trófico de cada uno de los sitios de estudio por muestreo, además se determinó la densidad de algas (células/mL) e identifico los grupos taxonómicos de estas; así como su correlación con las variables medidas.

Entre sitios y tiempos de muestreo se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$), además de correlaciones significativas ($p < 0.05$) para amoníaco y fosfatos con la presencia de algas tóxicas del grupo de las *Cyanophytas*, dichos nutrientes proceden de aguas residuales de la ciudad de Durango.

6.1. Estado trófico de los sitios de estudio

A) Muestreo de junio 2011

Para nitratos: El IE clasificó como oligotróficos a todos los sitios (Tabla 7), con un promedio de 0.48 mg/L de NO_3^- , con un mínimo de 0.05 mg/L y un máximo de 1.46 mg/L, lo cual no representa un problema en los cuerpos de agua, ya que la cantidad permitida es < 0.5 a ≤ 1.5 de N-NO_3^- mg/L de acuerdo a CONAGUA y a lo establecido por la subgerencia de estudio de calidad del agua en impacto ambiental para corrientes superficiales como ríos, lagos, presas y embalses.

Para amonio: La cantidad promedio de este compuesto fue de 2.27 mg/L N-NH_4^+ , con un mínimo de 1.7 mg/L y un máximo de 3.7 mg/L, valores que rebasan los límites permitidos por los criterios ecológicos de calidad del agua (1989) de ≤ 0.02 a ≤ 0.06 mg/L cuyo valor límite es considerado nocivo para la vida acuática. Aun en estas condiciones, los cuerpos de agua se consideran oligotróficos según el IE (tabla 7), excepto el Puente Tunal con 3.7 mg/L de N-NH_4^+ , que se clasificó como mesotrófico.

Para fosfatos: Cinco de los sitios resultaron oligotróficos y uno eutrófico, el Puente Tunal (Tabla 7), con un promedio de 1 mg/L PO_4^{3-} , un mínimo de 0.05 mg/L y un máximo de 3.96 mg/L. Los criterios ecológicos de calidad del agua (CE-CCA-001/89)

(DOF, 1989), permiten concentraciones de hasta 0.1 mg/L de fosfatos totales, medidos como fósforo para prevenir el desarrollo de especies biológicas indeseables y controlar la eutrofización en ríos y arroyos.

Tabla 7. Índice de eutrofización por nutriente para cada sitio, durante el muestreo de junio del 2011

Sitios	Muestreo de junio del 2011		
	Fosfatos	Nitratos	Amoníaco
El Saltito	1.4	1.1	2.1
La Punta	1.5	1.1	2.2
El Arenal	1.8	1.1	2.1
Puente El Tunal	5	2.2	3
*Puente San Carlos	-	-	-
La Ferrería	1.2	1.7	2.2
El Pueblito	1.2	1.6	2

* En éste sitio no se encontró agua

Valores del índice: IE= < 3 oligotrófico, IE= $\leq 3 \leq 5$ Mesotrófico, IE= > 5 Eutrófico

En este muestreo el puente El Tunal fue el único sitio que presentó problemas de eutrofización para fosfatos, probablemente por el efecto de escorrentías de fuentes difusas de fertilizantes de terrenos de cultivo aledaños al río y a otros desechos (basura o descargas de agua residual) que se vierten en lugares cercanos a este sitio, que ocasionaron el aumento de fosfatos y amonio.

B) Muestreo de noviembre del 2011

Para nitratos: Cuatro sitios resultaron oligotróficos, dos mesotróficos y uno eutrófico, con una concentración promedio de 10 mg/L, un mínimo de 0.16 mg/L y un máximo de 50.40 mg/L de NO_3^- (Tabla 8).

Para amonio: Se obtuvo una concentración promedio de 2.8 mg/L, con un mínimo de 1.8 mg/L y un máximo de 5.9 mg/L de N-NH_4^+ , clasificándose cinco sitios como oligotróficos y dos mesotróficos (Tabla 8).

Para fosfatos: Cuatro sitios resultaron oligotróficos, dos mesotróficos y uno eutrófico (Tabla 8), con una cantidad promedio de 4.6 mg/L, un mínimo de 0.01 mg/L y un máximo de 15.12 mg/L PO_4^{-3} .

Tabla 8. Índice de eutrofización por nutriente para los sitios, durante el muestreo de noviembre del 2011

Sitios	Muestreo de noviembre del 2011		
	Fosfatos	Nitratos	Amoníaco
El Saltito	2.3	1.6	2.1
La Punta	2	13.8	2.1
El Arenal	3.4	1.8	3.3
Puente El Tunal	3	3	2.1
Puente San Carlos	5.4	1.5	3
La Ferrería	1.3	3	2.1
El Pueblito	1.3	2.5	2.1

Valores del índice: IE= < 3 oligotrófico, IE= $\leq 3 \leq 5$ Mesotrófico, IE= > 5 Eutrófico

Durante este muestreo la concentración de los tres nutrientes aumento, presentándose más sitios mesotróficos (El Arenal y el puente El Tunal) y eutróficos (La Punta y el puente San Carlos). El aumento de nutrientes se debió en parte a las descargas de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Oriente a la acequia grande, la cual no cumple con las especificaciones de la NOM-001-SEMARNAT-1996 para descargas en cuerpos de agua (Pérez, *et al.*, 2006), las cuales llegan al puente San Carlos y posteriormente al Río La Saucedá que se une al Río El Tunal.

Las condiciones de mesotrófia–eutrofia encontradas en este muestreo también pudieron ser ocasionadas por las escasas precipitaciones del año en que se realizaron los muestreos, por lo que el nivel de agua de los ríos no aumento y no se dio la dilución de nutrientes.

C) Muestreo de abril del 2012

Para nitratos: En esta ocasión el IE clasificó a todos los sitios como oligotróficos (Tabla 9), con una cantidad promedio de 0.7 mg/L, un mínimo de 0.19 mg/L y un máximo de 1.30 mg/L de NO_3^- .

Para amonio: Cinco sitios resultaron oligotróficos y uno eutrófico que corresponde al puente San Carlos (Tabla 9); la concentración promedio de este nutriente fue de 2.4 mg/L de N-NH_4^+ , con un mínimo de 1.6 mg/L y máximo de 8.9 mg/L.

Para fosfatos: Cinco sitios se clasificaron como oligotróficos y uno mesotrófico que corresponde a La Punta (Tabla 9), con una concentración promedio de 1.1 mg/L, un mínimo de 0.01 mg/L y un máximo de 3.67 mg/L de PO_4^{3-} .

Tabla 9. Índice de eutrofización por nutriente para los sitios, durante el muestreo de abril del 2012

Sitios	Muestreo de abril del 2012		
	Fosfatos	Nitratos	Amoníaco
El Saltito	1.6	1.2	2
La Punta	4.1	1.4	2
El Arenal	-	-	-
Puente Tunal	1.3	2.0	2.1
Puente San Carlos	2.3	1.5	5
La Ferrería	1.1	1.7	2
El Pueblito	1.1	1.7	2

Valores del índice: IE= < 3 oligotrófico, IE= $\leq 3 \leq 5$ Mesotrófico, IE= > 5 Eutrófico

Los fosfatos fueron los compuestos que más contribuyeron al aumento del nivel trófico de los ríos, ya que durante los tres muestreos clasificó a dos sitios como eutróficos, y a tres como mesotróficos. El aporte de este compuesto al agua se debió principalmente a vertidos de aguas residuales domésticas.

Los nitratos sólo ocasionaron problemas durante el muestreo de noviembre del 2011, clasificando a dos sitios como mesotróficos y a uno eutrófico. Los bajos contenidos

de nitratos y los altos contenidos de amoníaco se deben principalmente a descargas continuas de aguas residuales domésticas o a la degradación de la materia orgánica de basura que arrojan al río o de los organismos muertos en el cuerpo de agua.

En general el índice eutrofización por nutriente evaluó adecuadamente los sitios de estudio, excepto para El Arenal en el muestreo de junio del 2011 y el puente El Tunal en el muestreo de abril del 2012, aunque en estos sitios se presentaron bajas cantidades de nutrientes, se obtuvieron valores de pH de 9 y 9.7, sobresaturación de oxígeno de 145.5% y 250.7%, y una cantidad mayor de algas, condiciones que indicaban un proceso de eutrofización.

La razón del que no se encontraran altas concentraciones de nutrientes en El Arenal (junio del 2011) y puente El Tunal (abril del 2012) pudo ser porque el tiempo de residencia del agua fue lo suficiente para estos compuestos pasaran a formar parte de las células de algas y macrófitas principalmente, por lo que se deben de tener en cuenta la interacción de las causas (nutrientes), efectos (alta biomasa de productores primarios) y condiciones ambientales (Karydis, 2009; Contreras, 2005; Seisdedo, 2009), como se pudo ver en los dos sitios que no fueron clasificados adecuadamente.

Los sitios que en este trabajo se clasificaron como mesotróficos – eutróficos, coinciden con trabajos anteriores realizados en los ríos EL Tunal, Durango y Mezquital (Pérez-López, *et al.*, 2006; Vicencio, *et al.*, 2007) donde también fueron evaluados como eutróficos y sitios como El Pueblito y La Ferrería que no presentaron problemas por nutrientes, también fueron clasificados como sitios de buena calidad.

