



**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR**

**Escuela de Biología Aplicada**

**TESINA DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE BIÓLOGO  
AMBIENTAL**

TEMA:

**“EFECTOS DEL DERRAME DE PETRÓLEO SOBRE LA COMUNIDAD  
FITOPLANCTÓNICA DE LA LAGUNA DE PAPALLACTA Y SUS  
PRINCIPALES AFLUENTES”**

AUTOR:

**MARCOS GONZALO MOLINA SANTOS**

DIRECTOR DE TESIS

**DR. ESTEBAN TERNEUS**

QUITO, ECUADOR

2013

II

## CERTIFICACIÓN

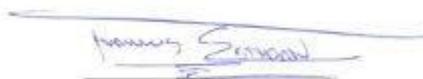
### CERTIFICACIÓN

Yo, Marcos Gonzalo Molina Santos, con cédula de identidad N° 0502404544, declaro que soy el autor exclusivo de la presente investigación y que ésta es original, auténtica y personal mía. Todos los efectos académicos y legales que se desprenden de la presente investigación, serán de mi sola y exclusiva responsabilidad. Además, cedo los derechos a la Universidad Internacional del Ecuador para que sea publicado y divulgado en internet.



Marcos Gonzalo Molina Santos

Yo, Héctor Esteban Terneus Jácome, declaro que, en lo que personalmente conozco, el señor, Marcos Gonzalo Molina Santos, es el autor exclusivo de la presente investigación y que ésta es original, auténtica y personal.



Héctor Esteban Terneus Jácome

## AGRADECIMIENTO

A Dios por mantenerme todavía en este mundo.

Gracias, con todo mi amor, a mis padres Marco y Nora por haberme apoyado en cada etapa de mi vida y no solamente durante el tiempo que me tomó realizar esta investigación, ustedes han sido el mejor ejemplo de vida que he tenido.

A todos aquellos que pusieron su tiempo y conocimiento en el desarrollo de esta tesis, en especial, al Dr. Esteban Terneus, que supo guiarme con gran dedicación para obtener un buen trabajo; a mis lectores, Lcda. Cecilia Puertas y M.Sc. Patricio Yáñez que aportaron con su experiencia al mejoramiento del mismo.

A mis hermanos Vicky y Brian, por ser como son, y estar siempre pendientes de pelear conmigo o hacerme reír cuando los necesito, mi vida no sería tan buena sin ustedes, los amo.

A esa persona que ha estado conmigo en tantas etapas, Astrid, a quien le agradezco con todo el corazón por escucharme, apoyarme y mantenerse junto a mí a lo largo de todos estos años.

Gracias Paco por traer siempre algo positivo cuando lo he necesitado y ayudarme sin dudar cuando lo he pedido.

Abuelos, aunque ya no estén conmigo sus enseñanzas no se pueden superar, estas me guían por el camino correcto, aunque no los pueda ver, muchas gracias por haber sido parte de mi vida, nunca los olvidaré.

Chelsea por dormir todo el tiempo, haciéndome compañía noche y día.

## **DEDICATORIA**

*A mis padres por siempre estar conmigo y nunca permitir que falle, no pude haber pedido mejores personas para que me enseñen lo que es la vida, a mis abuelos por la infancia feliz que me brindaron, tienen un lugar muy especial en mi corazón.*

## Índice de Contenidos

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN .....	3
1.1. Antecedentes .....	4
1.2. Planteamiento del problema .....	6
1.3. Justificación.....	8
1.4. OBJETIVOS .....	10
CAPÍTULO II	
METODOLOGÍA .....	11
2.1. Área de Estudio .....	11
2.2. Vegetación del lugar.....	12
2.3. Fauna del lugar.....	13
2.3.1. Invertebrados .....	13
2.3.2. Anfibios y Reptiles.....	13
2.3.3. Aves.....	14
2.3.4. Mamíferos .....	14
2.3.5. Peces.....	14
2.4. Ubicación de puntos de muestreo.....	15
2.5. Procedimiento de muestreo .....	15
2.6. Análisis de laboratorio .....	19
2.7. Análisis de datos .....	21
2.7.1. Análisis de factores abióticos.....	22
2.7.2. Análisis de la biota .....	22
2.7.3. Análisis Canónico de Correspondencias .....	23

## CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO.....	24
3.1. Ecosistemas de agua dulce de altura .....	24
3.2. Efectos de la contaminación petrolera en ecosistemas de agua dulce.....	25
3.3. Fitoplancton.....	28
3.3.1. Tipos de fitoplancton.....	30
3.3.2. Tamaño y forma .....	30
3.3.3. Dinámica ecológica del fitoplancton.....	32
3.4. Fitoplancton como bioindicador.....	35
3.4.1. Criterios para la definición de bioindicadores.....	36
3.5. Taxonomía.....	37
3.6. Identificación.....	38
3.7. Análisis de las variables abióticas .....	38
3.8. Influencia de la estacionalidad sobre las comunidades fitoplanctónicas.....	41

## CAPÍTULO IV

HISTORIA NATURAL DE LOS GÉNEROS ENCONTRADOS EN PAPALLACTA .....	43
4.1. Diatomeas Centrales.....	43
4.1.1. <i>Melosira</i> sp.....	43
4.1.2. <i>Cyclotella</i> sp.....	45
4.2. Diatomeas Penales.....	46
4.2.1. <i>Cymbella</i> sp.....	47
4.2.2. <i>Diploneis</i> sp.....	48
4.2.3. <i>Hantzschia</i> sp. ....	49
4.2.4. <i>Nitzschia</i> sp. ....	51
4.2.5. <i>Frustulia</i> sp. ....	52
4.2.6. <i>Neidium</i> sp.....	53
4.2.7. <i>Campylodiscus</i> sp.....	54
4.2.8. <i>Pinnularia</i> sp.....	55
4.2.9. <i>Rhopalodia</i> sp.....	56
4.2.10. <i>Surirella</i> sp.....	58

4.2.11. <i>Navícula</i> sp.....	59
4.2.12. <i>Synedra</i> sp. ....	61
4.3. Cianobacterias (algas verde – azules) .....	62
4.3.1. <i>Microcystis</i> sp.....	63
4.3.2. <i>Oscillatoria</i> sp.....	64
4.3.3. <i>Spirulina</i> sp. ....	66
4.4. Chlorophyta (algas verdes).....	67
4.4.1. <i>Ankistrodesmus</i> sp. ....	67
4.4.2. <i>Mougeotia</i> sp. ....	69
4.4.3. <i>Spirogyra</i> sp. ....	70
4.4.4. <i>Rhizoclonium</i> sp .....	71

## CAPÍTULO V

RESULTADOS .....	73
5.1. Especies de fitoplancton encontradas en Papallacta.....	73
5.2. Análisis de las variables abióticas .....	74
5.2.1. Análisis de correlaciones múltiples.....	75
5.3. Análisis de clasificación considerando datos abióticos (Cluster Analysis).....	78
5.3.1. Época seca.....	78
5.3.2. Época de transición .....	79
5.3.3. Época de lluvia.....	81
5.4. Análisis de la Biota .....	82
5.4.1. Índice de tolerancia a la contaminación orgánica de Palmer (Taylor <i>et al.</i> , 1979). ..	82
5.5. Análisis de clasificación considerando datos bióticos por campaña .....	83
5.5.1. Época seca.....	83
5.6. Análisis Canónico de Correspondencias .....	87
5.6.1. Análisis multifactorial de parámetros físicos, químicos y biológicos .....	87

## CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....	92
--------------------------------	----

RECOMENDACIONES .....	103
LITERATURA CITADA.....	104
ANEXOS.....	112
Glosario.....	121

## Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de los puntos de muestreo en la laguna de Papallacta .....	11
Figura 2. Puntos de muestreo en la microcuenca de los ríos Sucus y Tambo.....	12
Figura 3. Recolección con botella Van Dorn.....	16
Figura 4. Almacenamiento de muestras.....	16
Figura 5. Disco Secchi (superficie). .....	17
Figura 6. Disco Secchi (sumergido). .....	17
Figura 7. Recolección con Red Surber .....	18
Figura 8. Equipos utilizados para la toma de datos .....	18
Figura 9. Embudos de decantación.....	19
Figura 10. Centrífuga .....	19
Figura 11. Placa cóncava para observación de muestras .....	20
Figura 12. Parte de una gota de fitoplancton .....	20
Figura 13. <i>Melosira</i> sp.....	43
Figura 14. <i>Cyclotella</i> sp.....	45
Figura 15. <i>Cymbella</i> sp.....	47
Figura 16. <i>Diploneis</i> sp.....	48
Figura 17. <i>Hantzschia</i> sp. ....	49
Figura 18. <i>Nitzschia</i> sp. ....	51
Figura 19. <i>Frustulia</i> sp. ....	52
Figura 20. <i>Neidium</i> sp. ....	53
Figura 21. <i>Campylodiscus</i> sp.....	54
Figura 22. <i>Pinnularia</i> sp.....	55
Figura 23. <i>Rhopalodia</i> sp. ....	56
Figura 24. <i>Surirella</i> sp.....	58
Figura 25. <i>Navicula</i> sp.....	59
Figura 26. <i>Synedra</i> sp. ....	61
Figura 27. <i>Mycrocystis</i> sp.....	63
Figura 28. <i>Oscillatoria</i> sp.....	64
Figura 29. <i>Spirulina</i> sp. ....	66
Figura 30. <i>Ankistrodesmus</i> sp.....	67
Figura 31. <i>Mougeotia</i> sp.....	69
Figura 32. <i>Spirogyra</i> sp. ....	70
Figura 33. <i>Rhizoclonium</i> sp. ....	71
Figura 34. Diagrama de dispersión temperatura y conductividad .....	76
Figura 35. Diagrama de dispersión temperatura y sólidos suspendidos In situ .....	76
Figura 36. Diagrama de dispersión conductividad y sólidos suspendidos In situ.....	77
Figura 37. Diagrama de dispersión DBO y DQO.....	77
Figura 38. Diagrama de dispersión conductividad y sólidos suspendidos In situ.....	77

Figura 39. Dendrograma de similitud de los sitios muestreados en la época seca; basado en los datos abióticos registrados utilizando medidas de distancia euclidiana. ....	79
Figura 40. Dendrograma de similitud de los sitios muestreados en la época de transición; basado en los datos abióticos registrados utilizando medidas de distancia euclidiana. ....	80
Figura 41. Dendrograma de similitud de los sitios muestreados en la época de lluvia; basado en los datos abióticos registrados utilizando medidas de distancia euclidiana. ....	81
Figura 42. Dendrograma de similitud entre sitios de muestreo en la época seca, basado en datos bióticos (fitoplancton) utilizando el Índice de Steinhaus. ....	83
Figura 43. Dendrograma de similitud entre sitios de muestreo en la época de transición, basado en datos bióticos (fitoplancton) utilizando el Índice de Steinhaus. ....	85
Figura 44. Dendrograma de similitud entre sitios de muestreo en la época de lluvia, basado en datos bióticos (fitoplancton) utilizando el Índice de Steinhaus. ....	86
Figura 45. Plano de ordenamiento de variables físico-químicas y biológicas en el área de estudio, a partir de un Análisis Canónico de Correspondencias .....	88
Figura 46. Plano de ordenamiento de variables físico-químicas y puntos de muestreo en el área de estudio, a partir de un Análisis Canónico de Correspondencias.....	90

## Índice de Tablas

Tabla 1. Características de diferentes grupos biológicos que se utilizan como bioindicadores de calidad de agua.....	36
Tabla 2. Grupos principales de fitoplancton de agua dulce .....	37
Tabla 3. Géneros de microalgas encontrados en Papallacta correspondientes a laguna y río.....	73
Tabla 4. Niveles de correlación (Pearson) de las variables abióticas para las tres estacionalidades .....	75
Tabla 5. Suma de los índices asignados por Palmer (IP) con los géneros encontrados en Papallacta .....	82

## RESUMEN

En abril de 2003 se produjo un derrame de crudo en la zona de Papallacta, luego del desastre se realizaron labores de biorremediación tanto en la laguna como en sus afluentes, sin embargo no se conocía sobre el estado de salud ecológica de las zonas afectadas antes del derrame, por lo que se realizó un estudio utilizando bioindicadores para evaluar los cambios en la zona. Se recogieron 28 muestras de fitoplancton, tanto en río como en la laguna, durante las épocas seca, transición y lluviosa, desde diciembre 2010 hasta julio 2011; luego de eso se realizaron conteos de los géneros encontrados por cada punto de muestreo, estos fueron identificados en laboratorio y se realizó una investigación bibliográfica sobre la historia natural de cada grupo de algas. Los géneros encontrados pertenecen a tres grupos importantes de fitoplancton: diatomeas, cianobacterias y algas verdes, de estos, el primero es el grupo con mayor distribución y con los valores de riqueza y abundancia más altos. Las correlaciones entre géneros y las variables abióticas de cada sitio presentaron diferenciación debido a que por la estacionalidad se presentan características distintas y los valores de las variables abióticas cambian significativamente; sin embargo la constante presencia de ciertos grupos como *Synedra* y *Oscillatoria*, indicadores de alta carga orgánica, se presentaron en cada campaña de muestreo, y a pesar de que nunca se realizó un estudio de evaluación de este tipo, previo al derrame, la presente investigación aporta información acerca de los grupos que ahora predominan, tanto en laguna como en sus afluentes y las características que influyen en su distribución y permiten determinar el estado de salud ecológica de la laguna de Papallacta.

**Palabras clave:** fitoplancton, derrame petrolero, bioindicador, calidad de agua, contaminación, Papallacta, limnología.

## ABSTRACT

In April 2003 an oil spill took place in the Papallacta area, right after the disaster bioremediation labors started in the lagoon and its affluents, however, the ecological health of the areas affected was undetermined before the spill so a study had to be done using phytoplankton as bioindicators to evaluate the changes in the area. Samples were collected in 28 sites in the lagoon and the rivers in three seasons: summer, transition and winter from November 2010 to April 2011, then the genera found were counted in laboratory, identified and a research of its natural history was done. The genera found belong to three important groups of phytoplankton: diatom, cyanobacteria and green algae; the first of these groups shows a wider distribution and has the highest richness and abundance. In each season the correlations between genera and the abiotic variables of each site presented a difference because every season carries different characteristics and these abiotic variables values change as well; nevertheless groups as *Synedra* and *Oscillatoria*, that are good to determine organic pollution, are always present in each campaign, and besides the fact that there are not previous studies of this type in the area, the findings of this research can contribute to the knowledge of the organisms found today on the lagoon and the rivers and also the conditions that make this distribution possible.

**Keywords:** Phytoplankton, oil spill, bioindicator, water quality, pollution, Papallacta, limnology.

## **CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN**

En cualquier disturbio de un ecosistema, como un derrame de crudo, existe una etapa de monitoreo y control necesaria para evaluar el estado de salud ecológica del sitio donde se aplicó un plan de biorremediación ambiental, para esto se requiere establecer un sistema que conste de varias partes que permita evaluar los cambios que se presentan en el medio, históricamente han sido físico-químicos pero en décadas recientes se ha hecho cada vez más común el uso de bioindicadores, en este caso uno muy importante es el fitoplancton, que se utiliza para evaluar la calidad de agua, porque al ser la base de la cadena trófica acuática pueden aportar con información más específica sobre las repercusiones de la contaminación en un medio, de manera más precisa y con datos que no se obtienen de las variables abióticas (Bellinger y Sigee, 2010).

El número de especies de fitoplancton en el mundo es aún desconocido, solamente en el océano se estiman unas 5000 especies, este número puede ser aún mayor en ecosistemas acuáticos continentales como lagunas, ya que no forman un solo cuerpo de agua, más bien son sistemas interconectados (río-laguna) y se presentan aislados, a diferencia del océano que es un ambiente que ocupa una mayor área con similares características en relación a lagunas y ríos, que están influenciados por cambios estacionales y variables abióticas inconstantes, que pueden ser determinantes para la diversidad del fitoplancton (O'Sullivan y Reynolds, 2004).

El fitoplancton posee varias características que permiten analizar el estado de su hábitat, tales como el balance de nutrientes, adaptaciones a varios factores del medio, nutrición heterotrófica, adaptación a límites de luz, movimiento sobre el agua, entre otras. Estas particularidades hacen que el estudio de estas especies sea importante para comprender el estado del medio en el que habitan, ya que estas características cambian de acuerdo a las variaciones del sitio y el fitoplancton se adapta a ellas en muchos casos (O'Sullivan y Reynolds, 2004).

Existen varios factores relacionados con el cambio climático global que tienen un efecto sobre la biodiversidad y función de los ecosistemas, en cualquier caso donde se altera un ecosistema, sobre todo a grandes altitudes, el riesgo para el ecosistema es mayor ya que en muchos casos son pocas las especies encargadas de la producción primaria (Delgado *et al.*, 2009), en el caso de una laguna, la cadena trófica depende mucho de ciertas especies de fitoplancton para esta producción por lo que si se ven afectadas, la biodiversidad de todo el entorno corre un alto riesgo.

Varios factores causantes de estrés sobre las comunidades fitoplanctónicas, como la radiación UV, eutrofización, acidificación y el mismo calentamiento global, pueden actuar de manera sinérgica o antagónica entre ellos (Delgado *et al.*, 2009; Bellinger y Sigee, 2010); por lo que emitir una evaluación en base a estudios de fitoplancton requiere de varios análisis para obtener buenos resultados, tomando en cuenta el efecto acumulado que pueden tener todos estos factores con el estado de la laguna luego del derrame.

El estudio de fitoplancton realizado en esta tesis es parte de un proceso de evaluación, con el fin de determinar el estado de salud ecológica de la laguna de Papallacta y los mencionados afluentes luego del proceso de biorremediación.

### **1.1. Antecedentes**

En la madrugada del 8 de abril del 2003, cerca de las 04h00, se produjo un derrame de crudo en la zona de Papallacta, el Sistema del Oleoducto Transecuatoriano (SOTE) presentó una ruptura en la tubería que provocó un derrame sobre los cauces de los ríos Sucus, Tambo y Cachalarca (Petroecuador, 2006), afectando igualmente a la Laguna de Papallacta. El derrame ocurrió en una zona conocida como el Guango a 3631 msnm (Andrade *et al.*, 2005), en las coordenadas E 812,820 N 9, 959,586 (WGS84), sobre el río Sucus.

Se derramaron 22000 barriles, una parte de este petróleo se disolvió en el agua mientras que con el paso de las horas se produjo un flujo continuo por los ríos Tambo y

Sucus hacia la laguna. En principio se pudo ver una capa de petróleo de entre 0.1 y 70 cm de espesor en un área de aproximadamente 6.5 hectáreas de la laguna, luego por procesos naturales, el crudo se precipitó al fondo (Aveiga *et al.*, 2005). Además se pudo observar que cerca al sitio del derrame el suelo estaba cubierto con una capa de petróleo de seis centímetros de espesor, afectando no solamente el agua sino también la flora y la fauna del lugar (Andrade *et al.*, 2005; Petroecuador, 2006).