El vertido de aguas residuales afecta principalmente a los sitios que están después del puente San Carlos, aun cuando se reducen los contaminantes por efecto de dilución de afluentes subterráneos y al cruzar por el humedal de Málaga (Pérez-López, 2006), el agua en El Arena y La Punta aún se mantienen con problemas de mesotrófia y eutrofia pero con una carga de nutrientes y contaminantes menor con respecto al agua en el puente San Carlos. En El Saltito el agua llega más depurada, calificandose como oligotrófica en éste estudio.

6.2. Índice de Calidad del Agua (ICA)

El índice de calidad del agua (ICA) se determinó para valorar si la calidad del agua de los ríos cumple con los requisitos para el desarrollo y preservación de la vida acuática cuando se presenta un problema de eutrofización. Para este índice se emplearon los siguientes parámetros: pH, conductividad, temperatura, oxígeno disuelto, coliformes fecales, nitratos, amoníaco y fosfatos. Los valores de cada parámetro se muestran en el anexo 1.

A) Muestreo de junio del 2011

El ICA calificó a cuatro sitios con agua de calidad buena con un valor promedio de 75.8 y dos sitios con agua de calidad media (60.8), en éste muestreo en el sitio puente San Carlos no se determinó el ICA debido a que no se encontró agua. El bajo contenido de oxígeno disuelto y una alta concentración de amonio fueron los parámetros que contribuyeron a que la calidad del agua decreciera y se considerara con calidad media (Tabla 10).

B) Muestreo de noviembre del 2011

El ICA clasificó a cinco sitios con calidad buena, con un promedio de 74.3; un sitio con media (51) y uno con mala calidad (37). En este muestreo el aumento del contenido de nitratos, amoníaco y el poco oxígeno disuelto ocasionaron el decremento de la calidad del agua en los puntos con un menor valor del ICA, ver (Tabla 10).

Los sitios con un ICA buena fueron calificados por IE como mesotróficos (El Arena y el puente El Tunal), en estas condiciones la concentración de nutrientes fue suficiente para el aumento de biomasa y el desarrollo de los organismos y aun con cantidades todavía suficiente de oxígeno disuelto para mantener la vida acuática, como lo referencio Mihelcic (2001) en cuerpos de agua mesotróficos. Sin embargo al morir los organismos, los microorganismos consumirán el oxígeno del agua para degradar la materia orgánica, y una vez degradada se generara nuevamente un

aporte de nutrientes, con lo que las algas y plantas se podrán desarrollar en exceso, provocando que estos sitio se eutroficen y pierda su calidad.

C) Muestreo de abril del 2012

Los valores del ICA calificaron a cuatro sitios con calidad de agua buena, con un promedio de 77, uno con media (54) y uno con mala calidad (48) (Tabla 10). El ICA no reflejo la verdadera calidad del agua en los sitios La Punta y el puente El Tunal, que se clasificaron con buena calidad, ya que en estos sitios el agua se encontraba estancada, el porcentaje de saturación de oxígeno sobrepasó el 100% y el pH fue alcalino (8.6 a 9.7), lo que comprueba alta productividad de algas y por lo tanto sitios eutróficos.

Además valores por arriba del 100% de saturación de oxígeno resultan peligrosos para la vida acuática, pues facilitan que burbujas de oxígeno bloqueen el flujo sanguíneo (Pérez-Castillo, *et al.*, 2008) y el pH por arriba de 8.5 favorece la ionización de compuestos como el amonio a amoniaco que es a toxico, así como la disponibilidad biológica de ciertos contaminantes, como los metales pesados (Chapman, 1996; Guzmán, 2011).

Tabla 10. Clasificación del ICA por sitios y muestreos

Sitio	Muestreo	ICA	Clasificación
El Saltito	Junio 2011	71	Buena
	Noviembre 2011	71	Buena
	Abril 2012	54	Media
La Punta	Junio 2011	58	Media
	Noviembre 2011	51	Media
	Abril 2012	75	Buena
*El Arenal	Junio 2011	77	Buena
	Noviembre 2011	78	Buena
	Abril 2012	-	-
*Puente Tunal	Junio 2011	64	Media
	Noviembre 2011	74	Buena
	Abril 2012	74	Buena
Puente San Carlos	Junio 2011	-	-
	Noviembre 2011	37	Mala
	Abril 2012	48	Mala
La Ferrería	Junio 2011	71	Buena
	Noviembre 2011	71	Buena
	Abril 2012	71	Buena
El Pueblito	Junio 2011	79	Buena
	Noviembre 2011	76	Buena
	Abril 2012	80	Buena

*En el muestreo de abril del 2012 no se encontró agua en El Arenal y en el muestreo de junio del 2011 en el puente San Carlos

Como se pudo observar en la tabla 10 el índice de calidad del agua calificó a la Punta y al puente San Carlos como los sitios menos aptos para el desarrollo y preservación de la vida acuática. Estos sitios también fueron los que obtuvieron un nivel trófico mayor, lo cual, comprueba el impacto de la eutrofización en los organismos acuáticos, sobretudo en peces e invertebrados.

Lo que más repercutió en la disminución de la calidad de estos sitios fueron las bajas concentraciones de oxígeno disuelto, ya que se obtuvieron valores de 0.28 a 0.31 mg/L, por debajo de la cantidad ideal que los organismos acuáticos requieren, de 5.5 – 8 mg/L (Guzmán, 2011), lo que indica que en estos sitios hay un alto contenido de materia orgánica. En el puente San Carlos la materia orgánica se debe a descargas de aguas residuales y en La Punta por la gran cantidad de lirio acuático, el cual en algunos tramos ya estaba en proceso de descomposición.

En general el amoníaco fue la variable que más afectó la calidad del agua, ya que en todos los sitios y durante los tres muestreos se obtuvo un promedio de 2.7 mg/L de N-NH_4^+ , sobrepasando en promedio hasta 133 veces la concentración recomendada de ≤ 0.02 a 0.06 mg/L. Las concentraciones relativas de NH_4^+ y NH_3 dependen básicamente del pH y la temperatura del agua, a medida que los valores de pH y temperatura aumentan, la concentración de NH_3 aumenta y la concentración de NH_4^+ disminuye.

El amoníaco es muy tóxico para los animales acuáticos, en especial para los peces, mientras que el ion amonio es apreciablemente mucho menos tóxico (Camargo, et al., 2007). Las altas concentraciones de este compuesto en el agua de los ríos se pudo deber a los bajos niveles de agua en los ríos, por lo que no se diluyó los aportes puntuales o difusos que se dan.

Los sitios con mejor calidad de agua durante los tres muestreos fueron El Pueblito y La Ferrería. Estos lugares están rodeados de poblados pequeños que aún no causan un impacto considerable sobre la calidad del agua.

6.3. Composición de los grupos de algas en los sitios de estudio

Con el análisis cualitativo de algas se identificaron cinco grupos o divisiones algales, los cuales corresponden a *Cyanophyta*, *Chlorophyta*, *Euglenophyta*, *Cryptophyta* y *Bacillariophyta* (diatomeas) (Anexo 2).

6.3.1. Abundancia de algas

A) Muestreo de junio del 2011

El grupo *Bacillariophyta* fue el más abundante en todos los sitios, representando en promedio un 80.6% de la comunidad algal, seguido por las *Cyanophytas* y *Chlorophytas* que en promedio obtuvieron abundancias de 10.8 y 8.4% respectivamente. Los grupos de *Euglenophytas* y las *Cryptophytas* no se observaron durante el análisis de este muestreo (figura 4).

B) Muestreo de noviembre del 2011

Las *Bacillariophytas* siguieron siendo el grupo más abundante con un 75.6% en promedio, excepto en el puente San Carlos donde solo alcanzó el 12.5%; las *Cyanophytas* obtuvieron en promedio 18.7%, en el puente San Carlos fue el grupo más abundante con 87.5%; la abundancia promedio de las *Chlorophytas* fue de 5%, (figura 4).

Las *Cyanophytas* tienen la capacidad para desarrollarse en ambientes turbios, con altas temperaturas, así como en bajas concentraciones de oxígeno y de dióxido de carbono y en altas concentraciones de amonio (Falconer, 2005). Lo que coincide con este trabajo ya que el puente San Carlos presento dichas características y fue aquí donde este grupo de algas alcanzaron un valor máximo de abundancia.

C) Muestreo de abril del 2012

Las *Bacillariophytas* fueron el grupo más abundante, pero en menor porcentaje que los dos muestreo anteriores, con un valor de 60.5%; las *Cyanophytas* alcanzaron en promedio un 22.6%; las *Chlorophytas* con un promedio del 15.3%; las *Euglenophytas* y las *cryptophytas* obtuvieron abundancias de apenas el 1.4% y 0.1% respectivamente, estos dos últimos grupos se observaron principalmente en sitios eutróficos (puente El Tunal y San Carlos), como lo han referenciado en otros trabajos (Moreno, *et al.*, 2008) (Figura 4).

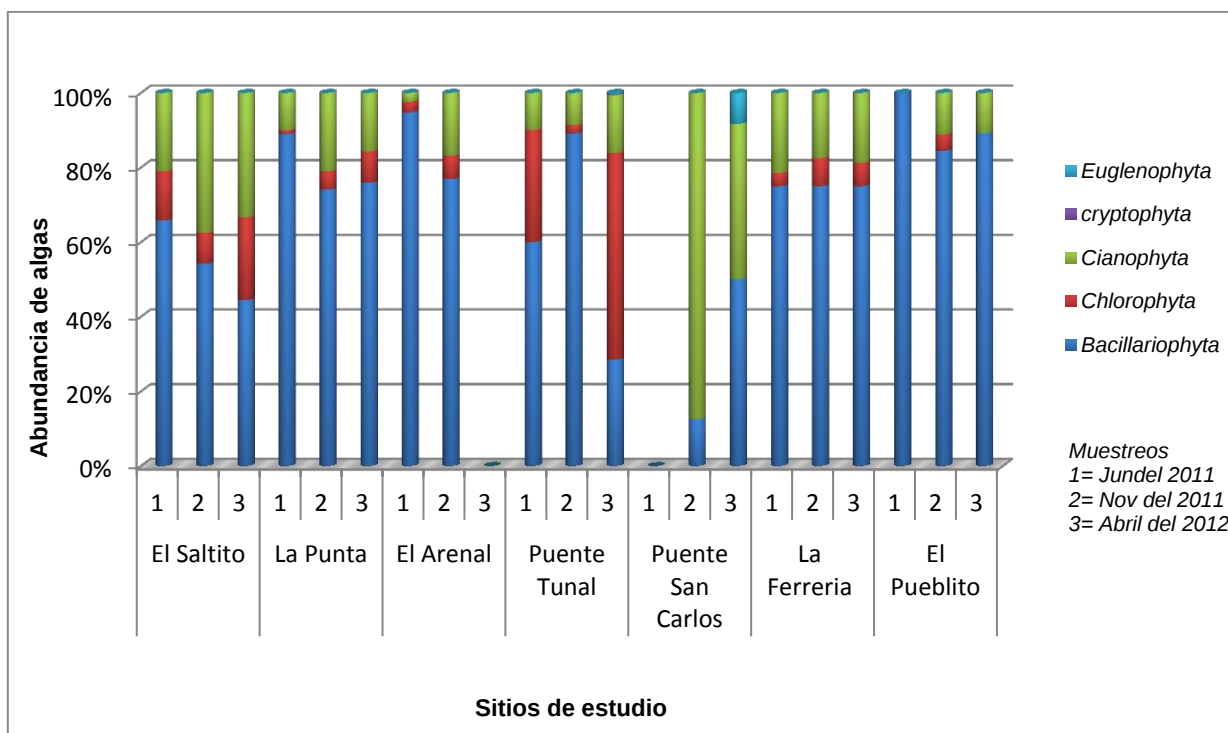


Figura 4. Abundancia de algas durante los tres muestreos

La comunidad algal de los ríos El Tunal y Durango presentó características que en general no se apartan de las dadas a conocer en otros ríos (Bojorge, *et al.*, 2007; Castañe, *et al.*, 1998; Moreno, *et al.*, 2008; Sosa, *et al.*, 2011), donde las *Bacillariophytas* han sido reportadas como el grupo dominante de las algas en ambientes lóticos, seguidas por las *Chlorophytas*, *Cyanophytas* y *Euglenophytas*.

La abundancia de las *Bacillariophytas* se explica por una alta eficiencia fotosintética, alto contenido de clorofila y un bajo umbral de saturación de luz, características que le confieren ventajas adaptativas en comparación a otros componentes del plancton en ambientes lóticos (Salusso, 2005).

Respecto a las *Chlorophytas* y *Cyanophytas*, en este estudio hubo una variación y la dominancia respecto a los grupos fue inversa, presentándose las *Cyanophytas* como el segundo grupo más abundante. Lo cual se pudo deber a los bajos flujos de agua que se encontraron en los tres muestreos, esto facilita la ocurrencia de pequeños

pulsos o floraciones de cianobacterias, este patrón se ha observado en otros ríos de diversas latitudes geográficas (Salusso, 2005).

6.3.2 Densidad de algas

Las densidades de los grupos de algas obtenidos de los conteos con la cámara de Neubauer, se describen a continuación y se muestran en la (figura 5).

A) Muestreo de junio del 2011

Las densidades más bajas de algas fueron en el puente El Tunal con 12,500 ind/mL, El Pueblito con 38,750 ind/mL y La Ferrería con 69,800 ind/mL; seguidos por La Punta y El Saltito con 112,500 y 190,000 ind/mL respectivamente; el valor máximo de algas se dio en El Arenal con 1,007,500 ind/mL (figura 5).

B) Muestreo de noviembre del 2011

Las densidades mínimas se obtuvieron en el puente San Carlos (10,000 ind/mL) y el Saltito (30,000 ind/mL); El Pueblito y La Ferrería obtuvieron en promedio 53,125 ind/mL; La Punta y El Arenal 202,084 ind/mL y el puente El Tunal con la máxima densidad de 1,046,666 ind/mL (figura 5), en estos tres últimos sitios que resultaron mesotróficos o eutróficos la densidad de algas si respondió al aumento de nutrientes ya que fue mayor número de individuos por mililitro en comparación con los sitios oligotróficos. Esta relación no siempre se cumplió como en el puente San Carlos (eutrófico), donde el tiempo de permanencia del agua en el sitio era menor ya que la velocidad del agua era más rápida.

C) Muestreo de abril del 2012

El número de algas disminuyó en comparación con los muestreos anteriores, con un promedio de 34,375 ind/mL, excepto en La Punta y el puente El Tunal con 477,500 y 772,500 ind/mL respectivamente (figura 5). Las densidades obtenidas en estos dos últimos sitios se relacionan con los valores de porcentaje de saturación de oxígeno y

pH que comprueban que los sitios se encontraban eutróficos, aunque el IE no los haya clasificados así.

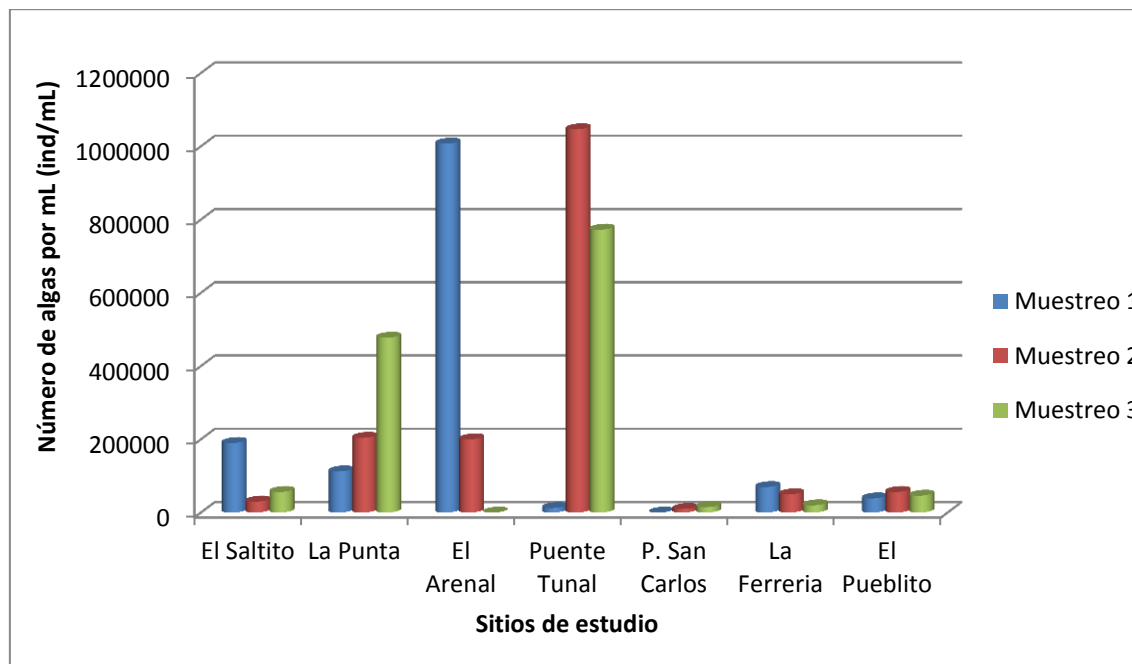


Figura 5. Densidad de algas (ind/mL) por sitio y por muestreo

Las densidades de algas también son afectadas por las temporadas de lluvia y de estiaje, en general durante el estiaje, con la reducción del caudal y el incremento del tiempo de permanencia del agua se desarrolla una mayor cantidad de biomasa algal (Seeligmann, 2001). Este estudio se realizó durante un periodo de sequía, por lo que se concentró un número mayor de algas, aunado a esto, en algunos sitios también influyo al aumento de fosfatos y en especial de amonio, que se mantuvo con altas concentraciones.

En este trabajo se tomó en cuenta tanto el fitoplancton, como las algas que estaban fijadas en algún sustrato y se juntaron en una sola muestra, por lo que las densidades de algas a lo largo de los tres muestreos vario respecto a las escalas propuestas para los diferentes niveles tróficos según el número de algas del fitoplancton, que sugieren hasta 6×10^3 células L^{-1} para aguas oligotróficas; un intervalo de 6×10^3 a 1.5×10^5 células L^{-1} para aguas mesotróficas y más de 1.5×10^5 células L^{-1} para aguas

eutróficas (Karydis, 2009). Otra escala establece que $\geq 1,000$ células mL^{-1} se considera un florecimiento no masivo; $\geq 10,000$ células mL^{-1} , masivo; $\geq 50,000$ células mL^{-1} , hipermasivo (Moreno, et al., 2008).

6.4. Géneros de algas tóxicas pertenecientes al grupo de las *Cyanophytas*

Se identificaron seis géneros de *Cyanophytas*, reportados en la literatura como productores de cianotoxinas a nivel mundial (Falconer, 2005; UNESCO, 2009; De León, 2005; Roset, et al., 2001; Rivera, et al., 2010) correspondientes a *Lyngbya*, *Planktothrix*, *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Anabaena* y *Aphanocapsa* (figura 6).