Petroecuador inició rápidamente un plan de contingencia para detener los efectos sobre el ecosistema; luego de la evaluación correspondiente se empezó con el programa de biorremediación, el cual contempló trabajos de remediación en el sitio de la rotura, las riberas de los ríos Tambo y Sucus, suelo y agua contaminados al borde y en la misma laguna, todo como parte del proceso de restauración de los ecosistemas afectados (Petroecuador, 2006). Se estableció un período de nueve meses para trabajos de remediación y monitoreo desde la emisión de la orden de trabajo, consecuentemente se han elaborado varios informes de distintos organismos evaluando el trabajo que se realizó en la zona afectada, es importante destacar que la recuperación se catalogó como de mediano a largo plazo para los sitios afectados (Andrade *et al.*, 2005; Petroecuador, 2006).

La biorremediación estuvo a cargo de Ecuavital S.A. quienes empezaron los trabajos de recuperación en noviembre del 2003, finalizando en mayo del siguiente año. Se extrajo el material contaminado para luego estabilizarlo, separarlo y transportarlo a unidades de tratamiento biológico (Aveiga *et al.*, 2005).

En los ríos se usaron dos procedimientos simultáneos, uno consiste en recuperar lo que se puede del sedimento contaminado mediante el uso de barreras oleofílicas que recogen el petróleo en el cauce de los ríos, el otro proceso consiste en filtrar el material contaminado mediante barreras de celulosa que atrapan los hidrocarburos. Además se lavaron las orillas contaminadas a lo largo de los ríos con bombas de presión de agua entre 150 y 200 psi (Aveiga *et al.*, 2005; Petroecuador, 2006).

En laguna se utilizaron unidades de adsorción por contacto para extraer el petróleo de la superficie y filtros conectados a unidades separadoras (skimmers) que permiten la extracción de los hidrocarburos del agua (Aveiga *et al.*, 2005; Petroecuador, 2006).

En el caso de la vegetación contaminada se consideró que cuando presentaran un 60% de contaminación se incinere el material mientras que cuando es menos de este porcentaje se proceda a pulverizar el material y tratarlo en las unidades de tratamiento biológico (Aveiga *et al.*, 2005).

Steinitz-Kannan (1979) realizó un estudio comparativo de las algas de distintas lagunas del Ecuador continental y de las Islas Galápagos, una de las lagunas estudiadas fue precisamente la de Papallacta, en el trabajo se identifica a esta laguna como un sistema abierto ya que un río pasa a través del lugar y es la desembocadura de otras corrientes. La presencia de suelos ricos en humus alrededor de la laguna provoca que el agua sea ácida y con un color café, similar a otras lagunas de altura de los Andes y del Este de África, además no existe una estratificación de temperatura en los primeros 14 metros de profundidad desde la superficie.

Según los resultados de esa investigación las diatomeas son el grupo predominante en la laguna, siendo los géneros *Synedra*, *Pinnularia*, *Melosira* y *Fragilaria* los más comunes, además se encontraron una especie de *Amphora* y una especie de *Nitzschia* (Steinitz-Kannan, 1979).

## **1.2. Planteamiento del problema**

No existe ecosistema en el mundo, por más protegido que se encuentre y al cual el hombre tenga acceso, que esté completamente libre de disturbios externos, la laguna de Papallacta y sus afluentes a pesar de ser parte del actual Parque Nacional Cayambe-Coca están expuestos a contaminación debido al paso del oleoducto, prácticas agrícolas y productivas, construcción de carretera y actividades turísticas. El manejo del recurso agua en la zona ha sido siempre una prioridad por la importancia que tiene para Quito;

sin embargo eventos inesperados pueden presentarse, tal como sucedió en 2003 con la ruptura de la tubería de Petroecuador.

Las repercusiones del derrame sobre la biota y los componentes físico-químicos fueron significativas; según el examen de control ambiental presentado por Petroecuador, el derrame provocó una contaminación de magnitud alta, duración temporal, cobertura local, reversible y de recuperación a mediano plazo, sobre el agua, suelo y vegetación afectada (Petroecuador, 2006). La dinámica de los ecosistemas tanto en la laguna como en los ríos sin duda presentó cambios afectando directamente a los organismos que allí habitan; dado que el derrame ocurrió en una zona alta, cercana a las comunidades y sobre un río, la contaminación llegó a la laguna rápidamente, afectando todo a su paso, a esto se sumó la falta de estudios previos a fondo sobre las características de los sitios afectados por el derrame, lo que hace imposible una evaluación real del daño en ese lugar, por esto se recurrieron a estudios similares en otros países para comparar los puntos más complejos.

El crudo, debido a su densidad, afecta a todos los organismos que se encuentran en el medio contaminado (French-McCay *et al.*, 2011), la mayor parte de éste flota sobre la superficie; sin embargo, siempre que ocurre un derrame se observan también partículas a lo largo de la columna de agua (Fingas *et al.*, 2006; Ayolabi *et al.*, 2010), muchas de éstas se mantienen suspendidas cerca de la superficie, mientras que otras bajan al fondo y se pegan al sedimento (Fingas *et al.*, 2006) afectando directamente a los peces, macroinvertebrados y al plancton.

Los peces al alimentarse consumen inadvertidamente estas partículas ya que los organismos de los que se alimentan están contaminados, también se ven afectados a través de la piel o al ingerir agua (Alles, 2008; French-McCay *et al.*, 2011); además en el caso de Papallacta las truchas necesitan del sedimento (hábitat, alimentación), por lo que se ven aún más afectadas a nivel histológico, algo similar sucede con los macroinvertebrados, ya que el sedimento al estar contaminado, provoca que los huevos y larvas de éstos no se desarrollen, o los adultos mueran rápidamente debido a su sensibilidad a los cambios en el medio (French-McCay *et al.*, 2011).

El problema con este tipo de contaminación es que afecta directamente la producción primaria (Miller, 1977), es decir al fitoplancton, se inhibe la producción normal y se dan cambios en la dinámica de estas comunidades, lo que afecta directamente al zooplancton y consecuentemente a los siguientes eslabones en la cadena. El fitoplancton no solamente se puede ver afectado por el contacto directo del crudo, sino que debido a que un porcentaje se queda suspendido en la superficie, como se explicó anteriormente, crea una capa debajo de la cual se pueden presentar cambios de temperatura o se inhibe el paso de la luz del sol que es esencial para la fotosíntesis de estos organismos. En cualquiera de los casos la producción primaria del fitoplancton se ve afectada, por lo tanto el resto de organismos también (Miller, 1977; Olgún *et al.*, 2004).

### **1.3. Justificación**

El impacto ambiental causado tiene gran importancia de estudio y requiere ser evaluado, debido a que sucedió en un área protegida (Parque Nacional Cayambe-Coca), es por esto que el interés general acerca del tema es aún más significativo debido a que el impacto del derrame tuvo repercusiones sobre las comunidades humanas cercanas y no solamente sobre la biota del lugar, el problema incluso se pudo haber extendido hasta la ciudad de Quito, de no haber otras reservas de agua utilizables. Por esto fue importante realizar el presente monitoreo de manera que todas las partes involucradas encuentren algo de utilidad en el estudio para mejorar de alguna forma su situación o al menos comprender lo que se enfrenta con este problema.

Todo estudio científico de un ecosistema requiere el análisis de varios parámetros que permitan determinar el estado de salud ecológica, en este caso la laguna de Papallacta y los ríos Sucus y Tambo, que luego de haber sido afectados por el derrame cambiaron su dinámica y con ello la de los organismos que ahí habitan, requieren de un análisis biótico y abiótico para evaluar la relación de ambas partes con los cambios que se presentaron. De estos parámetros, el conteo y análisis de los grupos de fitoplancton es el más importante para este estudio, la investigación de la historia natural de las comunidades que existen en la laguna y sus afluentes son esenciales para

determinar la calidad de los cuerpos de agua, mediante comparación de existencia de grupos y características de cada uno de ellos. Es primordial este análisis ya que el fitoplancton se ha convertido en un importante bioindicador del estado ecológico de ecosistemas acuáticos. La razón principal para ser empleados como bioindicadores es por su relación con el proceso de eutrofización en lagunas o ecosistemas de aguas libres (Arce, 2006). Su estudio es aún más importante debido a la ocurrencia de enriquecimiento orgánico en la laguna, ya que los organismos dentro de este grupo pueden presentar diferentes adaptaciones a los cambios de materia orgánica dentro de su ecosistema, por ejemplo algunas pueden ser muy tolerantes donde otras son en extremo sensibles (Arce, 2006).

El fitoplancton presenta gran tolerancia a la contaminación orgánica y permite conocer los cambios que se presentan en las masas de agua donde ha habido contaminación (Arce, 2006), esto incluso puede ayudar en la determinación de especies capaces de degradar la materia orgánica o depurar el ambiente gracias a la fotosíntesis donde se agrega oxígeno, lo cual ayuda a la oxidación de dicha materia, además de aumentar los niveles de oxígeno disuelto en el agua que es utilizado por otros organismos (Arce, 2006; Suthers, 2009).

En presencia de metales pesados el fitoplancton es el primer grupo afectado y presenta un problema, no solamente para ellos mismo, sino también para los grupos superiores en la cadena trófica, porque no se contaminan solamente de manera superficial ya que absorben los metales a nivel celular, lo que lleva a una biomagnificación en los organismos que consumen fitoplancton y así de manera sucesiva en la cadena trófica (González, 1995; Bahnasawy *et al.*, 2011). El nivel de contaminación del fitoplancton depende de factores como temperatura, salinidad, concentración de oxígeno y pH del agua ya que este elemento es la fuente de donde viven y obtienen los nutrientes, por lo que se puede decir que el agua es la principal fuente de contaminación del fitoplancton cuando ésta se ve afectada (Bahnasawy *et al.*, 2011).

Los patrones de distribución y vida de fitoplancton se correlacionan en muchos casos con ciertas condiciones ambientales, principalmente con la temperatura, corrientes de agua y condiciones de luz, esto determina la dominancia de ciertos grupos, además los cambios estacionales y la disponibilidad de nutrientes pueden determinar la dominancia de otros, como es el caso de las algas verde-azules, algas verdes y diatomeas (Wu, 1984). Por esto es necesario realizar el estudio en períodos estacionales para que los resultados se puedan comparar y así obtener indicadores útiles de la calidad de agua.

De la mayoría de grupos que se estudian para este tipo de análisis las diatomeas representan el más idóneo, son dominantes en la mayoría de ecosistemas donde habitan en relación a otros grupos, tienen distribución cosmopolita, son fáciles de identificar y son muy sensibles o tolerantes a cambios ambientales (Arce, 2006), por lo que su estudio es relativamente sencillo.

#### **1.4. OBJETIVOS**

##### **Objetivo General**

- ❖ Evaluar el estado de salud ecológica de la laguna luego del proceso de biorremediación, mediante el análisis de la composición y estructura de la comunidad fitoplanctónica como bioindicadores de calidad de agua.

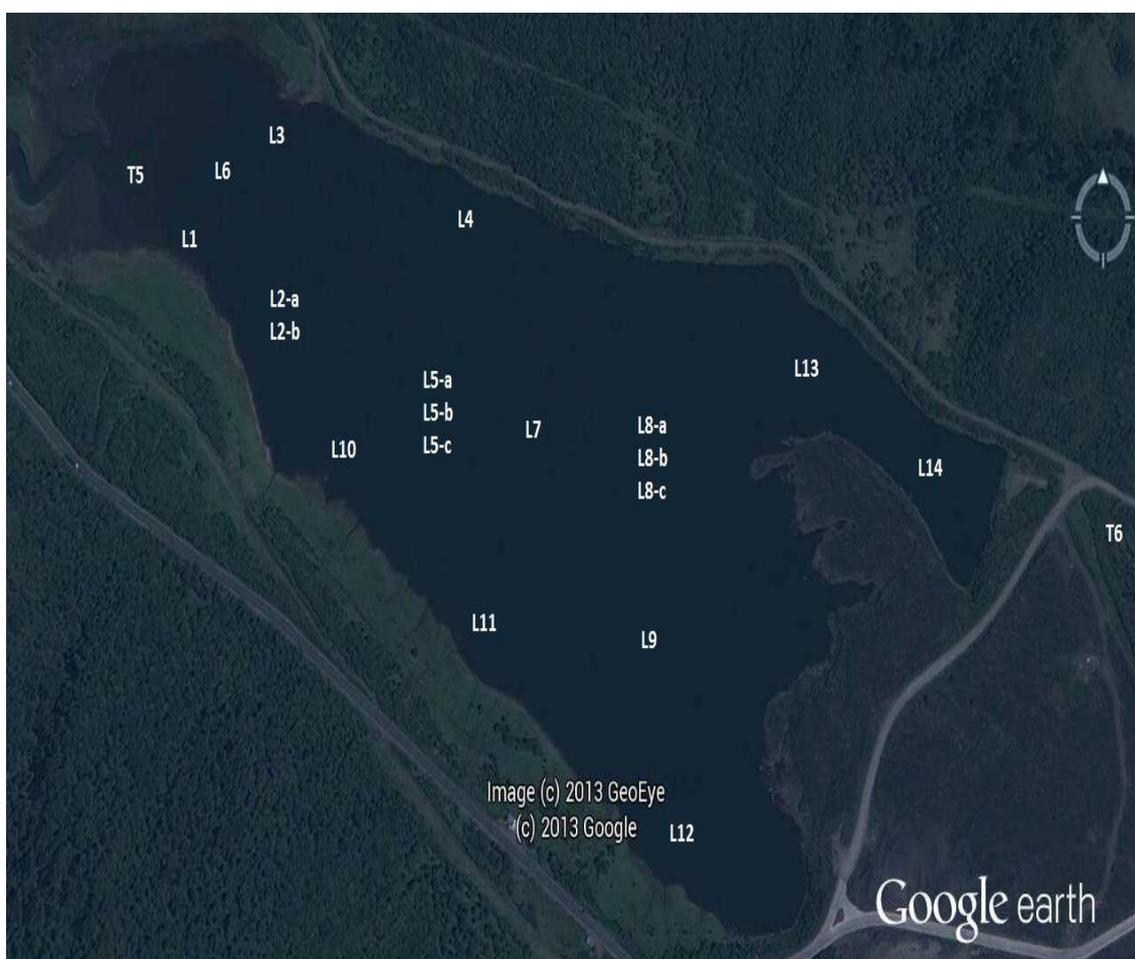
##### **Objetivos Específicos**

- ❖ Determinar las variaciones en la estructura y composición de las comunidades de fitoplancton tomando en cuenta la estacionalidad.
- ❖ Categorizar los grupos fitoplanctónicos en función de sus características de bioindicación.

## CAPÍTULO II METODOLOGÍA

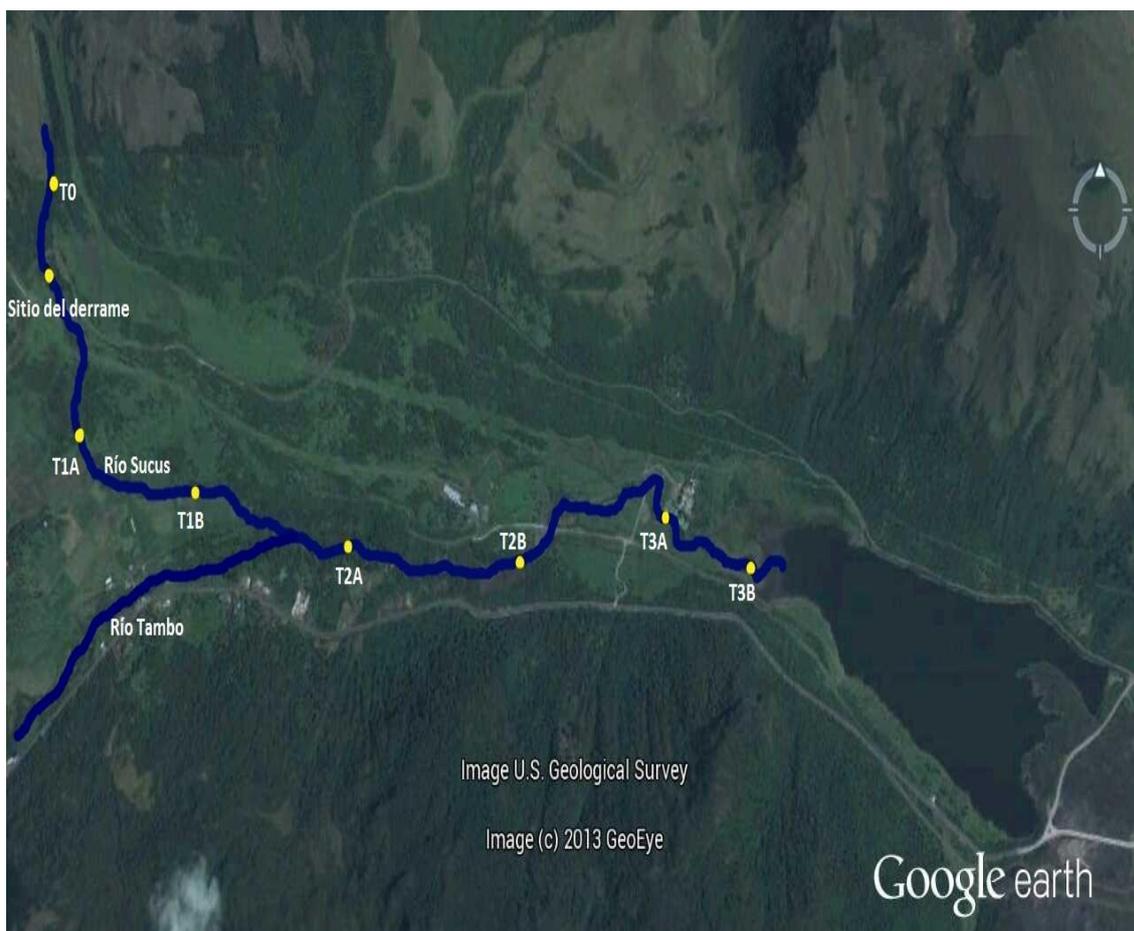
### 2.1. Área de Estudio

La laguna de Papallacta (Figura 1) está ubicada dentro de un área del Parque Nacional Cayambe-Coca dentro de la provincia de Napo, parroquia Papallacta, cantón Quijos, a 70 km al nororiente de Quito. Se encuentra a una altitud aproximada de 3354 msnm con temperaturas entre 8 y 12°C. Está en un valle glaciar y se alimenta de los ríos Sucus y Tambo (Figura 2).



Fuente: Google Earth, 2013.

**Figura 1.** Mapa de los puntos de muestreo en la laguna de Papallacta (Coordenadas Anexo 9).



Fuente: Google Earth, 2013.

**Figura 2.** Puntos de muestreo en la microcuenca de los ríos Sucus y Tambo (Coordenadas Anexo 9).

## 2.2. Vegetación del lugar

La vegetación de cada lugar se adapta a las condiciones específicas del sitio donde crece, de acuerdo a las características estructurales y dinámicas (Sierra, 1999).