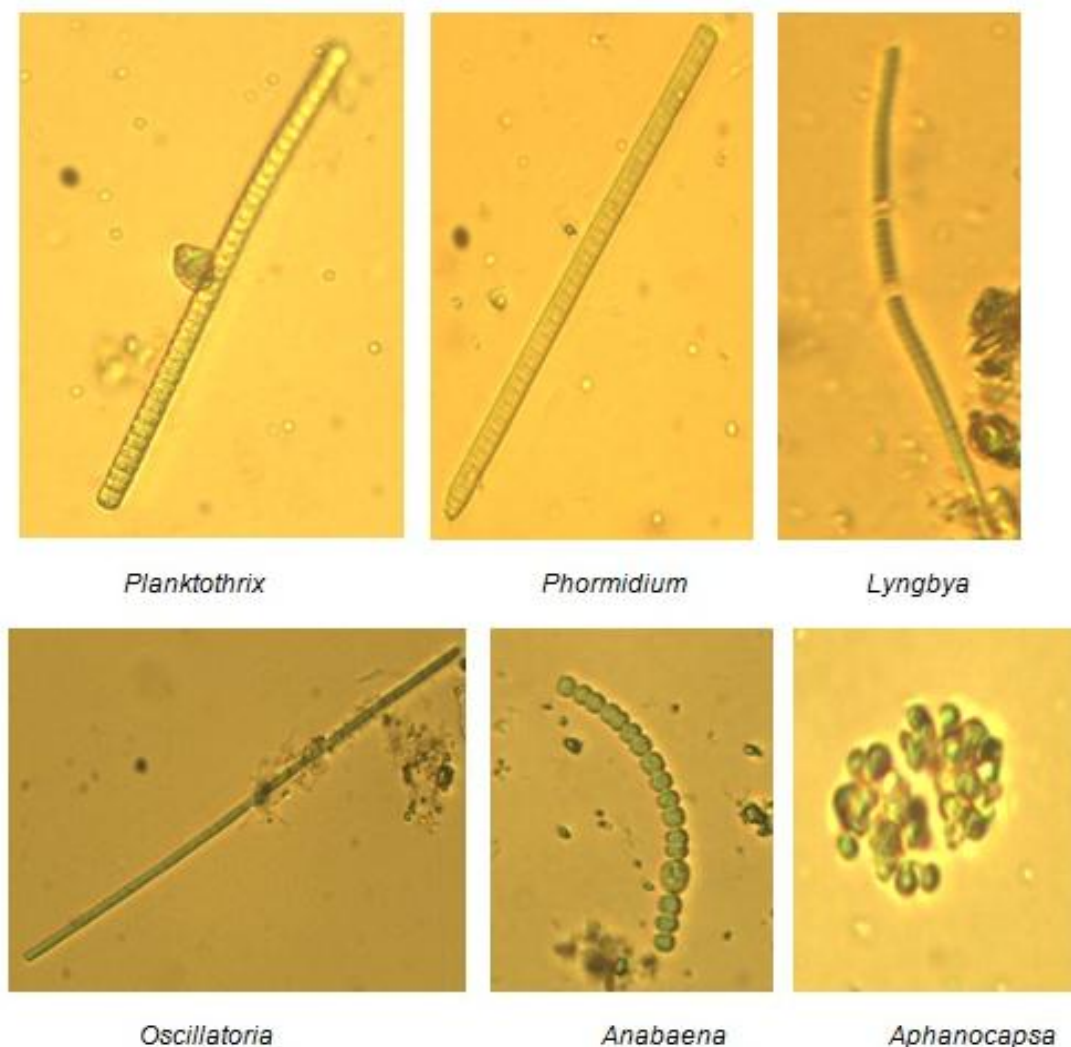


Figura 6. Géneros de algas tóxicas del grupo de las *Cyanophytas*

Los sitios con más variedad de *Cyanophytas* tóxicas fueron La Punta y El Saltito con 4 y 5 géneros respectivamente. En los demás sitios sólo se encontraron de dos a tres géneros siendo *Lyngya* y *Oscillatoria* los más comunes.

Los géneros tóxicos encontrados así como las altas densidades de este grupo (1250 a 120,000 ind/mL), sobre todo en los sitios que se clasificaron como mesotróficos y eutróficos como son La Punta, El Arenal y el puente El Tunal representan un problema ambiental y de salud en las poblaciones que utilizan los ríos como proveedor de agua para el sostenimiento de zonas agrícolas y/o ganaderas y actividades de recreación, ya que rebasan el valor guía sugerido por la organización mundial de la salud (OMS) para bajas probabilidades de efectos adversos, con un valor de 20,000 células/mL. (Ruibal, *et al.*, 2005).

También se tiene que considerar que las floraciones de *Cyanophytas* se pueden desarrollar bajo otras condiciones, como ha ocurrido en algunas aguas oligotróficas (Roset, *et al.*, 2001), como se dio en el agua de El Saltito que es oligotrófica, sin embargo en el muestreo de junio del 2011, se obtuvo una densidad de 40,000 ind/mL y cinco géneros tóxicos de *Cyanophytas* de los seis géneros identificados, por lo que es importante continuar con su evaluación, ya que en este sitio se forman grandes pozas que pueden facilitar la concentración de algas y en trabajos anteriores se manifestó la problemática de la eutrofización en este río (Pérez, *et al.*, 2006; Vicencio, *et al.*, 2007; García, 2011).

6.5. Relación de los grupos de algas y los parámetros fisicoquímicos

Las relaciones canónicas entre grupos de algas y parámetros fisicoquímicos del agua fueron de 0.855 para el primer eje y de 0.648 para el segundo. El primer eje indica que el 31.3% de la variación es debida a los grupos de algas, el segundo el 18.3% y los dos ejes juntos el 49.6%. El primer eje indica que el 50.7% de la variación es debida a la relación entre grupos de algas y variables ambientales, el segundo eje el 29.8% y juntos indican el 80.5% (tabla 11).

Tabla 11. Análisis de correspondencia canónica entre grupos de algas y parámetros fisicoquímicos del agua en los ríos El Tunal y Durango

Ejes	1	2
Eigenvalores:	0.159	0.093
Correlaciones especies-ambiente:	0.855	0.648
Porcentaje de varianza de las especies:	31.3	49.6
De la relación especies-ambiente:	50.7	80.5

Tabla 12. Prueba de significancia del análisis de correspondencia canónica

Del primer eje canónico		
Eigenvalor =	0.159	
F-ratio=	5.002	
Valor de P=	0.3400	
De todos los ejes canónicos		
Trace=	0.313	
F-ratio=	2.527	
Valor de P=	0.0280	

En la tabla 13 se muestran los valores de correlación canónica de los parámetros fisicoquímicos del agua obtenidos por el análisis de correspondencia canónica (CCA) para los primeros dos ejes de ordenación (eje 1 y eje 2).

Tabla 13. Correlaciones canónicas de los primeros dos ejes

	Eje 1	Eje2
SPEC AX1	1	
SPEC AX2	0.0579	1
SPEC AX3	0.0361	-0.0732
SPEC AX4	-0.2957	0.0417
ENVI AX1	0.8550	0
ENVI AX2	0	0.6480
ENVI AX3	0	0
ENVI AX4	0	0
Ph	-0.3295	0.5915
CE	0.3338	0.3846
Saturación de oxígeno	-0.6127	0.2354
Temperatura agua	-0.2288	0.2549
Nitratos (NO_3^-)	-0.0315	-0.1100
Fosfatos (PO_4^{-3})	0.6601	0.1601
Amoniaco (NH_3)	0.5002	0.0946

El diagrama de ordenación, obtenido de la correlación canónica muestra como a lo largo del primer eje se distribuyen del lado positivo los sitios que obtuvieron mayor concentración de fosfatos y nitratos; del lado negativo los sitios con más concentración de saturación de oxígeno. Los sitios con mejor calidad del agua se distribuyen a lo largo del segundo eje del lado negativo, mientras que del lado positivo de este mismo eje se agruparon los sitios con mayor cantidad de nitratos (figura 7).