En el caso de Papallacta se trata de un bosque siempreverde montano alto; sin embargo, también posee características de páramo herbáceo, se caracteriza por los pajonales en penacho de las zonas más altas, así como por estar cubierto de una densa capa de musgo y árboles de crecimiento irregular (Sierra, 1999) y de almohadillas que cubren extensas zonas en ciertos lugares (Mena, 2005). Papallacta se encuentra en una

zona de transición entre los bosques montanos altos y los páramos lo cual se puede evidenciar alrededor de la laguna (Sierra, 1999).

Se estima que en los páramos ecuatorianos habitan cerca de 1500 especies de plantas (Mena, 2005), se destacan las siguientes especies: *Ilex* spp. (Aquifoliaceae); *Oreopanax* spp. (Araliaceae); *Gynoxys chigualensis*, *G. fuliginosa* spp. (Asteraceae); *Axinaea quitensis*, *Brachyotum gracilescens*, *B. ledifolium* spp., *Miconia barclayana* sp. (Melastomataceae); *Piper* spp. (Piperaceae); *Hesperomeles lanuginosa* sp. (Rosaceae) (Sierra, 1999). A mayor altitud se encuentran arbustos como: *Hypericum laricifolium*, *Brachyotum* spp. y *Lupinus* spp. y árboles como: *Buddleja* spp., *Oreopanax* spp., *Polylepis* spp., entre otros (Sierra, 1999; Mena, 2005). Además se destacan otras especies de las familias Poaceae, Lycopodiaceae, Ranunculaceae (Sierra, 1999).

### **2.3. Fauna del lugar**

#### **2.3.1. Invertebrados**

En Papallacta así como en el resto de páramos se pueden encontrar varios invertebrados, predominando dípteros, coleópteros, lepidópteros y ortópteros, entre otros (Mena, 2005).

#### **2.3.2. Anfibios y Reptiles**

Existen cinco especies de reptiles y 24 de anfibios en los páramos ecuatorianos. Se pueden observar ranas del género *Telmatobius* y de manera más común ranas marsupiales (*Gastrotheca riobambae*), características de estas zonas. Además, entre los pajonales y arroyos, se pueden encontrar sapos de la especie *Eleutherodactylus whymperi* (Mena, 2005).

En el caso de los reptiles se encuentran únicamente lagartijas de la especie *Stenocercus guentheri*, que habitan hasta los 4100 msnm (Mena, 2005).

### **2.3.3. Aves**

Se pueden observar aves de distintos tamaños, las más comunes son el halcón variable (*Buteo polyosoma*), Cinclodes Alifranjeado (*Cinclodes fuscus*), Frigilo Plomiza o azulejo (*Phrygilus unicolor*), Gallinazo Negro (*Coragyps atratus*), también se pueden ver mirlos de la especie *Turdus fuscater* (Mena, 2005).

### **2.3.4. Mamíferos**

Existen 49 especies de mamíferos en los páramos ecuatorianos (Tirira, 1999), de éstos los que predominan son: el oso de anteojos (*Tremarctos ornatus*), que habita a lo largo de los páramos ecuatorianos, difícil de observar ya que siempre está en movimiento cuando se encuentra en el páramo, se alimenta de prácticamente todo lo que encuentre (Mena, 2005), también se puede observar el tapir andino (*Tapirus pinchaque*), posee un pelaje oscuro y denso con los labios y orejas claras (Mena, 2005), tiene una dieta vegetariana. Para ambas especies la principal amenaza es la expansión agrícola y la urbanización ya que a diferencia de otros animales estos se mueven de un lado a otro incesantemente.

### **2.3.5. Peces**

La diversidad de peces es baja en los páramos de la zona de estudio, donde se destacan las truchas (*Oncorhynchus mykiss*), que tienen un enfoque comercial, desde su introducción en el país han causado impactos sobre el ambiente acuático e incluso es posible que sean, en parte, causantes del desplazamiento de las preñadillas (*Astroblepus longifilis* y *A. grivalvii*), que son nativas de la zona y muy difíciles de encontrar en la actualidad (Mena, 2005).

## **2.4. Ubicación de puntos de muestreo**

Se establecieron 28 puntos de muestreo (19 en laguna y nueve en río), las muestras se recolectaron de acuerdo a las condiciones físicas del ecosistema (laguna, río), por esto se usaron dos metodologías diferentes de acuerdo al sitio. En la laguna se realizó desde un bote, mientras que las muestras de río se colectaron directamente del sustrato. Los puntos de laguna (Figura 1) se identifican con la letra (L) y un número para identificarlos de mejor manera, por ejemplo: L1 o L12, algunos puntos de laguna se identifican de la siguiente manera: L5-a, L5-b o L5-c, estos indican sitios dentro de una misma zona en los que fue necesario tomar mayor cantidad de muestras para determinar si aún existe crudo hasta los 10 metros de profundidad. Los puntos de río (Figura 2) se identifican con la letra (T), de igual manera con un número de identificación y con otra letra al final ya sea esta (A) o (B) para determinar en qué zona se encuentran, por ejemplo: T2A o T3B; el punto T0 se ubica a 100 m aguas arriba del sitio de derrame y T1A a 200 m aguas abajo, ambos sobre el río Sucus. Los puntos T5 y T6 a pesar de tener la letra T pertenecen a dos zonas distintas, T5 corresponde a la entrada del río hacia la laguna y T6 corresponde a la zona de descarga de la laguna (efluente) que se encuentra al final de un paso subterráneo bajo un camino de acceso.

Los puntos de muestreo en laguna se establecieron en base a un análisis de batimetría que se realizó previamente, de esta manera se conocen las profundidades de cada punto y su topografía, lo que ayuda a identificar los sitios donde puede acumularse el crudo. En el caso de río los puntos están sobre la cuenca, tomando en cuenta por donde pasó el derrame y varias características, por ejemplo algunos están cerca a zonas de influencia antrópica otros están aislados, también la profundidad, corrientes y acceso fueron considerados.

## **2.5. Procedimiento de muestreo**

Los muestreos se llevaron a cabo dentro de tres períodos divididos en campañas de acuerdo a la época del año: seca (diciembre), transición (marzo) y lluviosa (julio), desde diciembre del 2010 hasta julio del 2011, de esta forma se pueden correlacionar las

variaciones en el estado de la laguna de acuerdo a todos los factores ecológicos que intervienen en cada época. Esta estacionalidad es determinante en cualquier tipo de ecosistema cuando se trata de fitoplancton ya que interviene en los patrones de vida de estos organismos debido a que influye en la temperatura, disponibilidad de luz, movimiento del agua, entre otros (Marshall, 1965).

En laguna se realizó un muestreo aleatorio estratificado con la Botella Van Dorn la cual desciende verticalmente pero en posición horizontal. La botella recoge dos litros que luego son filtrados a través de una red de fitoplancton de 30 micras con un cubilete enroscado al extremo, este proceso permite recoger la mayor cantidad de plancton en 150 ml de agua, facilitando el análisis posterior en laboratorio (Figura 3). Para cada muestra se realizaron tres submuestras estratificadas que se homogenizaron en el cubilete. La estratificación de la columna de agua prácticamente regula el crecimiento de fitoplancton ya que determina el paso de luz y la disponibilidad de nutrientes (Striebel *et al.*, 2010), por esa razón se decidió realizar submuestras estratificadas para establecer hasta que profundidad se puede encontrar el fitoplancton en la laguna; incluso puntos como L5 y L8 fueron divididos en tres submuestras más (para obtener datos a mayor profundidad, las muestras se preservaron en formalina al 4% y almacenadas en envases color ámbar para preservarlas (Figura 4).



**Figura 3.** Recolección con Botella Van Dorn, se observa también la malla de filtración para obtener el fitoplancton.



**Figura 4.** Almacenamiento de muestras. Se utilizaron envases ámbar para preservar a los organismos hasta su análisis en laboratorio.

La estratificación se da en base a la visibilidad que se tiene en la laguna, lo cual a su vez se determina por el disco Secchi (Figuras 5-6). Una de las características de las lagunas de altura es que el agua es transparente incluso a bajas profundidades (Delgado *et al.*, 2009), por lo que la visibilidad del Disco Secchi puede distinguirse, en ciertos casos, a mayor profundidad; dicha visibilidad determina la profundidad a la que se toman las muestras para tener el análisis estratificado, se marca la profundidad a la que se observa el disco y partiendo de ese número se toman dos profundidades más hacia la superficie con el fin de obtener las submuestras. Además, se deben tomar en cuenta procesos naturales de la zona que afectan sobre la laguna en cada época, tales como el viento, las corrientes y el nivel del agua.



**Figura 5.** Disco Secchi (superficie).



**Figura 6.** Disco Secchi (sumergido).

Para los ríos se utilizó la red surber de 85 micras (Figura 7), debido a que el fitoplancton se presenta de otra manera en este ecosistema, principalmente porque está pegado a las rocas o plantas de las orillas en forma de epiliton y perifiton; la profundidad del río no sobrepasa los 80 cm (se registró esta profundidad como la más alta en época de lluvia), de esta manera se tomaron muestras de la superficie, esta red consiste de dos marcos de 30 cm x 30 cm cada uno unidos por abrazaderas, un marco se coloca sobre la superficie a muestrear y una red de aproximadamente 60 cm, donde se recoge la muestra, está unida al otro marco. Se utilizó la red de 30 x 30 porque el sustrato a muestrear siempre debe ser igual o menor al tamaño de la red y el área a

muestrear siempre debe estar contenida dentro del marco, de esta forma se puede calcular la diversidad y abundancia de especies por área (Alberta Environment, 2006). Con esta herramienta se cepilla la superficie que se quiere muestrear, se recogió el perifiton pegado a las piedras principalmente y en ciertos casos también en las orillas. El proceso se realizó dos veces, una para recolectar fitoplancton y zooplancton y la otra para recoger una muestra para macroinvertebrados. En cada recolección se tomaba nota de las profundidades a las que se realizó el muestreo, esto con la ayuda de una regleta, de esta manera también se puede determinar en donde se encuentra el fitoplancton en los ríos.



**Figura 7.** Recolección con Red Surber. En la Figura se muestra la recolección de uno de los puntos relativamente profundos, la red se debía sumergir hasta encontrar un sustrato y cepillarlo.



**Figura 8.** Equipos utilizados para la toma de datos. En la Figura se puede observar el medidor de oxígeno y el multi-parámetros, el primero para los datos de oxígeno disuelto solamente y el segundo para conductividad, pH y sólidos disueltos.

Para ambos ecosistemas se tomaron los siguientes datos *in situ*, con un medidor de oxígeno y un multi-parámetros digitales (Figura 8): pH, conductividad, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto, temperatura del agua, profundidad total del punto y profundidad del disco Secchi. Adicionalmente, se enviaron muestras de cada sitio a un laboratorio para los análisis de DBO, DQO, bario, cromo, fenoles, nitrógeno global, plomo, sólidos disueltos, turbidez y vanadio y TPH (Hidrocarburos Totales de Petróleo).

## 2.6. Análisis de laboratorio

Para la separación de la muestra y análisis de fitoplancton se utilizaron dos técnicas, la primera consiste en utilizar embudos de separación de 250 ml y 500 ml, donde se deja la muestra en decantación entre 24 y un máximo de 72 horas para que se separe el fitoplancton de los sólidos en suspensión, luego se deja caer solamente el sedimento separado, el cual se mantiene en tubos de ensayo durante el análisis de muestras, esta técnica es viable cuando se trata de muestras de río porque tienen mayor carga de sedimento que debe ser decantado (Figura 9); la segunda técnica es la centrifugación, que se utiliza con bajas concentraciones de fitoplancton, para esto se toma 200 ml de muestra homogenizada y se centrifuga a baja velocidad durante 20 minutos, de esta manera se pueden procesar más muestras en menor tiempo (Figura 10).



**Figura 9.** Embudos de decantación. Se utilizaron principalmente cuando la carga de sedimentos en las muestras era alta, de esta manera se separa la mayor parte de sedimentos hasta en un máximo de 72 horas.



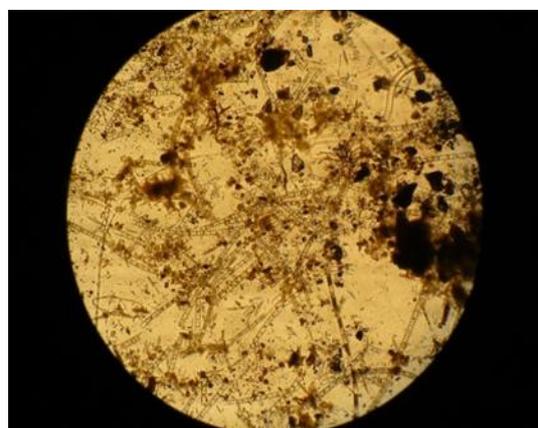
**Figura 10.** Centrífuga. Este aparato se utilizó solamente para muestras que presentaron menor cantidad de sedimentos y así acelerar el proceso de sedimentación de la muestra.

La determinación de fitoplancton se realizó en el laboratorio de la Universidad Internacional del Ecuador (UIDE), se estableció un período de dos semanas como tiempo máximo de análisis de muestras, para garantizar que los organismos se encuentren en buen estado y puedan ser identificados; durante la época seca se realizó desde el 13 al 24 de diciembre del 2010, para la época de transición del 28 de marzo al 8

de abril del 2011 y para la época lluviosa del 18 al 29 de julio. Para el conteo e identificación se utilizaron microscopios marca Olympus serie CX21FS1. Cada análisis por muestra debe tener el mismo volumen, para esto se colocan tres gotas de 100 $\mu$ L de cada muestra (repeticiones) en una placa cóncava con varias hendiduras (Figura 11), esto permite realizar un conteo relativamente rápido (dos semanas). Estas gotas son analizadas minuciosamente, para esto se divide a la gota en nueve partes basadas en una cuadrícula, así se obtiene el número real de individuos y géneros por gota, ya que se cuenta cada parte de ésta. Si se observan especies nuevas en la última repetición se realiza una más.



**Figura 11.** Placa cóncava para observación de muestras. Cada hendidura contiene 100  $\mu$ L que son analizados por partes y de esta manera se obtiene el conteo real por cada gota.



**Figura 12.** Parte de una gota de agua con fitoplancton. De esta manera se observaron las gotas bajo el microscopio (magnificación 10x).

Luego de la observación se cuenta el número de especies de cada parte de la gota para obtener un total de individuos y géneros, luego se suma el resultado de cada una de las tres gotas de cada muestra para obtener el total de especies en una muestra. Este resultado se multiplica por 1000 para obtener el número de colonias por mililitro (NCM), este proceso se realizó porque así se determina el número total de colonias de cada género que puede encontrarse en un mililitro de agua, y no solamente tomando en cuenta los valores registrados en los 300  $\mu$ l contabilizados, sino en una unidad acorde al resto de datos utilizados (variables abióticas) para que la interpretación de datos sea la correcta.

La identificación de fitoplancton puede ser difícil en principio, pero existen varios recursos que ayudan a determinar los géneros y especies de los organismos encontrados, se utiliza principalmente fotografías de varias colecciones para determinar a qué grupo pertenece cada individuo, de esta forma también se identifican familias o grupos grandes; luego se utilizan claves taxonómicas para determinar los géneros y tener así un mejor detalle de los organismos de la zona. En el país no hay mucha información, tampoco bases de datos de las especies de agua dulce, por lo que se usaron recursos externos para la caracterización de los géneros, tales como claves para la identificación de algas de agua dulce en otros países como la descrita por Bellinger y Sigee (2010), la colección de algas de agua dulce Hilda Canter-Lund (2011), colección de diatomeas de la Academia de Ciencias de California (2012), colección de algas de la Universidad de Ohio (2012) entre otras, así como documentos y estudios en ecosistemas de características similares de las zonas tropicales; es un proceso largo debido a las limitaciones pero la mayoría de especies, sobre todo de diatomeas que son las más abundantes en la laguna, son fáciles de identificar porque tienen formas y características definidas lo cual las destaca de otros grupos un poco más complejos.

## **2.7. Análisis de datos**

Se realizaron análisis multivariados, además se utilizó el Índice de tolerancia a contaminación orgánica de Palmer. Todos estos análisis se realizaron por campaña: correlación de Pearson, índice de distancia euclidiana, índice de similitud de Steinhaus y Análisis Canónico de Correspondencias (ACC), con el objetivo de determinar qué variables son importantes de acuerdo a la época y cómo esto afecta a las comunidades fitoplanctónicas.

Se utilizó el programa estadístico XLSTAT 2012 para efectuar todos los análisis antes descritos, con distintos factores determinados por la estratificación y la interacción de las variables abióticas con las bióticas. Todos estos valores se manejan por época para establecer las diferencias en cada período igualmente. Las pruebas efectuadas se describen a continuación:

### 2.7.1. Análisis de factores abióticos

- ❖ Análisis de correlaciones múltiples (Pearson): Se utiliza para abordar variables por categorías, en este caso se utilizó para las variables abióticas, la prueba confronta las variables para determinar qué valor de correlación comprendido entre -1 y 1 existe para cada variable (Addinsoft, 2004).
- ❖ Distancias euclidianas: Calcula la distancia entre dos puntos dentro de un espacio multidimensional (Hill y Lewicki, 2006), para esta caracterización se toman en cuenta únicamente los parámetros abióticos de acuerdo a los puntos donde se tomaron las muestras y así se determina las similitudes abióticas entre los diferentes sitios. La distancia euclidiana aumenta conforme la disimilitud de las variables lo hacen, además su valor también depende de la escala de cada variable; por lo tanto estas deben estar estandarizadas (Addinsoft, 2004).

### 2.7.2. Análisis de la biota

- ❖ Índice de tolerancia a contaminación orgánica de Palmer: En 1969 Palmer determinó 20 géneros como los más tolerantes a contaminación orgánica, llegó a esta conclusión luego de analizar 165 reportes de varios autores comparando los géneros que mayor tolerancia presentaron en todos estos estudios y les asignó un índice de tolerancia basado en su ocurrencia (Taylor *et al.*, 1979), estos índices se suman y de acuerdo al valor total se determina qué tanta carga orgánica hay en un sitio, Palmer determinó que un valor superior a 20, como total de la suma de los índices, es un indicador de alta carga orgánica, un resultado entre 15 y 19 se toma como evidencia probable de alta contaminación orgánica y valores inferiores pueden indicar poca carga orgánica, muestra no representativa o que ciertos factores están influenciando sobre la presencia de fitoplancton (Taylor *et al.*, 1979).
- ❖ Índice de disimilitud de Steinhaus (Bray-Curtis): Se usa para determinar abundancia, principalmente cuando la presencia de organismos es significativa en un sitio (Goslee y Urban, 2007). Es de mucha utilidad cuando se manejan datos con diferentes valores de abundancia para cada especie, de esta manera se

pueden determinar las similitudes entre muestras en relación al valor que va de 0 a 1 (Yoshioka, 2008).

### **2.7.3. Análisis Canónico de Correspondencias**

- ❖ Análisis ampliamente utilizado en ecología acuática. Está diseñado para identificar qué variables abióticas presentes en un ecosistema determinado afectan la composición de una comunidad y muestra los gradientes en donde se encuentran los organismos en dicho ecosistema, es decir, los nichos que ocupan de acuerdo a las condiciones ambientales que requieren (ter Braak y Verdonschot, 1995).

## **CAPÍTULO III MARCO TEÓRICO**

### **3.1. Ecosistemas de agua dulce de altura**

En agua dulce se pueden diferenciar dos tipos principales de cuerpos de agua donde habita el fitoplancton (Bellinger y Sigeo, 2010):

1. Sistemas lénticos: lagunas, estanques, entre otros
2. Sistemas lóticos: ríos y aguas corrientosas en general

Los sistemas acuáticos andinos se componen de dos tipos de entornos, desde lagunas de diferentes características en tamaño y formación, hasta ríos que son parte de distintos sistemas que se extienden a varios pisos climáticos (Maldonado *et al.*, 2011).

En agua dulce se pueden destacar dos tipos grandes de hábitats donde el fitoplancton tiene mayor importancia: lagunas y ríos (Lerner y Wilmoth, 2005; Roth, 2009), a pesar de ser dos tipos distintos de ecosistemas en realidad están interconectados por lo que comparten muchas características, pero al mismo tiempo presentan diferencias (Roth, 2009).

Las zonas tropicales en general presentan pocas variaciones de temperatura a lo largo de un ciclo anual (Casallas y Gunkel, 2001), por lo que la diferencia en las lagunas andinas se da en relación a la altitud a la que se encuentran, lo cual a su vez también influye en la estratificación y circulación, las cuales tampoco siguen un ritmo anual (Casallas y Gunkel, 2001; Roldán y Ramírez, 2008). Las lagunas andinas, incluyendo Papallacta, se caracterizan por estar en un rango de temperatura mayor a 4°C que según Roldán y Ramírez (2008) las clasifican como polimícticas cálidas, éstas se caracterizan por presentar períodos cortos de estratificación determinados por un calentamiento diurno constante y un enfriamiento rápido durante la noche, estas lagunas pueden presentar dicha estratificación en un período de días o semanas de forma discontinua,

por eso no se produce una estratificación termal real a diferentes profundidades lo cual también es producto de la mezcla constante de las aguas (Roldán y Ramírez, 2008).

En los páramos del Ecuador se encuentran aproximadamente 1100 lagunas, de las cuales un 87% son de origen glaciar y el otro 13% de origen volcánico, están ubicadas sobre los 3000 msnm, todas son en su mayoría oligotróficas y presentan una alta concentración de oxígeno (Terneus, 2002). La formación de las lagunas glaciares se da hace aproximadamente 10000 años a finales del Pleistoceno (Terneus, 2002; Roldán y Ramírez, 2008), en ese período se produjo una glaciación que da origen a los grandes lagos de Norteamérica y Europa además de las lagunas en los Andes en Sudamérica, muchas de éstas no se conocen por el difícil acceso que tienen (Roldán y Ramírez, 2008). Muchas veces este tipo de formaciones se encuentran cerca de zonas volcánicas o tectónicas que también han dado origen a otras lagunas en Los Andes las cuales están acompañadas de fuentes termales (Roldán y Ramírez, 2008).

Ríos y lagunas a pesar de ser diferentes tienen una relación directa, ya que muchas lagunas forman sistemas abiertos con ríos que las alimentan (O'Sullivan y Reynolds, 2004; Bellinger y Sigee, 2010), por lo que es común encontrar una presencia similar de fitoplancton en ambos sitios, donde la única diferencia significativa se da en la forma en que se presentan, en lagunas son planctónicos usualmente mientras que en ríos son bentónicos (O'Sullivan y Reynolds, 2004; Vincent y Laybourn, 2008; Bellinger y Sigee, 2010).

### **3.2. Efectos de la contaminación petrolera en ecosistemas de agua dulce**

Dada la amplia necesidad de usar combustibles derivados de petróleo, es frecuente la presencia de derrames sobre ecosistemas, sobre todo en el caso de nuestro país, donde el oleoducto cruza por zonas sensibles; hay muchos riesgos para la conservación del agua. El SOTE (Sistema de Oleoducto Trans-Ecuatoriano) tiene un recorrido de aproximadamente 498 km, partiendo desde Lago Agrio, en Sucumbíos, hasta Balao en Esmeraldas, es la tubería más antigua, construida a principios de los años 70, durante este recorrido atraviesa las tres regiones del Ecuador continental, por zonas

de importancia ecológica como el bosque húmedo tropical en la Amazonía, la zona de Papallacta en el páramo y hacia el nor-occidente Mindo, el otro sistema de transporte de crudo es el OCP, que empezó sus operaciones en 2003, tiene un recorrido aproximado de 485 km, en mayor parte paralelo al SOTE (Mena y Hofstede, 2006; EIA, 2011).

Sin duda el principal efecto y el más fácil de observar en un derrame de hidrocarburos sobre el agua es la relación de densidad entre ambas sustancias, al principio de cualquier derrame se puede observar cierta flotabilidad del petróleo sobre el agua pero en un período corto se observa cómo se forman grumos en forma de esferas que flotan de arriba hacia abajo, algunos sobre la superficie y otros que se hunden de acuerdo al tamaño que alcanzan (Fingas *et al.*, 2006).

El comportamiento del petróleo sobre el agua es casi siempre el mismo como se describe anteriormente; sin embargo, en el caso de la laguna de Papallacta se observaron dos fases durante el derrame. Una pequeña parte del petróleo se disolvió en el agua de los ríos Tambo y Sucus, afectando a la vegetación de las orillas y pegándose a las rocas, mientras que otra parte desembocó en la laguna debido a la corriente de este último que tiene un movimiento continuo hacia ella, esto produjo que una capa de entre 0.1 cm a 70 cm de espesor ocupe una zona de aproximadamente 6.5 ha de la laguna que luego de un tiempo se precipitó al fondo (Aveiga *et al.*, 2005).

El procedimiento de tratamiento aplicado fue el siguiente: Para la extracción del crudo de la laguna se usaron unidades de adsorción que tienen como fin atrapar los hidrocarburos en la superficie, además se usaron filtros con un material poroso que remueven los contaminantes conectados a bombas extractoras, adicionalmente se colocaron filtros en las orillas para recoger el material contaminado (Aveiga *et al.*, 2005). En los ríos se usaron dos procedimientos simultáneos, uno consiste en recuperar lo que se puede del sedimento contaminado mediante el uso de barreras oleofílicas que recogen el petróleo en el cauce de los ríos (Aveiga *et al.*, 2005), y el otro proceso consiste en filtrar el material contaminado mediante barreras de celulosa que atrapan los hidrocarburos y en las orillas el lavado se realizó con bombas de presión de agua (Aveiga *et al.*, 2005; Petroecuador, 2006).

Este comportamiento que tiene el petróleo sobre el agua se debe posiblemente a las características propias del ecosistema ya que la tasa de evaporación, los cambios de temperatura en el agua y el paso o acumulación de sedimentos son propios de cada sitio (Fingas *et al.*, 2006), esto influye sobre la densidad del crudo que hace que se comporte diferente de acuerdo a las etapas antes descritas pero siempre haciendo que la contaminación sea persistente en el agua, por lo que es inevitable que los organismos se contaminen.

Una caracterización molecular del petróleo es difícil de lograr debido a que contiene gran cantidad de compuestos; sin embargo, se pueden nombrar cuatro grandes grupos de hidrocarburos que están presentes en su composición: Alifáticos, aromáticos, resinas y asfaltenos, la combinación de estos cuatro le dan propiedades tanto de flotabilidad en ciertos medios así como también la capacidad de impregnarse a otras moléculas (Aske, 2002).

La contaminación de este tipo ocasiona varios disturbios sobre el ecosistema, principalmente se inhibe la producción primaria debido a que el paso de luz es menor (Miller *et al.*, 1978; French-McCay *et al.*, 2011) y los organismos se ven afectados a nivel celular ya que muchos procesos naturales como la osmosis o el uso de cloroplastos para la fotosíntesis se ven afectados o cambian su orden natural porque el crudo afecta directamente su funcionamiento, específicamente se conoce de la inhibición de un proceso conocido como reacción de Hill de la fotosíntesis donde se depende de la luz para el paso de electrones entre células que puede ser detenido por ciertos contaminantes, llevando a muchos de estos organismos a la muerte (Miller *et al.*, 1978; Walsh, 2006; French-McCay *et al.*, 2011). Todas las comunidades de plancton en general se ven afectadas ya que los cambios físico-químicos en el agua cambian toda la dinámica de las especies, muchas pueden pasar a ser dominantes en ecosistemas donde no lo eran mientras que otras pueden desaparecer completamente, la dinámica se refiere además a la producción en biomasa ya que esto afecta directamente a otros organismos en el mismo hábitat (Miller *et al.*, 1978; Reynolds, 2006; Likens, 2010).

La contaminación petrolera hace que el ecosistema sea extremadamente tóxico en principio y aunque la remediación tenga un efecto positivo a largo plazo, la descomposición de materia orgánica del mismo petróleo puede hacer que algas contaminantes proliferen más tarde retardando el proceso de recuperación de salud ecológica del agua aún más (Moreno-Ostos *et al.*, 2006). Esto también se refleja en los organismos de niveles superiores que aparte de ser afectados directamente también son perturbados por lo que sucede en niveles inferiores, más aun siendo la base de la cadena trófica la que se ve afectada.

### **3.3. Fitoplancton**

El fitoplancton se compone de organismos simples sin diferenciación entre raíces, hojas y tallo (Bellinger y Sigee, 2010; Likens, 2010), son autótrofos principalmente, capaces de generar complejos compuestos de carbono a base de CO<sub>2</sub> y luz solar gracias a la fotosíntesis (Bellinger y Sigee, 2010), por esto son la base de la cadena trófica acuática. Se los encuentra principalmente en “suspensión” tanto en aguas abiertas en el mar así como en lagos, lagunas y ríos (Reynolds, 2006).

El fitoplancton presenta varias características únicas que permite que estos organismos se adapten a los cambios en el ecosistema, algunas especies son más sensibles que otras; algunas toleran altos niveles de contaminación, también pueden indicar la presencia de algún agente específico y determinar cambios tanto a corto como a mediano plazo. Son precisamente estas características las más importantes en el estudio de fitoplancton ya que ayudan a comprender por qué estos organismos habitan en prácticamente cualquier tipo de ecosistema acuático (Sierra, 2011).

Estos organismos poseen características físicas diferentes a la del agua; no es muy común que el plancton, en general, tenga la misma densidad que el medio donde habita (Reynolds, 2006; Roth, 2009), por lo que tiende a flotar o hundirse pero dentro de un rango en la columna de agua, por lo que parece que estuvieran en suspensión, además depende del tamaño ya que los organismos más pequeños son los que usualmente parecen estar en la superficie (Reynolds, 2006), el fitoplancton tiende a ser

un poco más denso que el agua, por lo que a pesar de necesitar luz y permanecer en la superficie, con el paso del día desciende, hasta que en la noche permanece a mayores profundidades que durante el día (Reynolds, 2006; Roth, 2009). Además para compensar la necesidad de luz durante el día, han desarrollado algunas adaptaciones que varían de acuerdo al grupo; por ejemplo, ciertas especies poseen vesículas de gas que se llenan o vacían de acuerdo a la necesidad lo que les permite controlar su densidad (Roth, 2009), otras han desarrollado mecanismos de locomoción o movimiento para no quedarse en un solo sitio de la columna de agua, tales como segregar mucus que funciona como flagelos (Roth, 2009; Bellinger y Sigeo, 2010) y otros simplemente dependen mucho de la forma que tienen y de la vida en colonia para permanecer en la superficie cuando lo requieren (Roth, 2009).

El fitoplancton depende mucho de las características del ecosistema donde habita; por ejemplo, los cambios de temperatura son determinantes en la producción primaria (Reynolds, 2006), cuando la temperatura está entre 5 y 20°C es donde se observa una mayor producción (Roth, 2009) por eso se puede esperar una gran abundancia en los ríos y lagunas de altura ya que la temperatura oscila entre estos extremos. La incidencia de luz es esencial para el fitoplancton, por esto también se adaptan a vivir en la zona fótica (Roth, 2009), debido a que es la única franja donde la luz penetra y es viable para la fotosíntesis, cualquier zona más baja donde la luz no ingresa ya no se considera productiva para el fitoplancton y es por esto que para la recolección se la hace en la superficie.

Fuera de las adaptaciones antes descritas, las cuales son las más importantes, existen adaptaciones específicas de algunas especies, por ejemplo hay algunas que pueden vivir en ecosistemas con pH muy ácido o muy básico, otras donde hay menor incidencia de luz (debido a la presencia de sedimentos en la superficie) y otras en un rango de temperatura fuera del óptimo (Reynolds *et al.*, 2002).

### 3.3.1. Tipos de fitoplancton

En agua dulce se distinguen dos tipos principales de fitoplancton:

- ❖ **Bentónico:** Se encuentra adherido a un sustrato y es más común en ríos o donde exista corriente (Cuassolo *et al.*, 2011). Este tipo de algas puede soportar corrientes fuertes, por lo tanto necesitan de un sustrato adecuado y se los puede encontrar adheridos tanto a rocas, plantas, lodo o junto al sedimento (Bellinger y Sigeo, 2010). Como su hábitat es una superficie, usualmente se los puede encontrar junto a otros organismos, aunque siempre van a dominar debido a que crean capas llamadas biofilms (Bellinger y Sigeo, 2010) por la agrupación de colonias, esta forma de vida es el perifiton o epilíton.
- ❖ **Planctónico:** El otro tipo de fitoplancton es de vida libre y más común en lagunas o ríos de poca corriente (Bellinger y Sigeo, 2010). Se los encuentra principalmente en la superficie pero muchas especies son capaces de controlar su posición en la columna de agua, como se explicó anteriormente, gracias al control de flotabilidad que poseen algunos (Reynolds, 2006; Bellinger y Sigeo, 2010). Estos organismos son los responsables de las explosiones o blooms de algas que en muchos casos son contaminantes naturales de un ecosistema.

### 3.3.2. Tamaño y forma

La forma y el tamaño determinan el comportamiento de las especies en el ecosistema, la diferencia entre grupos o incluso entre individuos de la misma especie puede ser amplia y está determinada por las características del ecosistema, por ejemplo una misma especie puede tener cierto tamaño en un sitio y variar en otro (Reynolds, 2006; Chattopadhyay, 2007), algunas especies se pueden observar a simple vista cuando forman grandes colonias como es el caso de ciertas cianobacterias (Bellinger y Sigeo, 2010) y otras solamente se pueden observar bajo el microscopio.

De acuerdo a Bellinger y Sigee (2010) se puede clasificar al fitoplancton en cuatro grupos de acuerdo a su tamaño:

- ❖ **Picoplancton:** Tienen un tamaño de 0.2 a 2  $\mu\text{m}$  y son usualmente organismos unicelulares.
- ❖ **Nanoplancton:** Tamaño de 2 a 20  $\mu\text{m}$ , son también organismos unicelulares y al igual que el grupo anterior se conforma de cianobacterias (verde-azules).
- ❖ **Microplancton:** Su tamaño está entre 20 y 200  $\mu\text{m}$ , dentro de este grupo se encuentran muchas diatomeas y pueden ser tanto unicelulares como organismos coloniales.
- ❖ **Macroplancton:** Son los ejemplares más grandes (>200  $\mu\text{m}$ ) y usualmente forman colonias.

Esta descripción es tanto para organismos planctónicos como bentónicos, aunque es usual que en estos últimos la diferencia en tamaño sea mayor.

La forma es también otro componente importante ya que determina comportamientos como el movimiento en el agua además que es muy útil conocer éste factor para la identificación de géneros.

La forma básica que se conoce es una esfera unicelular incapaz de moverse por sí misma (Bellinger y Sigee, 2010), mientras que los organismos más complejos pueden tener una estructura multicelular y formas cilíndricas, rectangulares, helicoidales, esféricas, entre otras (Prescott, 1954; Reynolds *et al.*, 2002). Las diferentes formas que presentan tienen su razón de ser, ya que gracias a estas adaptaciones ciertas especies pueden moverse y otras unirse a otros individuos para formar colonias (Bellinger y Sigee, 2010).

Estas dos adaptaciones son muy importantes para el fitoplancton ya que determinan, además de lo anterior, la forma en que absorben la luz, la tasa de crecimiento y división celular (Reynolds, 2006; Bellinger y Sigee, 2010).

### 3.3.3. Dinámica ecológica del fitoplancton

Estos organismos son importantes para la funcionalidad de un ecosistema por varias razones, lo cual les ha dado valor no solamente en ecología sino también como indicadores para el monitoreo de calidad del agua.

Como son la base de la cadena trófica acuática son organismos tan importantes que la producción de otros organismos superiores está condicionada a la producción del fitoplancton (Reynolds, 2006), toda la cadena trófica depende de la fijación de CO<sub>2</sub>; sin embargo, cuando existe una sobreproducción en ciertos géneros también se dan problemas de contaminación natural (Alles, 2008).

La capacidad de fijación de CO<sub>2</sub> del fitoplancton permite que estos organismos sean capaces de realizar la fotosíntesis, ejecutando la misma función que las plantas en tierra, por eso el resto de la cadena trófica acuática puede aprovechar el oxígeno que se produce en este proceso, el cual está disuelto en el agua (Reynolds, 2006; Bellinger y Sigeo, 2010). En cierto modo esta facultad les permite mantener el equilibrio en los ecosistemas y depende mucho de las características de cada grupo (Striebel *et al.*, 2010). Después del carbono, el elemento más importante para el fitoplancton es el nitrógeno ya que puede limitar el desarrollo de éstos debido a que muchos de ellos no tienen material estructural (compuesto principalmente de carbono) en su estructura como otros organismos, además el fitoplancton asimila alrededor del 70% del nitrógeno global transformando la energía solar en biomasa que puede ser utilizada por otros organismos (Collos y Berges, 2011).

El fitoplancton tiene una distribución vertical y horizontal en el medio la cual está determinada por ciertas propiedades que poseen estos organismos. La primera se puede dar en un período de días durante los cuales el fitoplancton puede moverse entre varios milímetros hasta varios centímetros dependiendo de su tamaño, forma y peso; muchas con capacidad de movimiento incluso se trasladan más rápido y a mayor distancia (Reynolds, 2006), esta distribución está definida principalmente por los períodos de luz, temperatura y profundidad, ya que estos factores determinan la

situación del fitoplancton según la hora del día, es decir, cuando hacen fotosíntesis (durante el día) se encontrarán cerca o en la superficie mientras que en la noche su distribución se concentra en las partes más profundas, además la temperatura rige estos patrones de acuerdo a la preferencia de cada especie, esto ocurre durante todo el año (Reynolds, 2006; Chattopadhyay, 2007; Bellinger y Sigeo, 2010).

La distribución horizontal se rige al viento y las corrientes principalmente, este tipo de distribución es heterogénea ya que los factores pueden variar según el día, por lo tanto no siempre se va a poder observar la misma distribución (Reynolds, 2006). Además la distribución horizontal está determinada por la geografía del lugar ya que los “parches” de organismos que se forman se pueden ver interrumpidos por rocas o masas de tierra, también es importante destacar que a pesar de la dependencia del viento y las corrientes, las especies que tienen capacidad de movimiento pueden determinar en qué parte se ubican en relación al resto que se sitúan donde los factores ambientales lo establecen (Reynolds, 2006).