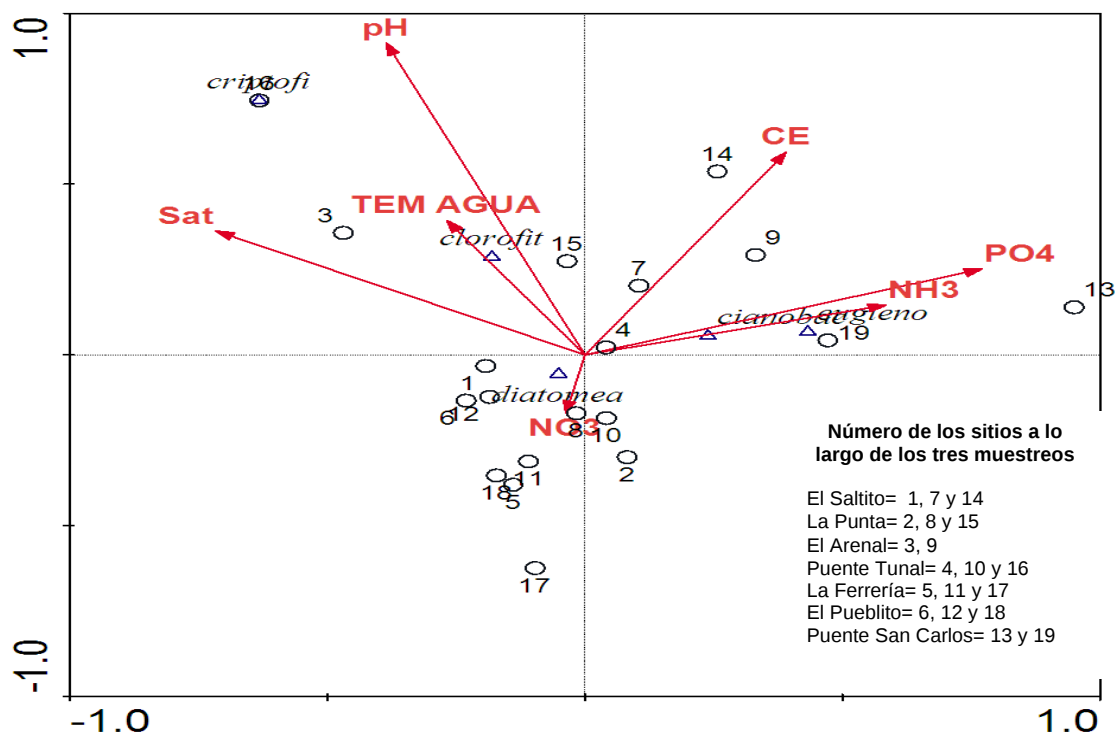


Figura 7. Gráfico de ordenación de los sitios (símbolos y números), de los grupos de algas (símbolos) y los parámetros fisicoquímicos (flechas). Las puntas de las flechas están dadas por las correlaciones de los parámetros fisicoquímicos, con los ejes. Las posiciones de los grupos de algas se dan por cambios en su abundancia debidos a las variaciones de los parámetros fisicoquímicos. Los sitios se agrupan según la similitud de dichos parámetro

Los grupos de *Cyanophytas* y de *Euglenophytas* respondieron al aumento de fosfatos y amoníaco, por lo cual se distribuyen a lo largo del primero eje (figura 7), esta relación se dio en el Puente San Carlos, calificado como eutrófico por las altas

cantidades de dichos nutrientes. Estos grupos de algas han sido encontradas en aguas eutrofizadas y parece ser que son más abundantes en este tipo de aguas que en aguas oligotróficas (Falconer, 2005).

Las *Euglenophytas* prosperan principalmente en cuerpos de agua que reciben vertidos cloacales con altos contenidos de amoníaco, este grupo comparte hábitats similares desde el punto de vista de la calidad de las agua con las *Cyanophytas* (Peinador, *et al.*, 2008; Seeligman, 2001), por lo que estos grupos se presentaron en el mismo eje.

Las *Chlorophytas* se relacionaron con la temperatura del agua y se ubicaron del lado negativo del segundo eje, este grupo prospera en ambientes donde la columna de agua es transparente y tiene una tendencia a asociarse con el aumento de la temperatura (Salusso, 2005), hecho que coincide con lo encontrado en este trabajo.

Las *Cryptophytas* se relacionaron con el pH, coincidiendo nuevamente con Salusso (2005), dichos organismos presentan caracteres fisiológicos adaptativos para condiciones adversas por lo que se vieron favorecidas en pH alcalino.

Las *Bacillariophytas* (diatomeas) se ubicaron alrededor del centro del gráfico, lo que indica que son un grupo generalista o poco sensible a los cambios de los parámetros fisicoquímicos que se dan en el agua (figura 7).

En el gráfico 8 se puede observar más claramente el comportamiento de las *Cyanophytas* y *Euglenophytas* con respecto al amoníaco, donde a mayor concentración de dicho nutriente la abundancia de estos grupos también aumentó, por lo que se obtuvieron correlaciones del amoníaco con las *Cyanophytas* de 0.42 y con las *Euglenophytas* de 0.52. La presencia de amoníaco en el agua de los ríos es un indicador de vertidos de aguas residuales domésticas en ellos, y los ríos El Tunal y Durango no están exentos de estas prácticas, como pudo observarse en los resultados y la relación que hay del amoníaco con las *Cyanophytas* tóxicas con el incremento de su población.

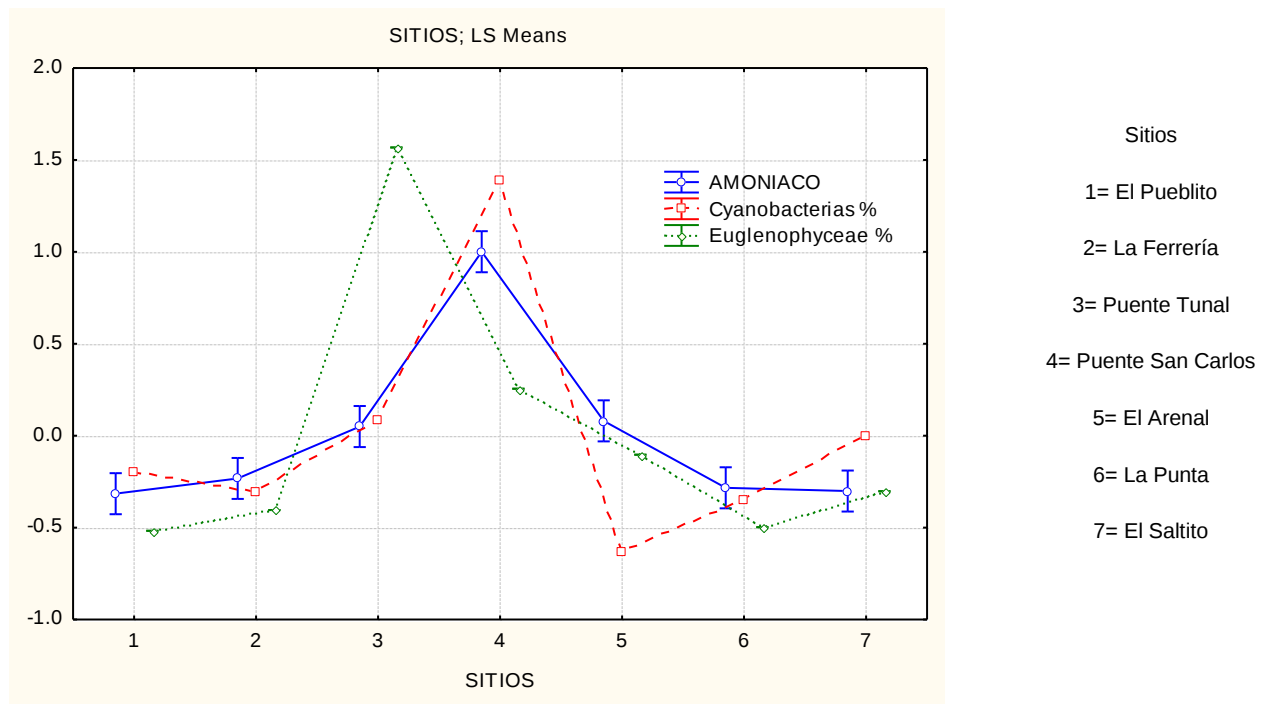


Figura 8. Gráfico de la relación entre el amoniaco con las *Cianophytas* y *Euglenophytas*

VII. CONCLUSIONES

En los tramos del Río El Tunal que se encuentran antes de la ciudad de Durango el estado trófico que predominó fue el oligotrófico y El Saltito que forma parte del Río Durango, por lo que el problema de eutrofización en estos ríos es ocasionado principalmente por los desechos que se producen en la ciudad.

El puente San Carlos que forma parte del canal Acequia Grande y recibe descargas de aguas residuales de la ciudad y de la PTAR oriente, es el que más contribuye al deterioro de la calidad del agua del Río El Tunal al unirse con él, por lo que el puente El Tunal, El Arenal y La Punta que están después de este sitio presentan problemas de mesotrófia o eutrofización.

Las condiciones de estiaje que predominaron durante la evaluación del río influyeron en la calidad del agua, ya que se presentaron bajas concentraciones de oxígeno disuelto, así como una mayor concentración de nutrientes, sobre todo de amonio, lo que se vio reflejado en una alta densidad de algas, más en aquellos sitios mesotróficos y eutróficos. Excepto en el puente San Carlos, que a pesar de tener alto contenido de fosfatos y amonio el número de algas fue menor en comparación con los otros sitios.

El grupo de algas dominantes fue el de *Bacillariophyta*, seguido por las *Cyanophytas* que en general respondieron al aumento de nutrientes, este grupo de algas es frecuente en ríos eutróficos, lo que se pudo observar sobre todo en el puente San Carlos donde predominaron. De igual forma las *Euglenophytas* correspondieron a la eutrofización y a los altos contenidos de amonio, lo cual es común en este grupo de algas, lo anterior indicó que la composición de algas se ve influenciada por los cambios de calidad de agua en los ríos.

Los seis género de algas tóxicas de *Cyanophytas* y las altas densidades de estas encontradas en los sitios evaluados pueden representan un peligro para la fauna y la salud humana cuando se presenten condiciones de eutrofización y estiaje. Sin

embargo se tiene que considerar que aún en ambientes oligotróficos se dan floraciones de *Cyanophytas*.

Evaluar el peligro potencial de intoxicaciones por *Cyanophytas* en cuerpos de agua es complicado debido al rápido cambio en las poblaciones de este grupo, por lo que es necesario evaluar continuamente los ríos El Tunal y Durango para que se puedan detecten floraciones de cianobacterias y no pase desapercibido dicho problema.

VIII. SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES

Se puede realizar una evaluación preliminar rápida de la eutrofización, basada en criterios biológicos, como: presencia y cobertura de macrófitas flotantes y sumergidas, así como las propiedades organolépticas del agua como la turbidez y olor. También es importante considerar la abundancia y diversidad de algas, ya que los procesos eutróficos suelen producir un aumento de estos organismos.