En la presente investigación el tema de dinámica ecológica es tratado de acuerdo a los grupos que se encontraron en Papallacta, los cuales son: diatomeas, algas verdes y algas verde-azules.

#### **a. Diatomeas (Bacillariophyta)**

Las diatomeas son un grupo tan extenso que están presentes tanto en forma planctónica como bentónica, son organismos muy productivos (Stoermer y Smol, 2004) tanto en aguas lénticas como lóxicas (Bellinger y Sigeo, 2010). Estos organismos se caracterizan por estar encapsulados en una pared de sílice que les da una forma definida con varias coloraciones y una estructura transparente, esta cápsula además los hace más eficientes al uso de energía, por esto requieren menos luz para la fotosíntesis que el resto de algas (Moreno-Ostos *et al.*, 2006; Vincent y Laybourn, 2008), siendo capaces de sobrevivir en medios donde otras algas no pueden; sin embargo, requieren de un suministro continuo de ácido silícico del agua, además que no pueden mantenerse

flotando en aguas no estratificadas y limita su reproducción luego de varias generaciones (Bellinger y Sigeo, 2010).

Las diatomeas son capaces de dominar en un ecosistema sobre otros grupos de plancton ya que pueden tolerar bajas temperaturas y poca cantidad de luz, además que crecen en aguas con mucho sedimento (Stoermer y Smol, 2004; Bellinger y Sigeo, 2010). Por esto pueden formar largas colonias que producen los denominados blooms o explosiones que son un problema para la purificación de agua para consumo (Stoermer y Smol, 2004; Lehr y Keeley, 2005).

Este grupo también es importante ecológicamente porque se encuentra entre los primeros colonizadores en aguas bentónicas donde son la base de los biofilms sobre rocas u otros sustratos (Bellinger y Sigeo, 2010; Striebel *et al.*, 2010).

#### **b. Algas verdes (Chlorophyta)**

Este grupo se caracteriza por presentar diversidad de formas y por su coloración verde, contienen cloroplastos fáciles de identificar bajo el microscopio y presentan varios tipos de pigmentos dentro de los grupos clorofílicos y carotenoides (Prescott, 1954; Reynolds *et al.*, 2002; Lawrence y Weldon, 2005).

Su importancia en el ecosistema es principalmente porque aportan gran cantidad de biomasa al medio (Bellinger y Sigeo, 2010). Dominan sobre todo en ecosistemas eutróficos o cuando hay un aumento significativo de nutrientes (Reynolds, 2006), en estas épocas pueden formar “blooms” sobre la superficie del agua en lagunas y “biofilms” sobre el sustrato en el caso de los ríos (Kelly *et al.*, 2005).

Este grupo se caracteriza por tener una sucesión en cuanto a proliferación sobre un ecosistema, es decir, ocupan espacios donde ya hay otro grupo (diatomeas, algas verde-azules) que colonizó primero un lugar (Arce, 2006; Reynolds, 2006); sin embargo, éstas pueden llegar a superar en número a los grupos anteriormente ahí cuando hay un aumento de nutrientes (Bellinger y Sigeo, 2010).

### **c. Algas verde-azules (Cyanophyta)**

Este grupo puede presentar formas globulares o filamentosas en su mayoría y se caracterizan por presentar algunas coloraciones debido a que los pigmentos que poseen varían de acuerdo a la cantidad de luz que reciben (Bellinger y Sigee, 2010).

Este grupo habita la tierra desde hace 3500 millones de años y han sido dominantes durante casi la mitad de ese tiempo, por eso se han adaptado prácticamente a todo tipo de ecosistema de agua dulce del mundo y están presentes en un gran número (Alles, 2008; Bellinger y Sigee, 2010).

Se los puede encontrar en varios tipos de aguas (bajo o alto nivel de nutrientes), aguas ácidas e incluso semisalinas, y sobre todo en agua dulce, dominan en ambientes con baja temperatura tanto en lagunas como en ríos (Cartaxana, 2009; Bellinger y Sigee, 2010).

La dinámica de cada uno de estos grupos es diferente; sin embargo, todos estos tienen una gran importancia en el ecosistema como conjunto, ya que las relaciones de dominancia y adaptación son las que permiten que exista balance en un ecosistema, cuando este régimen se ve interrumpido, por un derrame o disturbio, todo este conjunto se ve afectado cada uno a su manera pero el daño suele ser general.

### **3.4. Fitoplancton como bioindicador**

El uso de estos organismos como bioindicadores es cada vez más importante ya que brindan información sensible del ecosistema, que los análisis de agua o sedimento no aportan.

Son muy útiles para determinar cualquier tipo de contaminación orgánica debido a que muchos géneros son muy tolerantes a la carga orgánica y otros más sensibles a la misma (Arce, 2006). Como tienen una alta tasa de reproducción son útiles para conocer cambios o fluctuaciones en el ecosistema tanto a corto como a largo plazo (Suthers,

2009). De acuerdo a esto, su uso como bioindicadores se da en base al principio de preferencia que tengan, es decir, que tipo de hábitat toleran y en cual no pueden sobrevivir (Arce, 2006; Bellinger y Sigeo, 2010).

### 3.4.1. Criterios para la definición de bioindicadores

De todos los organismos usados como bioindicadores existen algunos que aportan mayores características y por lo tanto son más confiables cuando se buscan resultados en un plazo específico. En la Tabla 1 se detallan las características más importantes de los grupos más utilizados:

**Tabla 1.** Características de diferentes grupos biológicos que se utilizan como bioindicadores de calidad de agua.

Características	Bacterias	Protozoos	Algas	Macroinvertebrados	Micrófitos	Peces
Taxonomía	2	1	1	3	3	3
Muestreo	2	2	2	2	3	1
Distribución	3	3	3	2	2	1
Información	1	1	2	2	2	2
Int. Económico	2	1	1	1	2	2
Bioacumulación	1	1	1	2	2	3
Laboratorio	2	1	2	2	2	1
Genética	1	1	2	2	2	1
Nivel Trófico	1	1	1	3	1	2
Sedentaridad	1	1	2	2	3	1
Abundancia	2	2	3	3	1	1
Ciclo de Vida	1	1	1	2	2	2
Tamaño	1	1	1	3	3	3
Variabilidad	1	1	2	2	3	1
Uso (%)	15	17	25	26	5	6

Fuente: Sierra, 2011.

**Nota:** Los valores que se detallan por característica (que van del 1 al 3), son índices asignados por el autor a cada grupo biológico para determinar qué tan viables son como bioindicadores de calidad de agua. Valores más altos indican mayor viabilidad.

En base a las características anteriormente descritas se puede ver que a pesar de que todos estos organismos son considerados bioindicadores, el fitoplancton (algas) y los macroinvertebrados son los grupos más utilizados para evaluar la calidad del agua, por lo tanto, son los más importantes; sin embargo, dentro del fitoplancton se deben considerar ciertas características importantes que determinan si una especie dentro de

este grupo específico es válida como bioindicador, por esto es necesario destacar cinco características según Bellinger y Sigeo (2010):

1. Rango ecológico limitado
2. Respuesta rápida a cambios ambientales
3. Taxonomía conocida
4. Identificación confiable
5. Amplia distribución

Si se cumple con estas características, o al menos con la mayoría de ellas, los resultados van a ser más fáciles de obtener y también más confiables. Las relaciones que tiene cada género o especie con su ecosistema y la combinación de información de cada uno de ellos pueden ayudar a obtener un análisis de calidad de agua, que es lo que la presente investigación busca obtener (Kumari *et al.*, 2008). Para un análisis más detallado de las características de bioindicación para cada género de fitoplancton encontrado en Papallacta se debe considerar la historia natural de cada uno de ellos, este análisis se detalla en el CAPÍTULO IV.

### 3.5. Taxonomía

Para clasificar a las especies es necesario conocer ciertos parámetros básicos importantes (Tabla 2).

**Tabla 2.** Grupos principales de fitoplancton de agua dulce y su relación con varias características utilizadas para su clasificación.

Filo o Género	Color en microscopio	Morfología	Motilidad
Cyanophyta (Verde-azules)	Azul-verde	Colonias	Control de flotabilidad
Chlorophyta (Verdes)	Verde hierba	Unicelular o Colonias filamentosas	Algunos presentan flagelos
Euglenophyta	Diferentes colores	Unicelular	La mayoría presenta flagelos
Xanthophyta	Amarillo-verde	Unicelular o Filamentosas	Zoosporas y gametos con flagelos
Dinophyta	Rojo-café	Unicelular	Flagelados
Cryptophyta	Varios colores	Unicelular	La mayoría presenta flagelos
Chrysophyta	Dorado-café	Unicelular o Colonias	Algunos presentan flagelos
Bacillariophyta (Diatomeas)	Dorado-café	Unicelular o Colonias filamentosas	Capacidad de deslizarse
Rhodophyta	Rojo-café	Unicelular o Colonias	No se mueven
Phaeophyta (Algas pardas)	Café	Multicelulares	No se mueven

Fuente: Bellinger y Sigeo (2010).

### 3.6. Identificación

Para la identificación se recurre siempre al uso de claves que enumeran cada una de las características hasta llegar a la caracterización que se busca; la identificación de las especies de agua dulce en Ecuador tiene dificultad porque no existen trabajos detallados a ese nivel; sin embargo, se puede lograr una identificación a nivel de género para que el trabajo sea más confiable, dadas estas limitaciones se utilizaron claves morfológicas, mientras que la clasificación taxonómica solo se utilizó para comparar los resultados y confirmarlos.

Para el proceso en sí se utilizan parámetros que son fáciles de identificar, las claves usualmente empiezan por describir dos características de donde se parte y en el caso del fitoplancton se empiezan por las especies más grandes (Bellinger y Sigeo, 2010), luego se compara la forma dentro del grupo ya definido y se siguen patrones como el color, forma y tamaño de los cloroplastos, si forman colonias o son unicelulares (Prescott, 1954; Bellinger y Sigeo, 2010), entre otros.

### 3.7. Análisis de las variables abióticas

En la etapa de campo se tomaron varios parámetros con el fin de determinar las condiciones a las que está expuesto el fitoplancton en Papallacta. Son además un componente importante dentro del procedimiento de muestreo para análisis de calidad de agua.

**Profundidad de muestreo:** Es importante porque permite conocer el límite en profundidad hasta donde se encuentra el fitoplancton en la columna de agua. Este proceso se realiza con la ayuda del disco Secchi que proporciona la profundidad en centímetros en base al paso de luz o transparencia, esta distancia determina los tres puntos donde se toman las muestras con la botella Van Dorn. Este parámetro es muy importante debido a que el paso de luz puede proveer información en relación a la calidad del agua de acuerdo a las características que se relacionan directamente con la

profundidad como la estratificación o la presencia de sedimentos en una cierta zona (Alberta Environment, 2006).

**Profundidad:** Adicionalmente se toma otra profundidad que ayuda a determinar la topografía del terreno bajo el agua, para esto se usa un fishfinder que es muy común en el uso de la pesca ya que funciona como un escáner de movimiento, además proporciona información topográfica del sustrato que se encuentra bajo el agua gracias a que posee un sistema de sonar que envía ondas refractarias. De esta manera se puede determinar en qué parte del punto es más factible tomar muestras de sedimento cuando se lo requiere (Humminbird, 2007).

**Temperatura:** Este parámetro es muy importante ya que determina la producción del fitoplancton en términos de biomasa de acuerdo al rango de adaptación de cada especie, tiene una fuerte influencia sobre la tasa de reproducción de estos organismos debido a que actúa sobre los procesos enzimáticos y sobre la composición celular tanto en rangos de temperatura altos como bajos, es difícil determinar dichos rangos de manera general ya que la forma en que la temperatura influye sobre otros organismos es específica de cada especie (Goldman, 1977). Para el desarrollo de esta investigación es importante porque los cambios estacionales en Papallacta no afectan mayormente la temperatura del agua por lo cual ésta se mantiene dentro de un rango constante durante todo el ciclo anual.

**Conductividad:** Se utiliza mucho en estudios ambientales para monitorear la carga iónica en el agua. De esta manera se puede determinar qué adaptaciones han desarrollado ciertos organismos, en este caso fitoplancton, para habitar en un ecosistema, ya que la carga iónica está directamente relacionada a los procesos osmóticos de los organismos (Alberta Environment, 2006), la conductividad en el agua puede cambiar como resultado de procesos físico-químicos, precipitación, intercambio de iones, adsorción y procesos de óxido-reducción específicos de un lugar (Radtke *et al.*, 2010).

**Sólidos Disueltos:** Este parámetro está relacionado al anterior, se refiere a las partículas disueltas y en ciertos casos suspendidas en una cantidad de agua. Estos pueden ser de origen orgánico e inorgánico. La importancia de este control en ecosistemas de agua dulce es porque permite identificar posibles problemas con la calidad de agua; sin embargo, no es un índice directo de contaminación, solamente funciona como un indicador de carga orgánica o inorgánica en el agua, lo cual puede ser parte de procesos naturales de la laguna (Alberta Environment, 2006).

**pH:** La importancia de tomar este parámetro es principalmente debido a que el fitoplancton necesita de ciertas condiciones para vivir, muchas especies viven solamente en ciertos rangos de pH mientras que otras pueden soportar extremos, debido a esto este parámetro afecta directamente la producción de biomasa del fitoplancton ya que las variaciones de pH pueden alterar los nutrientes esenciales, cambiar la distribución de carbono en el agua y su disponibilidad además de ocasionar daños fisiológicos directos sobre los organismos si los cambios son extremos en relación a los niveles normales que cada especie requiere (Chen y Durbin, 1994). Grupos como las algas verdes son capaces de tolerar amplios rangos de pH, es decir, se pueden adaptar fácilmente a cualquier condición de cierta forma más fácil que otros grupos (Chakraborty *et al.*, 2011). Los cambios de pH están relacionados directamente con la variación de temperatura y oxígeno disuelto, lo que a su vez influye sobre la producción de fitoplancton (Chen y Durbin, 1994).

**Oxígeno disuelto:** Indica la cantidad de este elemento presente en el agua lo que a su vez determina qué tipo de organismos predominan en el medio. En las células el oxígeno guarda o libera energía vital para los procesos naturales de los organismos acuáticos, bajas concentraciones de oxígeno disuelto pueden aumentar la mortalidad de las especies, alterar la distribución y reducir la tasa de crecimiento (Alberta Environment, 2006; EPA, 2007). El oxígeno disuelto en el agua puede venir de la atmósfera que se disuelve en la superficie, de la fotosíntesis de las plantas y principalmente del fitoplancton, éste es consumido por animales, bacterias y plantas acuáticas a través de la respiración y también se gasta en procesos químicos como oxidación y nitrificación. Si se reduce el oxígeno en el agua se puede inhibir la

desnitrificación lo que lleva a un aumento de fosfatos, amoníaco e incluso puede haber una salida de metales pesados desde los sedimentos del fondo (EPA, 2007).

El oxígeno disuelto es también importante porque tiene una dinámica definida en la laguna ya que en la superficie se produce debido a la fotosíntesis mientras que el consumo se incrementa conforme la profundidad aumenta debido a que todos los organismos necesitan del elemento.

### **3.8. Influencia de la estacionalidad sobre las comunidades fitoplanctónicas**

Los cambios estacionales son determinantes sobre las especies y sobre el ecosistema en general, la dinámica de ambas partes está sujeta a variaciones lo cual puede cambiar las condiciones de vida en un ecosistema.

Los ecosistemas de agua dulce en Ecuador presentan poca variación según la época debido a que el país está ubicado en una zona tropical y en la altura no existen cambios significativos entre temporadas (Luque y Martínez, 2003). Una de las características más importantes para la producción de fitoplancton es la temperatura, en el caso de Papallacta, al igual que otras lagunas de altura, la temperatura es constante durante todo el ciclo anual y no dependen de la época sino de la elevación por lo que existen pisos térmicos con una temperatura constante (Casallas y Gunkel, 2001), esto tiene un contraste con las lagunas de zonas templadas donde las épocas son bien marcadas y se forma una estratificación más clara (Marshall, 1965).

Dicho esto, la dinámica de las poblaciones de fitoplancton depende de otros factores, como la lluvia, incidencia de luz, corrientes o el paso de sedimentos hacia la laguna, entre otras características específicas del sitio. Es especial el hecho de que las variaciones se pueden dar en períodos cortos, básicamente por las fluctuaciones de temperatura entre día y noche (Casallas y Gunkel, 2001), esto también influye sobre la producción ya que la fotosíntesis se da durante el día. Mientras mayor cantidad de luz ingrese durante el día mayor producción de fitoplancton puede haber, lo que en ciertos

casos puede llevar a su vez a una sobreproducción que puede impedir el paso de luz por un tiempo determinado (Sayer *et al.*, 2010).

Además, cuando existe gran incidencia de luz también se puede dar un mayor crecimiento de plantas, sobre todo hablando de los ríos, lo cual en algunos casos provoca competencia entre ambos organismos (plantas vs plancton) mientras que en otros son de beneficio, ya que muchas plantas pueden servir de sustrato para las especies planctónicas (Suthers, 2009; Sayer *et al.*, 2010).

En la época de lluvia, las corrientes pueden variar haciendo de los ríos un hábitat negativo para el fitoplancton ya que dichas corrientes son más fuertes, posiblemente causando que el fitoplancton se traslade a otros sitios, además el paso de sedimento varía en relación a las épocas de menos lluvia influyendo en su tasa de reproducción debido a que partículas pequeñas de sedimento quedan suspendidas cerca de la superficie impidiendo el paso de luz (Suthers, 2009).

En el caso de Papallacta los organismos fitoplanctónicos pueden verse afectados por estos fenómenos, sobre todo cuando existe un aumento en la corriente y se mueven del río hacia la laguna, por esto también las especies encontradas en ambos hábitats son las mismas en su mayoría, sin importar la época del año; sin embargo, existen ciertas excepciones que son únicas de cada hábitat.

## CAPÍTULO IV

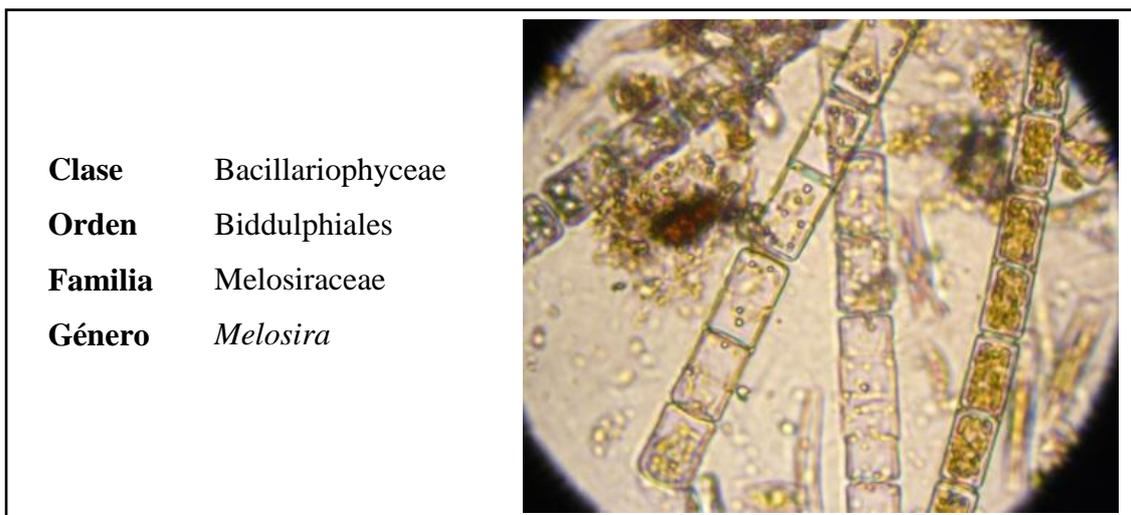
### HISTORIA NATURAL DE LOS GÉNEROS ENCONTRADOS EN PAPALLACTA

La función que los géneros de fitoplancton encontrados desempeñan en la Laguna de Papallacta y sus afluentes, es importante para conocer la salud ecológica de estos ecosistemas, por lo que a continuación se detalla la historia natural de los géneros encontrados con sus características ecológicas y de bioindicación.

#### 4.1. Diatomeas Centrales

Este grupo se caracteriza por presentar formas cilíndricas o discoidales (Reynolds, 2006). Presentan simetría radial en vista valvar (Bellinger y Sigee, 2010), algunas especies pueden formar filamentos por adhesión de células (Reynolds, 2006). Son en su mayoría planctónicas y desde el punto de vista evolutivo se cree que se desarrollaron antes que las diatomeas penales, además se considera que su manifestación fue simultánea en la mayoría de ecosistemas donde habitan (Stoermer y Smol, 2004).

##### 4.1.1. *Melosira* sp.



Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 13.** *Melosira* sp.

## **Características Generales**

El género *Melosira* (Figura 13) se caracteriza por presentar formas rectangulares o capsulares, con las células unidas de lado en lado formando estructuras como filamentos en cadena (Prescott, 1954). No presentan rasgos característicos en la superficie pero se diferencian por la forma, también pueden presentar paredes delgadas o gruesas dependiendo de la especie. Presentan cloroplastos en forma de disco o platos de color dorado o café (Bellinger y Sigeo, 2010). Se reconocen cerca de 60 especies aceptadas taxonómicamente (Guiry y Guiry, 2012).

## **Ecología y Distribución**

Tienen amplia distribución, sobre todo en climas fríos, donde la temperatura del agua está cerca a los 10°C en invierno (Stoermer y Smol, 2004), además es un género capaz de sobrevivir en áreas con poca luz, los cambios de temperatura no son limitantes para su crecimiento y toleran un amplio rango de variación de pH (Stoermer y Smol, 2004). Esto es característico de muchas especies de diatomeas que se presentan como grandes colonias formando cadenas, siendo *Melosira* una de ellas.

## **Condición de Bioindicación**

Los organismos del género *Melosira* habitan en aguas donde hay turbidez con composición arcillosa y se adaptan fácilmente a los cambios en el paso de sedimentos en su hábitat (Bellinger y Sigeo, 2010), son organismos característicos de aguas con baja o cero salinidad, aunque también se los puede encontrar en zonas costeras (Hasle y Syvertsen, 1996).

Pueden sobrevivir en aguas contaminadas, es uno de los 20 géneros descritos por Palmer (1969) como tolerante a contaminación orgánica. *Melosira* tiene un índice de tolerancia a contaminación de uno, el índice más alto es cinco (Likens, 2010).

#### 4.1.2. *Cyclotella* sp.



Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 14.** *Cyclotella* sp.

#### **Características Generales**

Es uno de los géneros más comunes en agua dulce, se caracterizan por tener células aplanadas en forma de disco (Suthers, 2009). En el área central se pueden ver puntos lo cual difiere de la parte externa donde se pueden ver estrías a lo largo de toda la estructura (Bellinger y Sigeo, 2010). Las células se encuentran solas en el medio usualmente y en pocos casos se ven unidas por filamentos (Figura 14). Poseen cloroplastos en forma de disco distribuidos alrededor de la célula (Stoermer y Smol, 2004; Bellinger y Sigeo, 2010). Se aceptan 106 especies taxonómicamente (Guiry y Guiry, 2012).

#### **Ecología y Distribución**

Tienen amplia distribución en todos los continentes tanto en agua dulce como salina (Bellinger y Sigeo, 2010), se las puede encontrar en ríos, lagos y lagunas. Son más comunes en lagos o lagunas oligotróficas aunque esto puede ser influencia de varios factores estacionales o características propias del lugar por lo que el

comportamiento puede variar (Reynolds, 2006). Pueden crecer rápidamente en lagunas y reservorios lo que puede causar bloqueo en el tratamiento de agua (Bellinger y Sigeo, 2010).

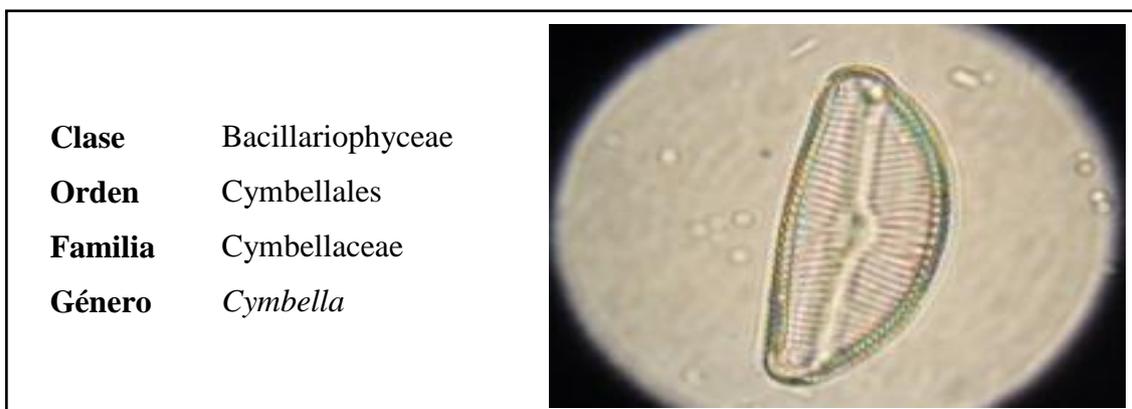
### **Condición de Bioindicación**

Como siempre están relacionados con una baja cantidad de nutrientes (oligotrófico) son de gran ayuda para determinar si algún sitio ha presentado cambios frente a un estado anterior (Stoermer y Smol, 2004; Reynolds, 2006), además son uno de los géneros más resistentes al aumento de salinidad en un medio (Bellinger y Sigeo, 2010).

### **4.2. Diatomeas Penales**

Las diatomeas penales presentan una forma alargada con simetría bilateral (Suthers, 2009), presentan ejes longitudinales y transversales y diversas formas (Bellinger y Sigeo, 2010). Algunas especies dentro de este grupo son móviles gracias a que secretan capas de mucilago por medio del raphe (línea que une dos partes de una diatomea de extremo a extremo) (Suthers, 2009). Este grupo se caracteriza por ser en su mayoría de aguas bentónicas pero al igual que las centrales no se limitan a esta zona solamente (Bellinger y Sigeo, 2010).

#### 4.2.1. *Cymbella* sp.



Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 15.** *Cymbella* sp.

#### Características Generales

*Cymbella* es un género que se caracteriza por tener valvas asimétricas en el eje apical, con varias estrías a lo largo de su estructura (Figura 15) (Spaulding y Edlund, 2009). El raphe es casi central con una curvatura hacia la parte dorsal, lo cual es una característica distintiva de este género (Spaulding y Edlund, 2009). Se caracterizan por tener un margen dorsal convexo y un margen ventral recto, cóncavo o algo convexo dependiendo de la especie. Contienen un solo cloroplasto en forma de H con un solo pirenoide en la parte central (Bellinger y Sigeo, 2010). Existen 225 especies aceptadas taxonómicamente (Guiry y Guiry, 2012).

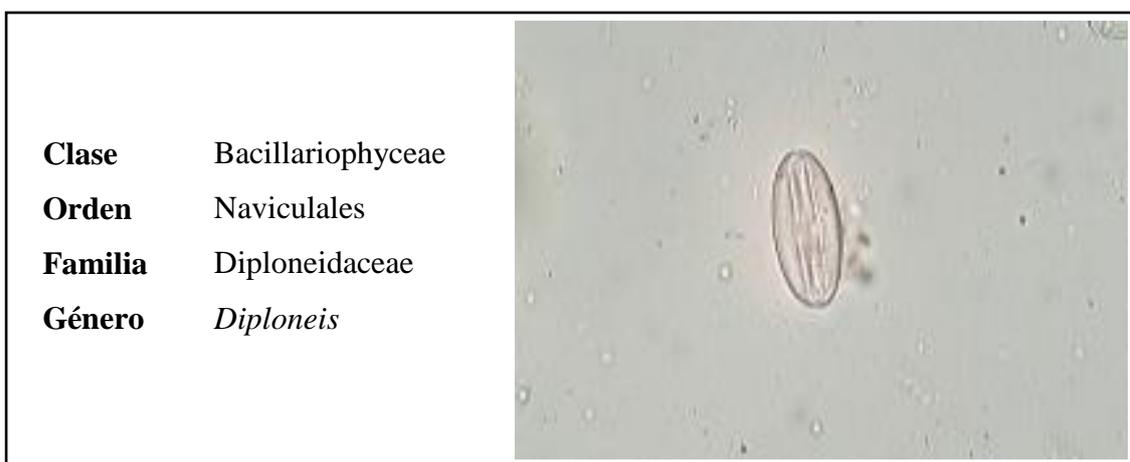
#### Ecología y Distribución

Este género es muy común en aguas profundas, en especial tienen ventaja de crecimiento sobre otros géneros en zonas con mayor incidencia de rayos UV (Stoermer y Smol, 2004). Pueden crecer en filtros de tratamiento de agua llegando a ser tantos que pueden causar bloqueo (Bellinger y Sigeo, 2010). Tienen distribución cosmopolita principalmente en agua dulce (Stoermer y Smol, 2004). Algunos de estos organismos se pueden desplazar gracias a la secreción de mucílago (Reynolds, 2006).

## Condición de Bioindicación

Son especies que habitan en sitios con rangos de pH neutro a alcalino y donde hay riqueza de nutrientes (Bellinger y Sigeo, 2010). Algunas especies dentro de este género secretan filamentos que les permite pegarse a ciertas superficies o unirse a otros organismos por lo que pueden colonizar rápidamente ecosistemas en recuperación donde ya existan especies pioneras (Bellinger y Sigeo, 2010) y donde exista baja cantidad de luz.

### 4.2.2. *Diploneis* sp.



Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 16.** *Diploneis* sp.

## Características Generales

Este género se caracteriza por tener células lineales, elípticas o en rombo (Bellinger y Sigeo, 2010), presentan los extremos redondos con el raphe justo en la línea media y bordeado por dos crestas o canales longitudinales (Figura 16) que separan la parte central del extremo donde se ven las estrías (Spaulding y Edlund, 2009; Bellinger y Sigeo, 2010). Poseen mucho sílice en sus frústulas (Spaulding y Edlund, 2009). Existen cerca de 75 especies reconocidas (Guiry y Guiry, 2012).

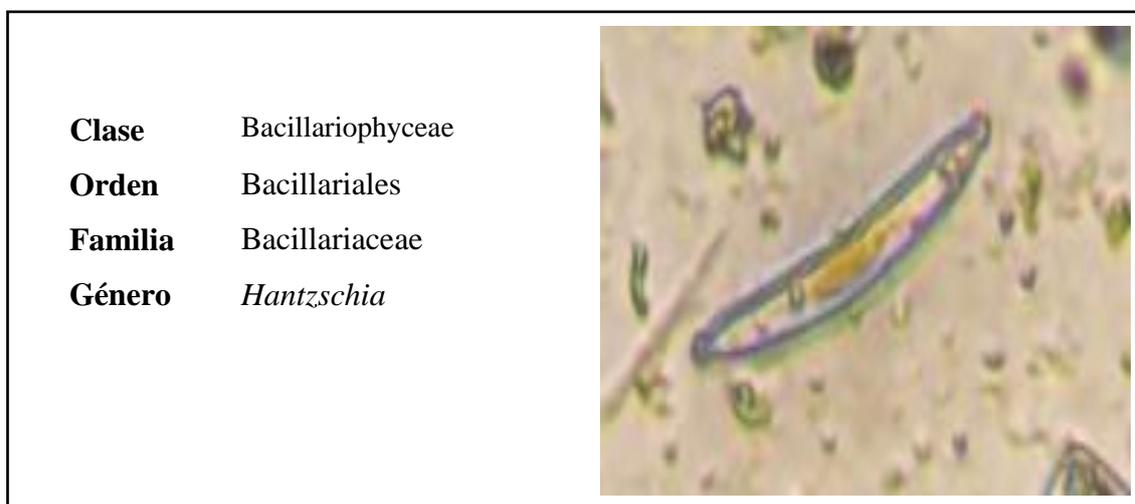
## Ecología y Distribución

Este género es diverso, por lo tanto habitan tanto agua dulce como salada aunque la mayor cantidad de especies son de hábitats marinos. Se las encuentra principalmente en zonas con sedimento especialmente donde hay limo y en todo tipo de aguas (Spaulding y Edlund, 2009).

## Condición de Bioindicación

Habitan en diferentes tipos de ecosistemas, desde aguas litorales cerca del sedimento, epipelágicas e incluso aguas quietas como lagunas o reservorios. Son alcalófilas y tolerantes a la contaminación si su hábitat cambia (Bathurst *et al.*, 2010; Bellinger y Sigee, 2010).

### 4.2.3. *Hantzschia* sp.



Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 17.** *Hantzschia* sp.

## **Características Generales**

*Hantzschia* presenta forma curva homogénea definida por un margen convexo fácil de identificar. Cada célula contiene dos cloroplastos uno a cada lado. Los ápices son romos y redondeados (Lawrence y Weldon, 2005; Bellinger y Sigeo, 2010) dando la forma a la frústula como de un banano (Figura 17). El raphe se encuentra a lo largo del manto valvar, se extiende a lo largo del costado entre los polos (Kelly *et al.*, 2005). Se han descrito 60 especies dentro de este género (Guiry y Guiry, 2012).

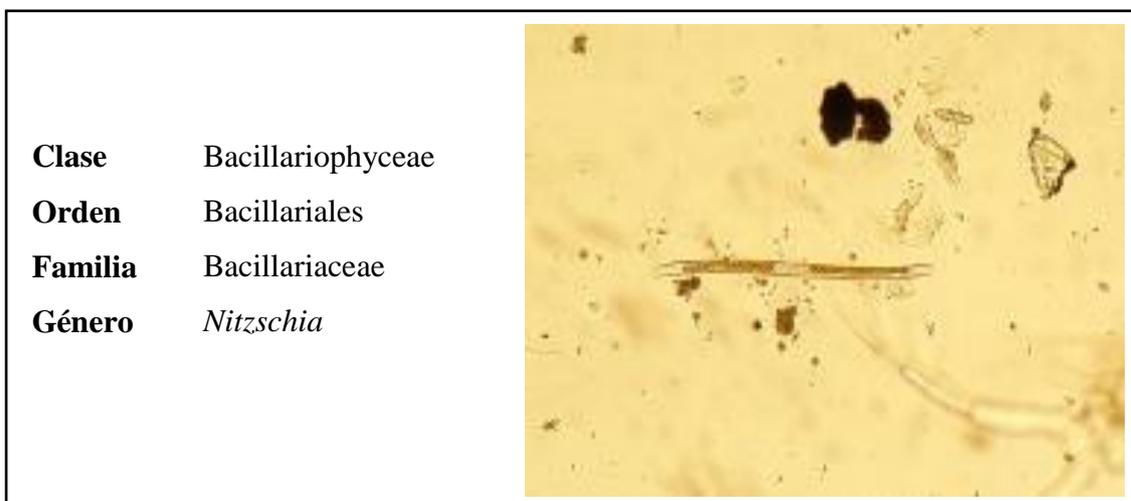
## **Ecología y Distribución**

Son epífitas, se encuentran pegadas a otras superficies como plantas o almohadillas vegetales, principalmente en aguas con baja corriente como ciertos ríos o en aguas quietas donde existen pocos nutrientes (Stoermer y Smol, 2004). Tienen distribución cosmopolita y una extensa variabilidad genética (Kelly *et al.*, 2005; Likens, 2010).

## **Condición de Bioindicación**

Se encuentran en aguas con rangos de pH entre 5.6 y 8.5; sin embargo, alcanzan mayor densidad en aguas alcalinas o neutras que en aguas acidificadas y son alcalófilas (Stoermer y Smol, 2004).

#### 4.2.4. *Nitzschia* sp.



Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 18.** *Nitzschia* sp.

#### **Características Generales**

Es un género amplio, se caracteriza por tener distintas formas de acuerdo a la especie pero casi siempre presentan dos o más características en común: elíptica, linear estrecha, sigmoidea (vista valvar) (Bellinger y Sigeo, 2010). Este género se caracteriza por tener organismos alargados con los polos redondos, se pueden observar estrías pero difíciles de contar (Kelly *et al.*, 2005). El raphe forma un canal que no sigue la misma tendencia de otros géneros ya que puede estar dispuesto en ambos márgenes (lados) con una parte diagonalmente opuesta a la otra (Bellinger y Sigeo, 2010) o en el mismo margen dependiendo de la especie (Kelly *et al.*, 2005). Se pueden ver dos cloroplastos alargados en cada extremo y entre ellos es donde se encuentra el núcleo del organismo (Figura 18) (Kelly *et al.*, 2005; Bellinger y Sigeo, 2010). Se reconocen 353 especies taxonómicamente (Guiry y Guiry, 2012).