Los indicadores planteados se muestran como una herramienta útil para la evaluación rápida, sin embargo sería recomendable realizar un estudio más profundo del avance del proceso eutrófico, tomando en cuenta parámetros fisicoquímicos, biológicos y de diversidad.

Es necesario realizar un estudio más detallado de las especies de algas presentes en estos ríos ya que fueron buenas indicadoras de los cambios de calidad de agua.

Se tiene que hacer una evaluación detallada de las *Cyanophytas*, la simple identificación de un género o incluso de una especie no es suficiente para determinar si produce o no toxinas, por lo que se deben realizar estudios toxicológicos para complementar el estudio de los sitios evaluados.

La evaluación de los patrones espaciales usando parámetros que indiquen cambios en la calidad de agua y el estado trófico de los ríos contribuirán a definir las zonas más críticas en los cuerpos de agua, orientando las decisiones para su recuperación.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Aranda C. N. 2004. Eutrofización y calidad del agua de una zona costera tropical. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona. Departamento de Ecología. www.tesisenxarxa.net/Tesis_UB/.../TDX.../TESISNANCY.pdf
- Amancio R. G. 2007. Relación entre la estructura del hábitat y la biodiversidad de aves en dos sitios en la reserva de la biosfera la Michilia. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional CIIDIR Durango, México. 19-20 pp.
- Bellinger E. G. and Sigee D. C. 2010. Freshwater algae: Identification and Uses as Bioindicators. Ed. WILEY – BLACKWELL. Estados Unidos de América. 138-240 pp.
- Bojorge G. M. G. y Cantoral U. E. 2007. Estructura comunitaria de diatomeas asociadas a talos de *Prasiola mexicana* (*Chlorophyta*) en el río Magdalena, D.F. No. 001. Hidrobiológica, año/vol. 17. D.F. 11-24 pp.
- Boletín de la Sociedad Española de Ficología. 2005. Algas n° Especial bioindicadores y monitorización. www.sefalgas.org. 65 pp.
- Cabioc'h J., Floc'h J. Y., Le Toquin A., Boudouresque C. F., Meinesz A., Verlaque M. 1995. Guía de las algas de los mares de Europa: Atlántico y mediterráneo. Barcelona. 1-21 pp.
- Camargo J. A. y Alonso A. 2006. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. Environment International. www.elsevier.com/locate/envint.
- Camargo J. A. y Alonso A. 2007. Contaminación por nitrógeno en los ecosistemas acuáticos; problemas medio ambientales, criterios de calidad de agua, e implicaciones del cambio climático. N°. 002. Ecosistemas, año 7 vol. XVI. Asociación española de Ecología Terrestre. España.
- Carpenter S., Caraco N. F., Correll D. L., Howarth P. W., Sharpley A. N. y Smith V. H. 1998. Contaminación no puntual de aguas superficiales con fósforo y nitrógeno. No. 3. Tópicos en ecología. Traducción al español de Issues in Ecology. 1-12 pp.
- Castañe P. M., Loez C. R., Olguin H. F., Puig A., Rovedatti M. G., Topalián M. L. y Salibián A. 1998. Caracterización y variación espacial de parámetros fisicoquímicos y del plancton en un río urbano contaminado (río Reconquista, Argentina). Rev. Int. Contaminación ambiental, 14 (2). 69-77 pp.
- Chapman D. 1998. Water quality assessments. Ed. Chapman and Hall. London UK 613p.

Chávez de Allain A. N. 2007. Sustancias Nutrientes y Eutrofización. Estudios de impacto Ambiental. Universidad de Piura. http://www.ing.udep.edu.pe/civil/material/rrhh/primer%20trimestre/EIA/NT_N%BA3/NT%BA3_sustancias%20nutrientes%20%20eutrofizaci%F3n.pdf.

Comisión Nacional del Agua. 2005. Río Tunal, contaminado. Proyecto de recuperación de la cuenca de San Pedro. Durango, México.

Contreras E. F., Rivera G. N., Segura A. R. 2005. Nutrientes y productividad primaria fitoplanctónica en una laguna costera tropical intermitente (La Mancha, Ver.) del Golfo de México. *Hidrobiológica* 2005, 15 (3): 299-310.

Coord/. Aguilar I. A. 2010. Calidad del agua: un enfoque multidisciplinario. Universidad Autónoma de México. Instituto de Investigaciones Económicas. ISBN 978-607-02-1455-4. 308 pp.

De la Lanza E. G., Hernández P. S., Carbajal P. J., (compiladores). 2000. Organismos indicadores de la calidad del agua y de la contaminación (bioindicadores). Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Comisión Nacional del Agua, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología. México. 17-176 pp.

De León L. 2002. Floraciones de cianobacterias en aguas continentales del Uruguay: causas y consecuencias. En: Perfil Ambiental del Uruguay 2002, Domínguez, A. y R. G. Prieto (eds.), Nordan-Comunidad, Montevideo. 28-37 pp.

De León L. 2005. Floraciones Algales De Agua Dulce: Cianobacterias, Cianotoxinas. En: Burguer y Pose (Eds.), animales ponzoñosos y toxinas biológicas. Dpto. Toxicología, CIAT, Facultad de Medicina. Publicaciones de la Universidad de la República-CSIC.

Etcheverry D. H. 1998. Algas marinas bentónicas de Chile. Editorial Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe. Montevideo Uruguay. <http://unesdoc.unesco.org/images/0007/000721/072123so.pdf>

Falconer I. R. 2005. *Cyanobacterial Toxins of Drinking Water Supplies. Cylindrospermopsins and Microcystins*. CRC PRESS. Washington D.C. 279 pp.

Figueroa J. R. 2004. Calidad ambiental de la cuenca Hidrográfica del Río Chillan, VII región, Chile. Tesis doctoral. Universidad de Málaga. Chile. 115 pp.

Fontúrbel R. F. 2005. Indicadores fisicoquímicos y biológicos del proceso de eutrofización del lago Titikaka (Bolivia). No. 1-2. *Ecología aplicada*, año/vol. 4. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima Perú. 135-141pp.

García R. G. 2011. Evaluación de los cambios de la calidad del agua para vida acuática en El Saltillo Nombre de Dios. Dgo. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional CIIDIR Durango, México. 19-20 pp.

González G. J. 1987. Las algas de México. Ciencias, revista de difusión.

Guzmán C. G., Thalasso F., Ramírez L. E., Rodríguez N. S., Guerrero B. A., Avelar G. F. 2011. Evaluación de la calidad del agua del río San Pedro en el estado de Aguascalientes, México. Rev. Int. Contam. Ambie. 27 (2) 89-102. 90-101 pp.

Karydis M. 2009. Eutrophication assessment of coastal waters based on indicators: a Literature review. No. 4. Global NEST Journal, Vol 11. 373-390 pp.

Luján F. A. 2000. Las algas, indicadoras de la calidad del agua. Fac. de Ciencias Exactas, Dpto. de Ciencias Naturales, UNRC. www.produccion-animal.com.ar

Metodología para el establecimiento del estado ecológico según la directiva marco del agua en la Confederación Hidrográfica del Ebro. Protocolo de muestreo y análisis para: Fitoplancton, Fitobentos (Microalgas Bentónicas), Macrófitos, Invertebrados Bentónicos, Ictiofauna. 2005. Ministerio del Medio Ambiente. 27-59 pp.

Mihelcic J. R., Auer M. T., Hand D. W., Honrath R. E., Perlinger J. A., Urban N. R. 2001. Fundamentos de Ingeniería Ambiental. Editorial Limusa Wiley. México D.F. 333-344 pp.

Moreno R. J. L., Tapia G. M., González M. M. C., Figueroa T. M. G. 2008. Fitoplancton del río Tehuantepec, Oaxaca, México y algunas relaciones biogeográficas. Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol. ISSN-0034-7744) Vol. 56 (1): 27-54. Pp 27-35

Moreno F. D. P., Quintero M. J., López C. A. 2010. Métodos para la identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco. Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal ICyTDF. 25-32 pp. <http://www.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n78ne/eutrofia2.pdf>.

NEN 6472, 1983. Water-photometric determination of ammonium content, 1983. Dutch Normalization Institute.

Ospina A. N., Peña, J. E. 2004. Alternativas de Monitoreo de Calidad de Aguas: Algas como Bioindicadores. No. 4. Acta Nova.

Ordenamiento Ecológico del Territorio del Municipio de Durango, 2005.

Parra O. 2006. Estado de conocimiento de las algas dulceacuícolas de Chile (Excepto bacillariophyceae). Guyana 70(1). Universidad de Concepción Chile. 8-15 pp.

Peinador M. 1999. Las cianobacterias como indicadores de contaminación orgánica. *Rev. Biol. Trop.*, 47(3): 381-391, www.ucr.ac.cr/www.ots.duke.edu. 382-391pp.

Peña S. E. J., Palacios P. M. L., Ospina A. N. 2005. Algas como indicadores de contaminación. Editorial Universidad del Valle. 85-84 pp. Libro electrónico http://www.lalibreriadelau.com/biologia-ca29_47/libro-algas-como-indicadoras-de-contaminacion-p2243

Pérez C. A. G, Rodríguez A. 2008. Índice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación. No. 4. *Revista de Biología Tropical*, vol. 56. Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. 1905-1918 pp.

Pérez L. M. E., Burciaga S. M. E., Vicencio R. M. G., Martínez P. A., González S. G. 2006. Evaluación en el tiempo y espacio del efecto de vertidos puntuales y difusos sobre la calidad del río Tunal.. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) – Instituto Politécnico Nacional (IPN). Unidad Durango. Durango, México.

Ramírez V. M., Beltrán M. Y., Bojorge G. M., Carmona J. J., Cantoral U. E. A, Valadez C. F. 2001. Flora Algal del Río LA Magdalena Distrito Federal, México. *Boletín de la sociedad Botánica de México*, A.C. 45-67 pp.

Rivera G. M., Gómez G. L. 2010. Identificación de cianobacterias potencialmente productoras de cianotoxinas en la curva de salguero del río Cesar. N°. 31. *Revista Luna Azul* ISSN 1909-2474. Universidad de Caldas. 9 pp.

Roset J., Aguayo S., Muñoz M. J. 2001. Detección de cianobacterias y sus toxinas. Una revisión. No. 002. *Revista de Toxicología*, año/vol. 18. Asociación Española de Toxicología. Pamplona, España. 65-71 pp.

Ruibal C. A. L. Rodríguez M. I., Angelacio C. M. 2005. Ocurrencia de cianobacterias y sus toxinas (microcistinas) en aguas del río de la Plata: evaluación rápida usando el ensayo Elisa. XX congreso nacional del agua y III simposio de recursos hídricos del cono Sur. Mendoza, Argentina.

Salusso M. M. 2005. Evaluación de la calidad de los recursos hídricos superficiales en la alta cuenca del Juramento (Salta). Tesis doctoral. Biblioteca Digital de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales – Universidad de Buenos Aires. www.digital.bl.fcen.uba.ar. 194 pp.

SEDUE. 1989. Acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos de calidad del agua; CE-CCA-001/89. Publicado en el Diario Oficial de la Federación del 2 de diciembre de 1989. Tomo CDXXX, No. 9, México, D.F.

Seeligmann C., Tracanna B. C., Martínez M. S., Isasmendi S. 2001. Algas fitoplanctónicas en la evaluación de la calidad del agua de sistemas lóticos en el noroeste argentino. *Limnetica* 20(1): 123-133. O Asociación Española de Limnología, Madrid. Spain. ISSN: 021 3-8409. Pp 131.

Seisdedo M., Arencibia G., Moreira, A. R. 2010. Análisis comparativo del estado trófico de las aguas de la bahía de Cienfuegos, Cuba. *Rev. Invest. Mar.* 31(2):124-130. Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC). 124 -130 pp.

Sosa M. L., Novoa M. D., Martínez F. A. 2011. Ficoflora de la cuenca endorreica fluvio-lacustre Chucul (Córdoba, Argentina). *Revista de las DES Ciencias Biológicas Agropecuarias*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 15-23 pp.

UNESCO. 2009. Cianobacterias Planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión. No. 16. Documento Técnico PHI-LAC.

Vicencio, R. M. G., Villanueva, F., Pérez, L. M. E., Burciaga, S. M. E. 2007. Índice de Calidad del Agua del Río Mezquital de Durango. CIIDIR-IPN, Unidad Durango.

Van Den Hoek C. y Jahns, H. M. 1995. *Algae. Introduction to phycology*. Cambridge University Press. Cambridge.

Vicencio R. M. G., Villanueva F., Pérez L. M. E., Burciaga S. M. E. 2007. Índice de calidad del agua del río Mezquital de Durango. *Memorias del VI Congreso Internacional de Ciencias Ambientales*. Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, Chih. México, 6 al 8 de junio, CD-R.

Wehr J. D., Sheath R. G. 2010. *Freshwater Algae of North America, Ecology and classification*. Copyright 2003, Elsevier Science (USA).

X. ANEXOS

Anexo 1. Valores de los parámetros fisicoquímicos durante los tres muestreo

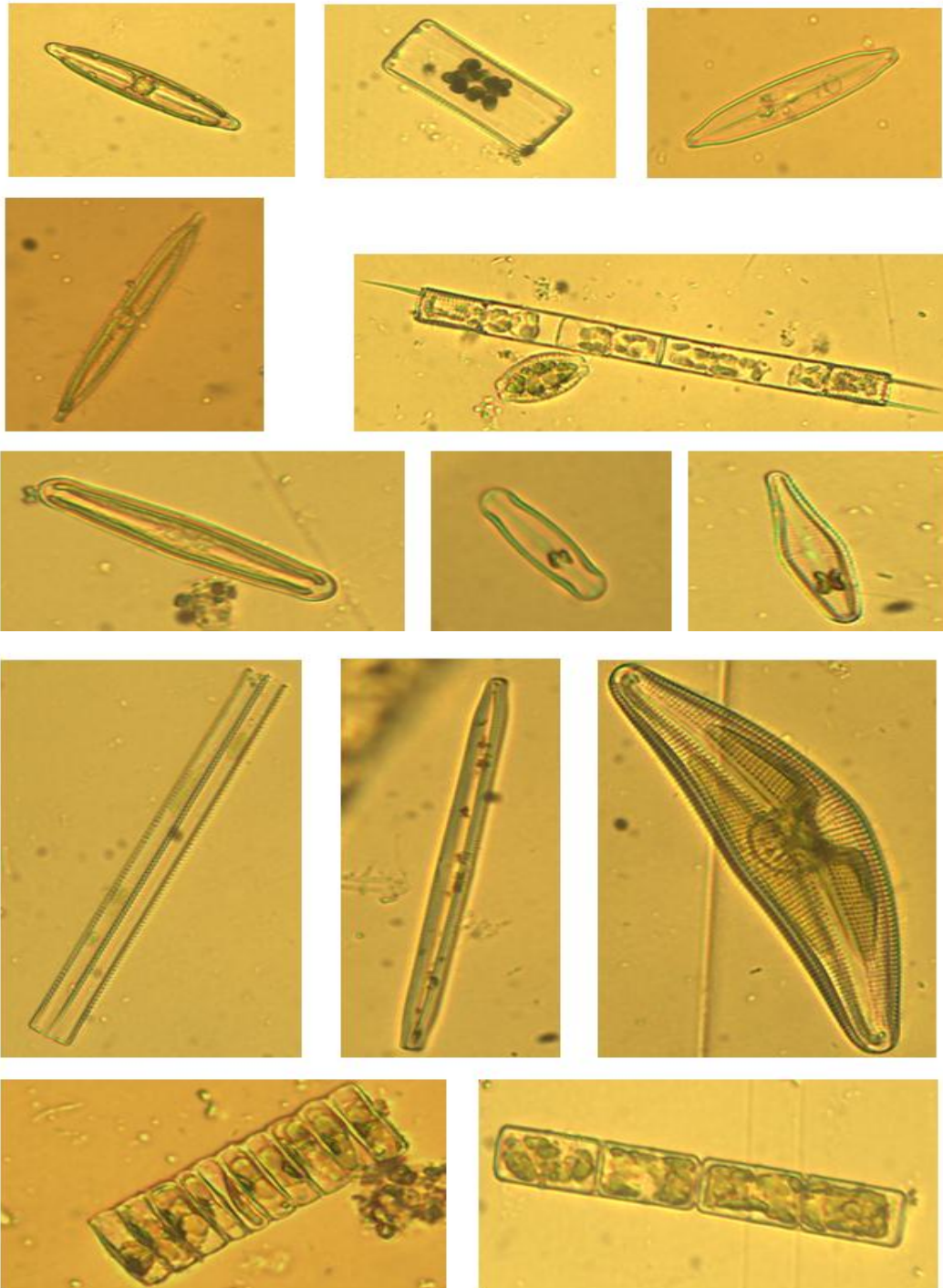
Muestreo de junio del 2011									
Sitios	pH	CE μs/cm	OD mg/L	% Saturación de oxígeno	Tem °C	NO ₃ ⁻ mg/L	PO ₄ ⁻³ mg/L	NH ₃ mg/L	Coliforme s Fecales UFC/mL
El Saltito	8.12	162.55	5.48	81	23.7	0.1	0.41	1.98	17
La Punta	7.45	140.18	0.11	1.75	21.95	0.083	0.56	2.10	75
El Arenal	9	121.08	8.44	145.53	30.05	0.05	0.99	1.84	17
Puente El Tunal	8.10	126.45	3.91	59.95	25.45	1.46	3.96	3.74	12
Puente San Carlos	-	-	-	-	-	-	-	-	-
La Ferrería	7.55	123	6.00	83.85	20	0.47	0.05	2.18	41
El Pueblito	8.01	233.50	8.15	111.45	19.25	0.75	0.07	1.74	63

Muestreo de noviembre del 2011									
Sitios	pH	CE μs/cm	OD mg/L	% Saturación de oxígeno	Tem °C	NO ₃ ⁻ mg/L	PO ₄ ⁻³ mg/L	NH ₃ mg/L	Coliforme s Fecales UFC/mL
El Saltito	8.29	575.2 5	6.18	73.15	13.55	0.17	3.07	1.83	13
La Punta	7.67	1039. 5	2.88	34.1	13.4	50.39	1.77	1.86	17
El Arenal	8.42	717	8.76	115.6	18.15	0.68	8.11	5.85	20
Puente El Tunal	7.79	584	8.84	109.25	14.95	8.01	4.06	1.78	10
Puente San Carlos	7.77	755	0.31	3.75	15.5	0.16	15.12	4.12	31000
La Ferrería	7.62	213.5	6.59	80.2	14.25	5.50	0.015	1.96	9
El Pueblito	7.98	111.2 8	7.49	90.45	13.8	5.04	0.01	1.96	7