#### **Ecología y Distribución**

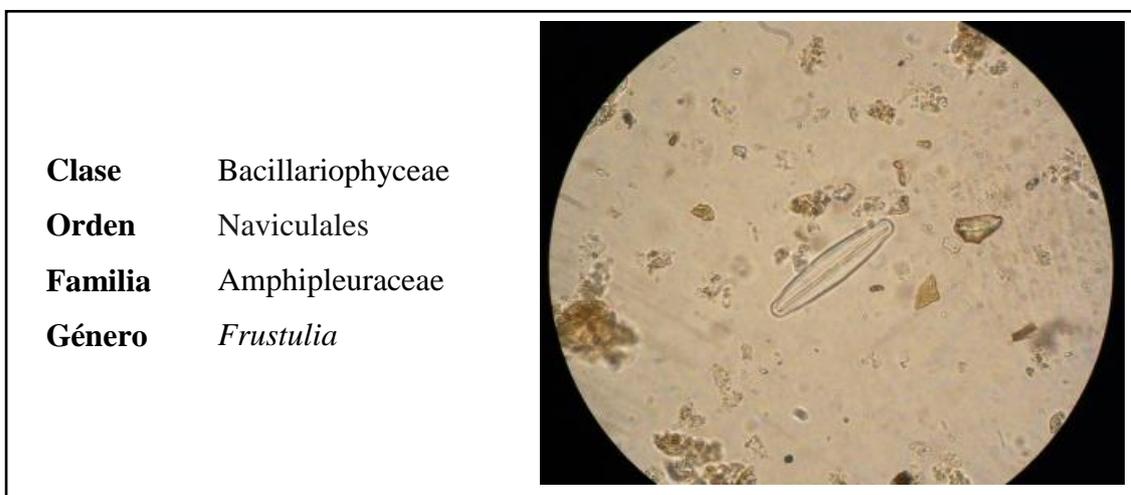
Tienen distribución cosmopolita, se las puede encontrar en prácticamente cualquier tipo de agua tanto en el océano como en agua dulce (Stoermer y Smol, 2004;

Bellinger y Sigeo, 2010). Son células solitarias bentónicas o planctónicas, pueden crecer en sistemas de tratamiento de agua y bloquear los filtros (Bellinger y Sigeo, 2010). Algunas especies dentro de este género son capaces de moverse por lo que pueden colonizar rápidamente cualquier medio (Stoermer y Smol, 2004).

### Condición de Bioindicación

Son alcalófilas y tolerantes a muchos tipos de contaminación (Bathurst *et al.*, 2010), buenas indicadores cuando los nutrientes bajan en el medio (Reynolds, 2006), son muy comunes en aguas poco profundas en el caso de ríos o se encuentran en la superficie en caso de lagos o lagunas y al igual que *Eunotia* son tolerantes a la acidificación (Reynolds, 2006).

#### 4.2.5. *Frustulia* sp.



Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 19.** *Frustulia* sp.

### Características Generales

Son un grupo bentónico de vida libre (Bellinger y Sigeo, 2010), tienen una forma romboide o lanceolada con los ápices redondos y romos (Kelly *et al.*, 2005). El raphe es central y extendiéndose a lo largo de toda la estructura valvar (Figura 19), las estrías

están ordenadas de tal manera que se produce un patrón de filas en dirección al raphe (Kelly *et al.*, 2005). Se han reconocido 89 especies (Guiry y Guiry, 2012).

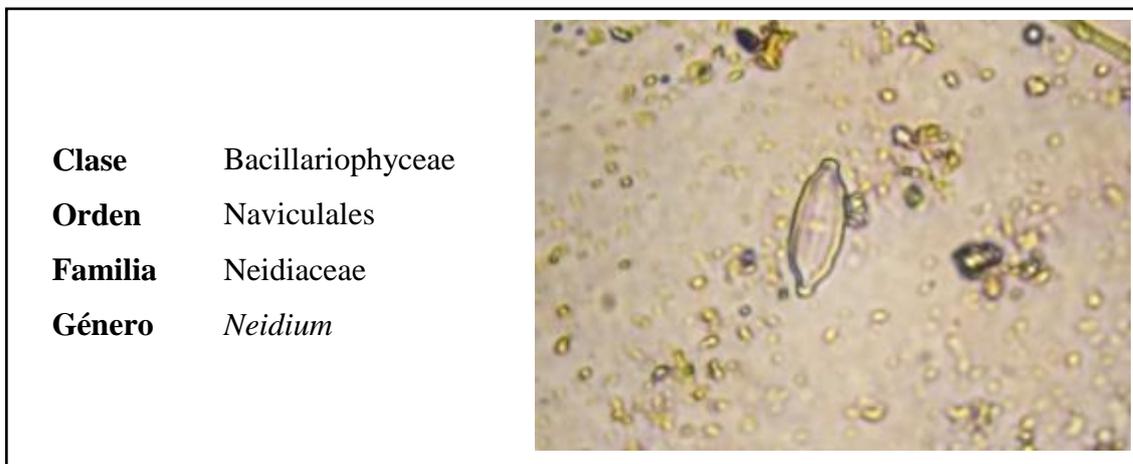
### **Ecología y Distribución**

Se encuentran en distintos tipos de agua, principalmente donde el pH es (<7) (Kelly *et al.*, 2005; Bellinger y Sigee, 2010), están distribuidos en América y Europa indistintamente.

### **Condición de Bioindicación**

Son alcalófilas y tolerantes a contaminación, se las puede encontrar en superficies húmedas cuando no están en el agua propiamente (Bathurst *et al.*, 2010).

#### **4.2.6. *Neidium* sp.**



Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 20.** *Neidium* sp.

### **Características Generales**

Presenta una frústula lanceolada y linear en el centro (Figura 20), con los ápices redondeados (Kelly *et al.*, 2005; Bellinger y Sigee, 2010), las estrías no tienen un patrón

determinado con forma de poros elongados e interrumpidos por líneas longitudinales cerca de los márgenes de las valvas (Kelly *et al.*, 2005). Poseen dos cloroplastos en forma de H y el raphe cercano al centro que toman direcciones opuestas en cada ápice (Bellinger y Sigee, 2010). Existen 75 especies aproximadamente (Guiry y Guiry, 2012).

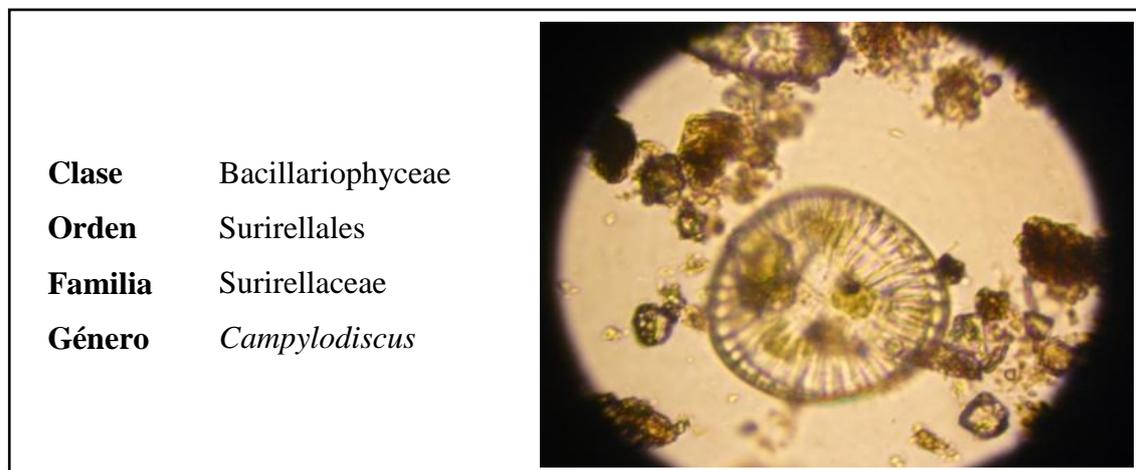
### **Ecología y Distribución**

Se encuentran en aguas generalmente pobres en nutrientes (Bellinger y Sigee, 2010).

### **Condición de Bioindicación**

Habitan aguas con pH ácido principalmente (Spaulding y Edlund, 2009), dentro de un rango de 3 a 7 (Kelly *et al.*, 2005).

#### **4.2.7. *Campylodiscus* sp.**



Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 21.** *Campylodiscus* sp.

## Características Generales

Se caracterizan por poseer largas células (60 hasta 200  $\mu\text{m}$ ), de forma casi circular (vista valvar) o en forma de montura (vista lateral) (Bellinger y Sigee, 2010). Poseen un cloroplasto grande y el raphe se caracteriza por estar alrededor de todo el perímetro valvar y cerrarse hacia el interior formando un canal tubular (Figura 21), presentan varias estrías formando una estructura en forma de costilla. Usualmente se presentan como células individuales y en vista valvar (Kelly *et al.*, 2005; Bellinger y Sigee, 2010). Se aceptan 37 especies taxonómicamente (Guiry y Guiry, 2012).

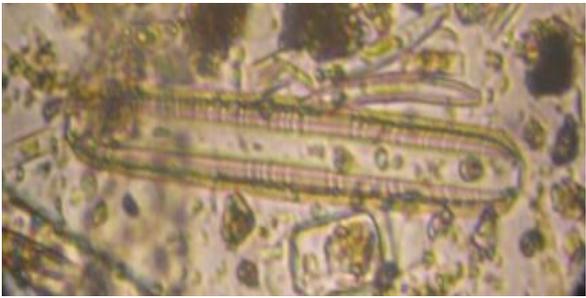
## Ecología y Distribución

Tienen amplia distribución tanto en el océano donde se encuentran en la zona epipelágica, y en agua dulce (Bellinger y Sigee, 2010).

## Condición de Bioindicación

Son especies comunes de aguas alcalinas, sobre todo habitan en ambientes donde existe mucha concentración de cloruro de sodio (Stoermer y Smol, 2004).

### 4.2.8. *Pinnularia* sp.

<b>Clase</b>	Bacillariophyceae	
<b>Orden</b>	Naviculales	
<b>Familia</b>	Pinnulariaceae	
<b>Género</b>	<i>Pinnularia</i>	

Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 22.** *Pinnularia* sp.

## Características Generales

Es un género grande que se caracteriza por presentar células lineales, lanceoladas e incluso elípticas dependiendo de la especie (Figura 22) (Bellinger y Sigee, 2010). Los ápices son redondos usualmente, el raphe es central con las terminaciones en la misma dirección para ambos lados (Kelly *et al.*, 2005; Bellinger y Sigee, 2010). Tienen dos cloroplastos, sin embargo algunas especies tienen uno solo que puede ser en forma de H (Kelly *et al.*, 2005). Existen aproximadamente 500 especies reconocidas (Guiry y Guiry, 2012).

## Ecología y Distribución

Tienen amplia distribución, muy común en sedimentos u otros substratos (Bellinger y Sigee, 2010), habitan en prácticamente cualquier tipo de ecosistema, en varios pisos climáticos y con diferentes características (Bathurst *et al.*, 2010). Por esta razón se las puede encontrar tanto en aguas con alta o baja cantidad de nutrientes.

## Condición de Bioindicación

Son aerofílicas, muy comunes en suelos húmicos aparte del agua (Bathurst *et al.*, 2010), pueden tolerar contaminación por metales y aguas acidificadas (Stoermer y Smol, 2004).

### 4.2.9. *Rhopalodia* sp.

<b>Clase</b>	Bacillariophyceae	
<b>Orden</b>	Rhopalodiales	
<b>Familia</b>	Rhopalodiaceae	
<b>Género</b>	<i>Rhopalodia</i>	

Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 23.** *Rhopalodia* sp.

## **Características Generales**

Las valvas son dorsiventrales con un margen dorsal arqueado (Figura 23), de forma dorsiventral con los ápices doblados hacia adentro (Kelly *et al.*, 2005; Bellinger y Sigeo, 2010), estos usualmente terminan en punta justo donde termina el raphe, el cual es difícil de observar, presenta una curvatura desde el centro de la válvula ventral (Bellinger y Sigeo, 2010). Tienen un cloroplasto grande a lo largo de toda la frústula que se extiende hasta donde se unen las valvas. Todas las especies dentro de este género presentan cercano al núcleo unos orgánulos fijadores de nitrógeno (Kelly *et al.*, 2005). Se aceptan taxonómicamente 25 especies (Guiry y Guiry, 2012).

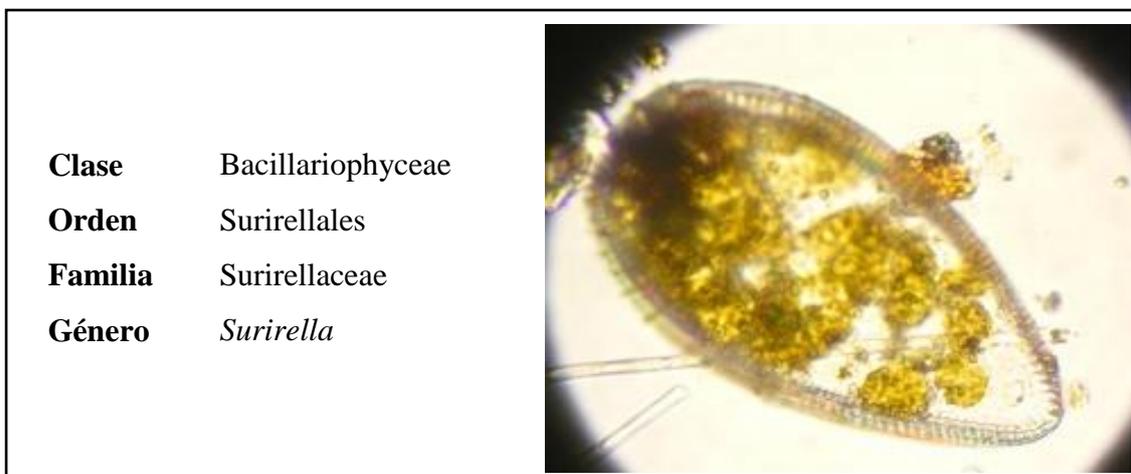
## **Ecología y Distribución**

Son organismos capaces de vivir libremente o estar adheridos entre sí (Bellinger y Sigeo, 2010), se distribuyen tanto en agua dulce como salobre. Son organismos bentónicos, se las puede encontrar pegadas a ciertas plantas (perifiton) o a las rocas (epiliton) (Bathurst *et al.*, 2010).

## **Condición de Bioindicación**

Son alcalófilas, pero se las puede encontrar en varios rangos de pH (2 a 8) (Stoermer y Smol, 2004; Kelly *et al.*, 2005) y son capaces de crecer en sitios con poca luz (Bathurst *et al.*, 2010), son tolerantes a contaminación, además pueden fijar nitrógeno por lo que cuando las cantidades son bajas pueden servir como indicador de deficiencia de este elemento (Bathurst *et al.*, 2010).

#### 4.2.10. *Surirella* sp.



Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 24.** *Surirella* sp.

#### Características Generales

La frústula es bipolar con un eje longitudinal definido, sin embargo pueden tomar formas lanceoladas o rómbicas (Figura 24) (Kelly *et al.*, 2005). El raphe forma un canal alrededor de la frústula, este se separa del interior de la célula por puentes de sílice y es muy difícil de diferenciar. Hay dos cloroplastos pero solamente uno se puede observar en vista valvar (Kelly *et al.*, 2005; Bellinger y Sigeo, 2010). Se reconocen cerca de 170 especies (Guiry y Guiry, 2012).

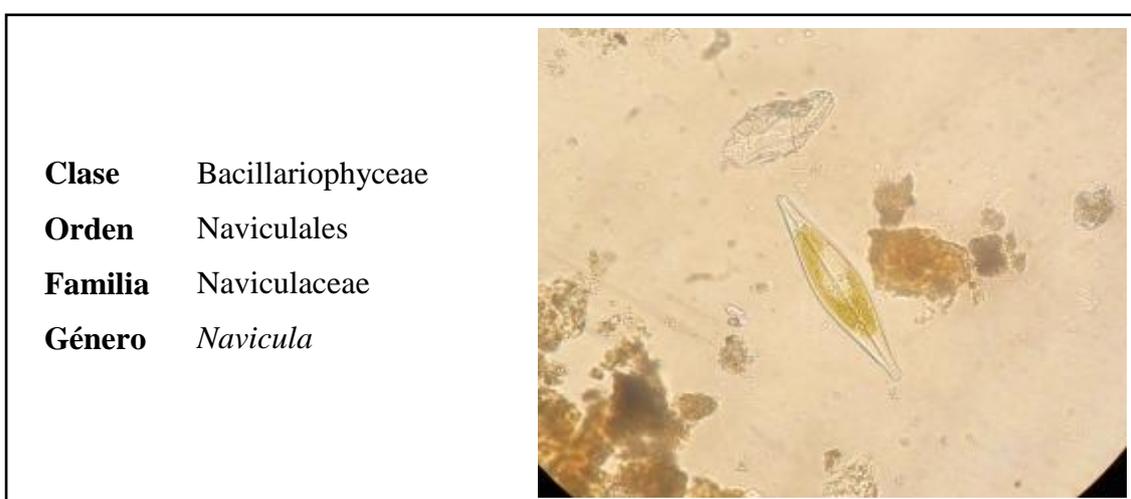
#### Ecología y Distribución

Tienen una amplia distribución tanto en el océano, aguas salobres y en agua dulce (Bellinger y Sigeo, 2010). Estos organismos son arrastrados por las corrientes por lo que se pueden recoger en los sedimentos y rocas (Reynolds, 2006; Bellinger y Sigeo, 2010).

## Condición de Bioindicación

Son epipelágicas (Reynolds, 2006; Bathurst *et al.*, 2010), esto puede ser de ayuda para determinar cambios en las corrientes o cambios en la dinámica de especies relacionadas con este grupo. Son tolerantes a contaminación orgánica (Bathurst *et al.*, 2010).

### 4.2.11. *Navicula* sp.



Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 25.** *Navicula* sp.

## Características Generales

La mayoría de especies de este género son móviles gracias a la secreción de mucilago desde la pared celular (Bellinger y Sigee, 2010). El género *Navícula* es uno de los más difíciles de diferenciar debido a la apariencia muy similar que tienen todas sus especies, se caracterizan por presentar valvas en forma lanceolada con un área pequeña en el centro a forma de eje de donde salen finos surcos paralelos a los ápices de la frústula, además poseen una línea que cruza de un lado a otro de la frústula a forma de unión entre las valvas, la cual se une a ambos ápices (Bellinger y Sigee, 2010). Pueden presentar varios cloroplastos en los costados o incluso uno grande que ocupa la mayor parte de la frústula, los ápices pueden variar en forma dependiendo de la especie (Figura

25) (Bellinger y Sigeo, 2010). Se han descrito aproximadamente 900 especies (Guiry y Guiry, 2012).

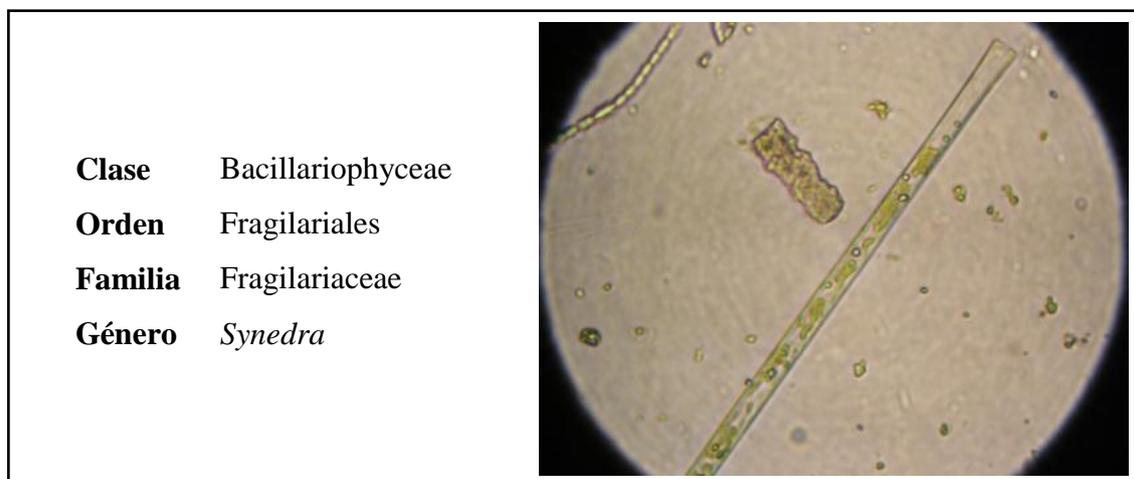
### **Ecología y Distribución**

Es uno de los géneros más comunes, tienen distribución cosmopolita. Son frecuentes en varios tipos de sistemas hídricos costeros y continentales, desde zonas bentónicas hasta cualquier tipo de corrientes, ríos y lagos (Bellinger y Sigeo, 2010). Sin embargo *Navicula* es mucho más común en sistemas lacustres y donde predominan las bajas temperaturas (Stoermer y Smol, 2004), pero también debido a su propiedad de secretar mucilago se pegan a otro tipo de algas o zooplancton lo que les permite llegar a los ríos (Werner, 1977).