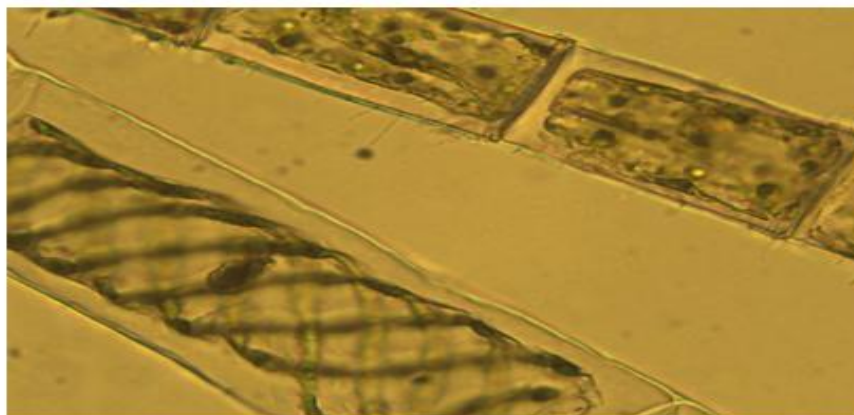
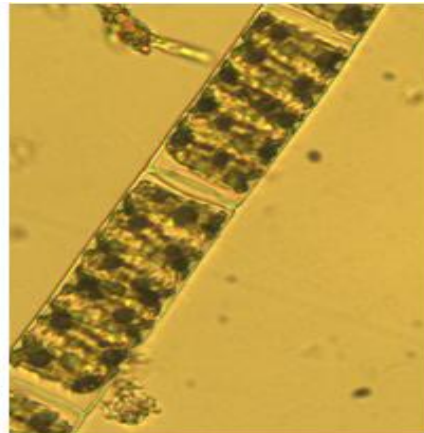
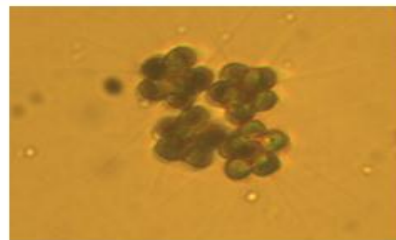
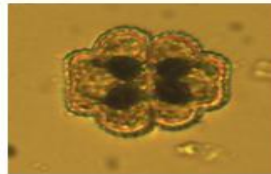
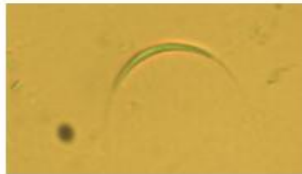
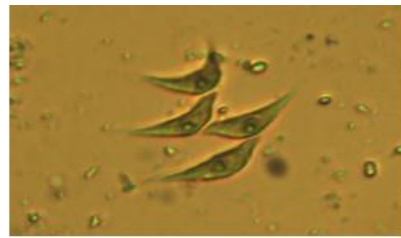
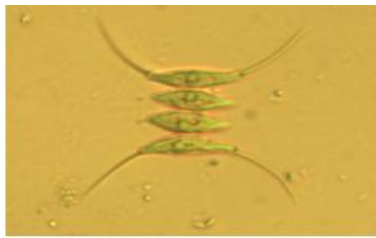
Muestreo de noviembre del 2011									
Sitios	pH	CE μs/cm	OD mg/L	% Saturación de oxígeno	Tem °C	NO ₃ ⁻ mg/L	PO ₄ ⁻³ mg/L	NH ₃ mg/L	Coliforme s Fecales UFC/mL
El Saltito	8.29	575.2 5	6.18	73.15	13.55	0.17	3.07	1.83	13
La Punta	7.67	1039. 5	2.88	34.1	13.4	50.39	1.77	1.86	17
El Arenal	8.42	717	8.76	115.6	18.15	0.68	8.11	5.85	20
Puente El Tunal	7.79	584	8.84	109.25	14.95	8.01	4.06	1.78	10
Puente San Carlos	7.77	755	0.31	3.75	15.5	0.16	15.12	4.12	31000
La Ferrería	7.62	213.5	6.59	80.2	14.25	5.50	0.015	1.96	9
El Pueblito	7.98	111.2 8	7.49	90.45	13.8	5.04	0.01	1.96	7

Anexo 2. Grupos de algas identificados en los sitios de estudio

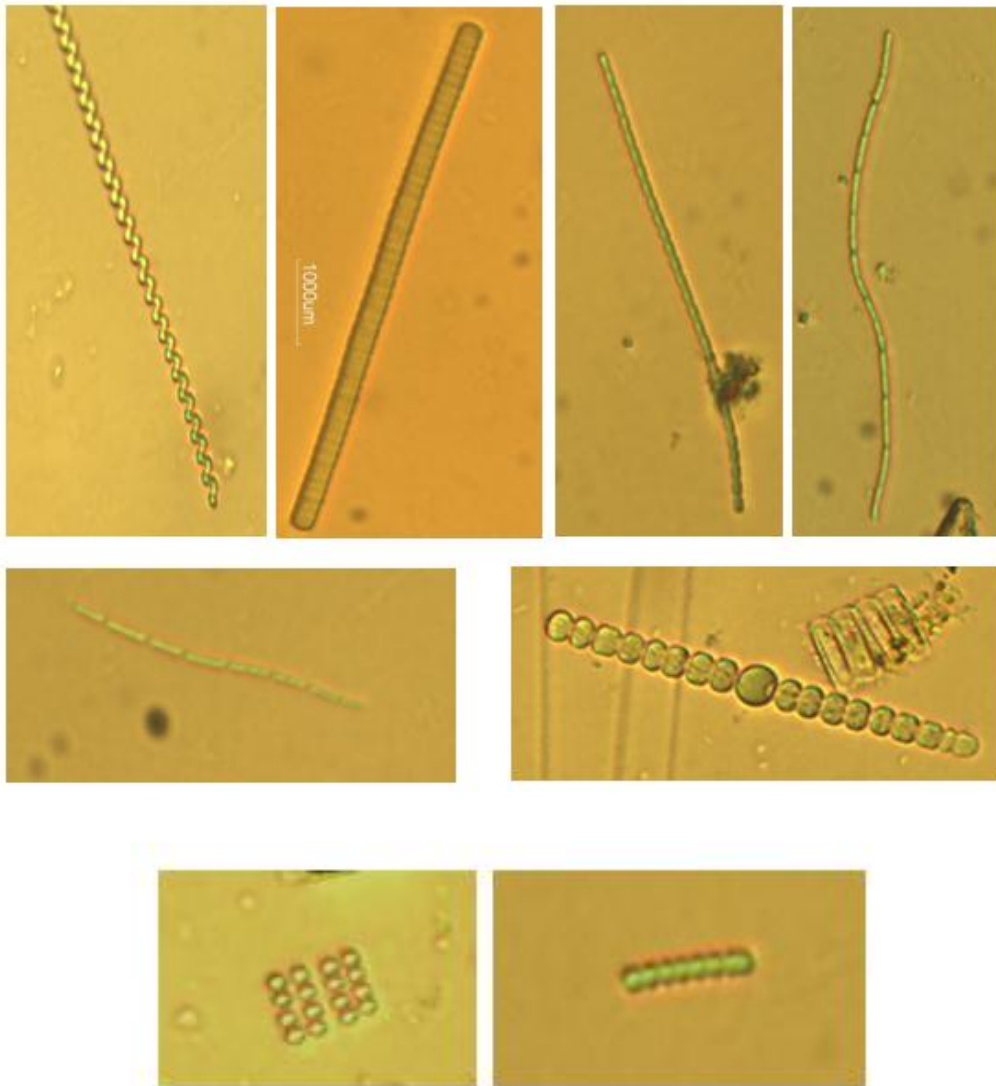
Bacillariophytas



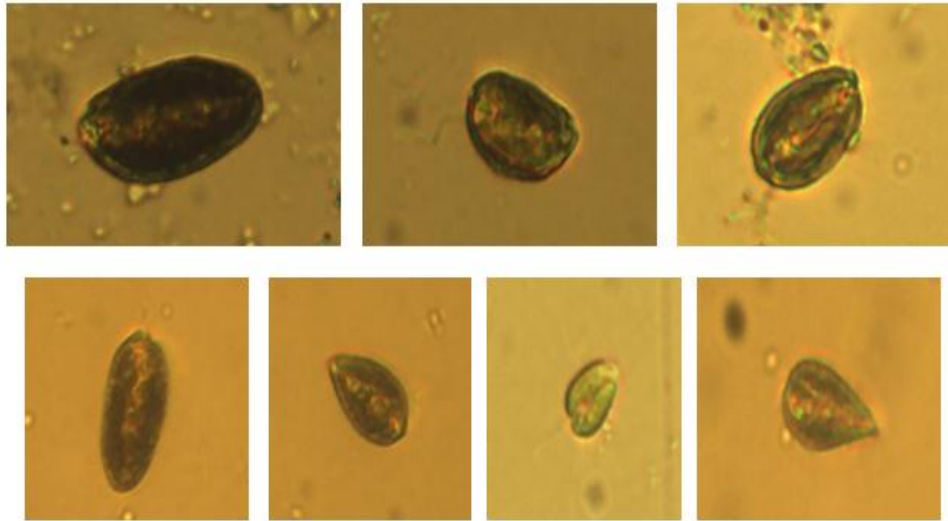
Chlorophytas



Cianophytas



Cryptophytas



Euglenophytas