### **Condición de Bioindicación**

Al igual que muchas especies de diatomeas son indicadores importantes de calidad de agua ya que toleran cambios importantes en la dinámica del ecosistema, su tasa de reproducción es muy alta, sobre todo en presencia de sílice (Reynolds, 2006), esto permite conocer los cambios que pueden presentarse en una comunidad en caso de algún disturbio (Vázquez, 2006). Específicamente este género es indicador de eutrofización en el agua y se ha encontrado en sitios de media a alta contaminación, además es más común en aguas que presentan turbidez y está usualmente acompañado de otras algas tolerantes como las cianobacterias (Bellinger y Sigeo, 2010). El género *Navicula* tiene un índice 3 de tolerancia a la contaminación según Palmer (Taylor *et al.*, 1979).

#### 4.2.12. *Synedra* sp.



Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 26.** *Synedra* sp.

#### Características Generales

Poseen valvas alargadas de forma lineal (Figura 26), se caracterizan por presentar una estructura angosta y alargada con una línea menos notable que las navículas y con surcos trasversales en ciertos casos (Bellinger y Sigee, 2010). Pueden presentarse de forma individual o como colonias, siendo la primera forma la más común en *Synedra* (Bellinger y Sigee, 2010).

Pueden causar problemas de salud en aguas de consumo humano lo que es fácil de identificar ya que cambia el sabor y produce un olor fuerte, cuando se presentan grandes colonias puede obstruir el paso del agua (Bellinger y Sigee, 2010). Se reconocen 82 especies aceptadas (Guiry y Guiry, 2012).

#### Ecología y Distribución

Tienen amplia distribución, sobre todo en lagos y ríos de aguas calmas de zonas frías. Habitan en ecosistemas oligohalinos o con cero salinidad (Stoermer y Smol, 2004). Es una de las algas más tolerantes a la presencia de metales en un ecosistema, capaz de sobrevivir a cantidades mayores a 1.5 mg/litro de cobre (otras especies toleran

un máximo de 0.7) (Werner, 1977). Además absorben otros metales pesados de forma natural, como el mercurio, el cual se acumula en la pared celular de estas o en el interior cuando hay mayor exposición (Hunding y Lange, 2006). Habita hasta los 150 metros de profundidad.

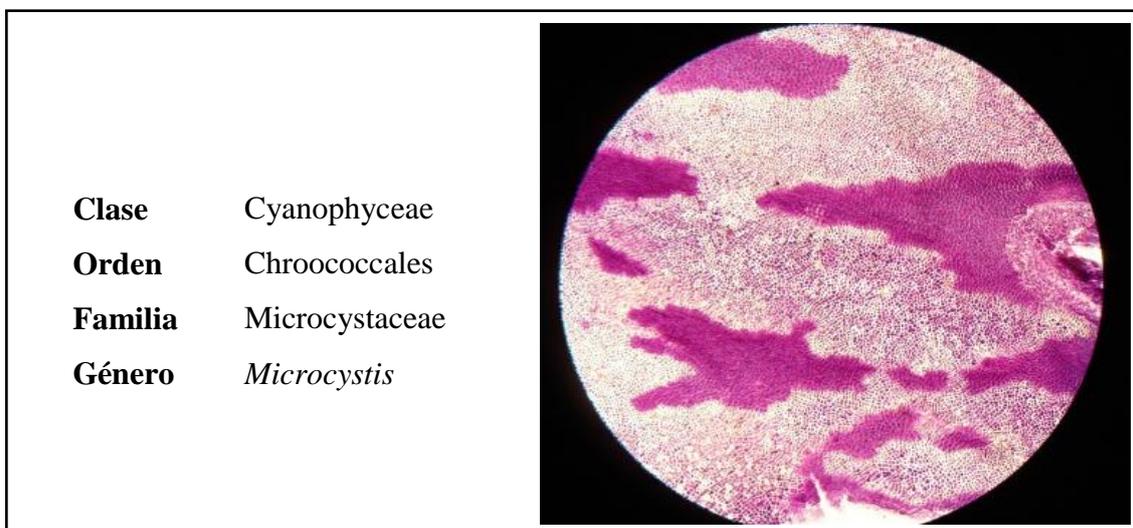
### **Condición de Bioindicación**

*Synedra* es indicadora de eutrofización ya que se desarrolla de mejor manera con la presencia de nitrógeno y fósforo por lo que hay mayor disponibilidad de estos en el medio donde habitan (Reynolds, 2006) produciendo contaminación de forma natural y afectando a otros grupos fitoplanctónicos. Según Palmer (1969) tiene un índice de tolerancia de 2 que corresponde a aguas con cierta contaminación orgánica, incluso puede ser un causante de contaminación natural en ecosistemas no intervenidos (Taylor *et al.*, 1979; Bellinger y Sigeo, 2010).

### **4.3. Cianobacterias (algas verde – azules)**

Es un grupo grande de amplia distribución en agua dulce, presentan variedad de formas y sobre todo distintos tamaños, desde organismos microscópicos hasta colonias de gran tamaño que se pueden ver a simple vista (Prescott, 1954; Reynolds *et al.*, 2002; Bellinger y Sigeo, 2010). Se caracterizan por poseer diferentes pigmentos que varían de acuerdo con el espectro de luz y la intensidad lo que a su vez les puede brindar distintas coloraciones, las ficobilinas predominan en este grupo lo que les da esa coloración verde-azul o café en ciertos casos (Prescott, 1954; Bellinger y Sigeo, 2010). Son algas muy productivas por esta razón es muy común ver “explosiones” de algas verde – azules en aguas eutróficas (O’Sullivan y Reynolds, 2004; Reynolds, 2006), además que se caracterizan por producir toxinas que pueden ser peligrosas tanto para el ecosistema como para el ser humano (Reynolds, 2006; Bellinger y Sigeo, 2010).

#### 4.3.1. *Microcystis* sp.



Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 27.** *Microcystis* sp.

#### Características Generales

Es un género conocido por su toxicidad. Las células de estos organismos son esféricas. Forman colonias grandes de centenares de individuos que forman “blooms” en el agua (Figura 27) (Reynolds, 2006; Bellinger y Sigeo, 2010). Las colonias son irregulares pero usualmente con forma globular (Bellinger y Sigeo, 2010). Las células alcanzan entre 2.5 a 6 micras de diámetro (Bellinger y Sigeo, 2010). Es común verlas en la superficie cuando están en crecimiento pero cuando están en un estado de descanso se acumulan bajo los 3 metros (Chorus, 1999). Poseen vacuolas llenas de gas lo que les permite controlar su flotabilidad (Prescott, 1954; Bellinger y Sigeo, 2010).

Son un problema cuando se reproducen en grandes cantidades ya que contaminan el agua debido a que producen lipopolisacáridos y microcistina que es una hepatotoxina que puede afectar la calidad del agua para consumo humano y en la producción de agua embotellada (Reynolds, 2006; UNESCO, 2009; Bellinger y Sigeo, 2010). Se reconocen 50 especies aproximadamente (Guiry y Guiry, 2012).

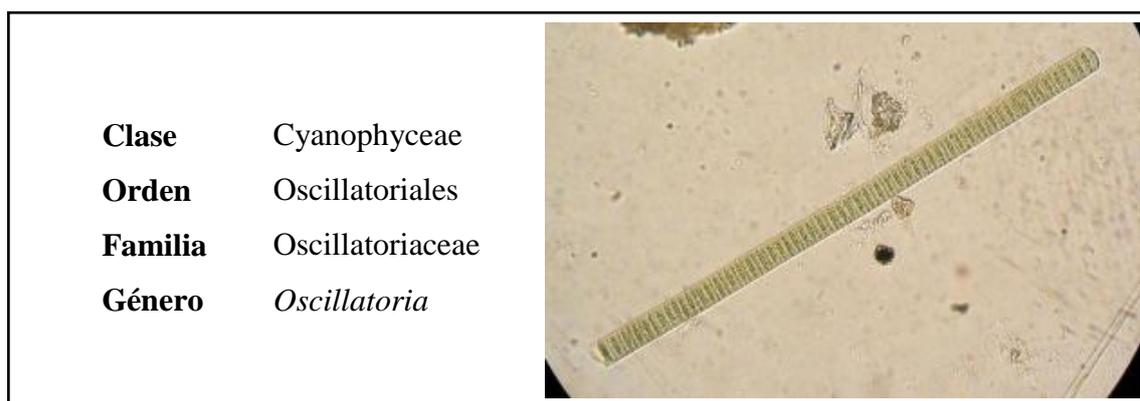
## Ecología y Distribución

Es una cianobacteria dominante en ecosistemas ricos en nutrientes, principalmente se reproducen donde existen grandes cantidades de amonio (Chorus, 1999), sin embargo también crecen en ambientes con poca luz y bajos nutrientes por lo que pueden crecer en otros tipos de ecosistema con diferente composición en el agua (Prescott, 1954; Chorus, 1999; Reynolds, 2006). Tienen amplia distribución en diferentes ecosistemas tanto en agua dulce como salobre.

## Condición de Bioindicación

Este tipo de organismos indican eutrofización ya que su número aumenta en aguas donde la carga de nutrientes acrecienta como producto de la descarga de material orgánico e inorgánico o a su vez por el aumento de biomasa debido a una sobre producción primaria (Reynolds *et al.*, 2002; Bellinger y Sigeo, 2010). Su presencia es más común cuando en el agua existe cualquier tipo de disturbio o contaminación orgánica (Prescott, 1954; Chorus, 1999).

### 4.3.2. *Oscillatoria* sp.



Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 28.** *Oscillatoria* sp.

## **Características Generales**

Este género se conoce por producir toxinas como microcistina, anatoxinas y lipopolisacáridos al igual que *Microcystis* (Bellinger y Sigeo, 2010). Son algas filamentosas y multicelulares (Suthers, 2009) pero no tienen células especializadas como heterófitos que posee *Anabaena* (Suthers, 2009), los filamentos son alargados y simples nunca se ven ramificados (Reynolds, 2006; Bellinger y Sigeo, 2010), los ápices son redondeados, la forma es cilíndrica y son capaces de moverse mediante la secreción de mucilago (Figura 28) (Prescott, 1954; Suthers, 2009; Bellinger y Sigeo, 2010). Se reconocen aproximadamente 60 especies (Guiry y Guiry, 2012).

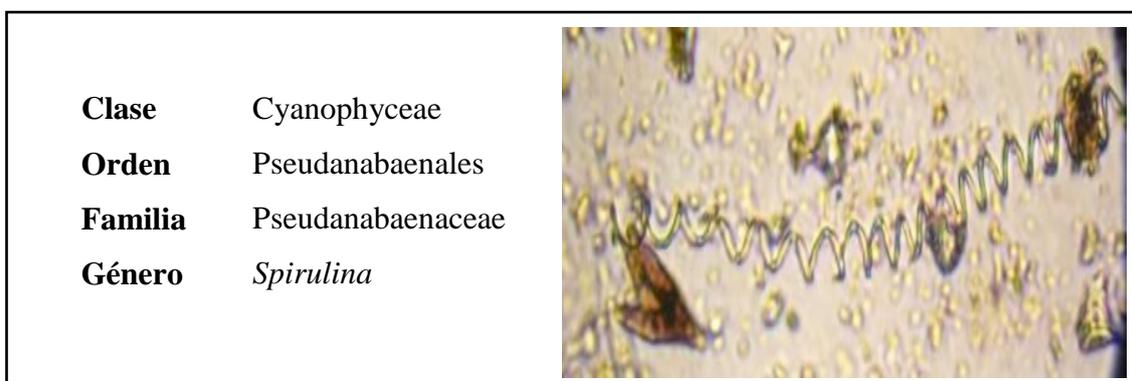
## **Ecología y Distribución**

Predominan en ambientes lénticos como lagunas y lagos así como también en ríos como parte del perifiton y epifiton (Bellinger y Sigeo, 2010; Likens, 2010). Tienen distribución cosmopolita, se desarrollan en diferentes tipos de sustrato dependiendo del material del sitio (lodo, rocas, arena), algunas especies son conocidas como buenas fijadoras de nitrógeno en condiciones anóxicas (falta de oxígeno) (Prescott, 1954; Reynolds *et al.*, 2002; Reynolds, 2006).

## **Condición de Bioindicación**

Son fijadoras de nitrógeno por lo que pueden producir amonio que es aprovechado por otros organismos (Prescott, 1954; Reynolds, 2006). Pueden vivir en ambientes contaminados por lo que son buenos indicadores cuando se conoce el número en el que se encuentran en un sitio (Reynolds *et al.*, 2002; UNESCO, 2009).

### 4.3.3. *Spirulina* sp.



Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 29.** *Spirulina* sp.

### Características Generales

Tienen forma cilíndrica pero en espiral o hélix (Figura 29), al igual que las otras cianobacterias anteriormente descritas presentan tricomas que son una elongación similar a pelos a partir de su célula (Bellinger y Sigeo, 2010). Se las puede encontrar en diferentes tamaños y la forma varía un poco de acuerdo a la especie (Prescott, 1954). Son capaces de moverse gracias a la secreción de mucilago, además poseen vacuolas de gas que les ayuda a controlar su flotabilidad (Prescott, 1954; Bellinger y Sigeo, 2010). Son algas filamentosas y pueden encontrarse tanto solitarias como en grupos (Chorus, 1999), no se debe confundir con las algas del género *Arthrospira* de las que se produce el suplemento conocido como Spirulina (Likens, 2010). Se han descrito 59 especies (Guiry y Guiry, 2012).

### Ecología y Distribución

Se las encuentra en agua dulce y salobre y tienen amplia distribución en el planeta (Bellinger y Sigeo, 2010). Algunas especies son bentónicas, prefieren los sitios cercanos a termas o manantiales de agua mineral y sobre todo en aguas poco contaminadas (Komarek, 1992).

## Condición de Bioindicación

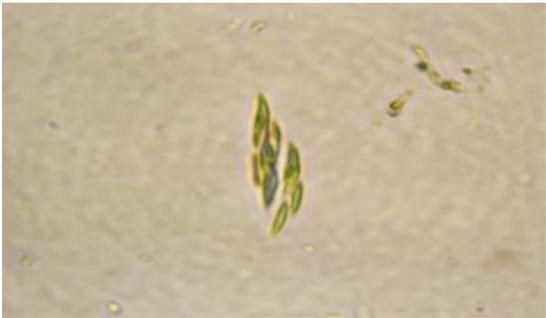
Son capaces de habitar en sitios con poca incidencia de luz por lo que pueden crecer cuando hay poca contaminación y en aguas poco profundas (Reynolds, 2006).

### 4.4. Chlorophyta (algas verdes)

Es un grupo que se caracteriza por su coloración verde gracias a la presencia de clorofila a y b en su estructura (Bellinger y Sigeo, 2010). Se presentan en diferentes formas, pueden ser unicelulares, filamentosas y pueden establecer colonias (O'Sullivan y Reynolds, 2004; Reynolds, 2006). Algunas especies presentan flagelos, los cuales crecen en pares (Bellinger y Sigeo, 2010), los cloroplastos varían en forma de acuerdo a la especie (Prescott, 1954). Son muy importantes en todos los ecosistemas donde habitan ya que son los principales productores de biomasa tanto en lagunas y ríos como floraciones o explosiones (Bellinger y Sigeo, 2010). Este grupo se caracteriza por tener pirenoides, estos son organelos especializados en la fijación de CO<sub>2</sub> que se encuentran dentro de los cloroplastos, toda la producción y reserva de la fotosíntesis ocurre alrededor de estos organelos mientras que en las otras algas esta reserva se encuentra en el citoplasma, también se caracterizan por presentar una mancha ocular, en especies motiles, el cual se puede ver claramente por su color rojo o naranja (Bellinger y Sigeo, 2010).

#### 4.4.1. *Ankistrodesmus* sp.

<b>Clase</b>	Chlorophyceae
<b>Orden</b>	Sphaeropleales
<b>Familia</b>	Selenastraceae
<b>Género</b>	<i>Ankistrodesmus</i>



Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 30.** *Ankistrodesmus* sp.

## **Características Generales**

Poseen células en forma de huso pero encorvada hacia un lado y con los ápices en punta (Bellinger y Sigeo, 2010), poseen un solo cloroplasto que puede o no tener pirenoide. Las células miden entre 1 y 5 micras de ancho y 20-165 micras de largo (Bellinger y Sigeo, 2010). Siempre se las encuentra en colonias que varían en número, pueden estar entre 4 a 16 células por grupo (Figura 30), se reconocen aproximadamente 20 especies dentro de este género (Guiry y Guiry, 2012).

## **Ecología y Distribución**

Son muy comunes en lagunas eutróficas y ríos con poca corriente (Bellinger y Sigeo, 2010), habitan en su mayoría en climas templados pero también se las encuentra en zonas tropicales, habitan en aguas ligeramente acidificadas (5-6) aunque tienen preferencia por el rango neutro (7), tienen distribución cosmopolita en lagos de agua dulce. (Eisele y Ullrich, 1977; Guiry y Guiry, 2012).

## **Condición de Bioindicación**

Este género puede tener un sobre crecimiento en agua dulce cuando hay mucho enriquecimiento de nitratos y puede ocasionar disminución en la concentración de oxígeno en lagunas cerradas (Likens, 2010).

#### 4.4.2. *Mougeotia* sp.

<b>Clase</b>	Zygnematophyceae	
<b>Orden</b>	Zygnematales	
<b>Familia</b>	Zygnemataceae	
<b>Género</b>	<i>Mougeotia</i>	

Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 31.** *Mougeotia* sp.

#### Características Generales

Es un grupo conformado por organismos alargados que no tienen ramificación (Bellinger y Sigee, 2010), se distinguen por su cloroplasto suspendido en el citoplasma, el cual puede moverse dentro de la célula de acuerdo a la luz (Figura 31) (Prescott, 1954; Bellinger y Sigee, 2010), también puede cambiar de forma debido a este comportamiento y posee varios pirenoides que influyen en el comportamiento con la luz (Bellinger y Sigee, 2010). Se conocen 78 especies (Guiry y Guiry, 2012).

#### Ecología y Distribución

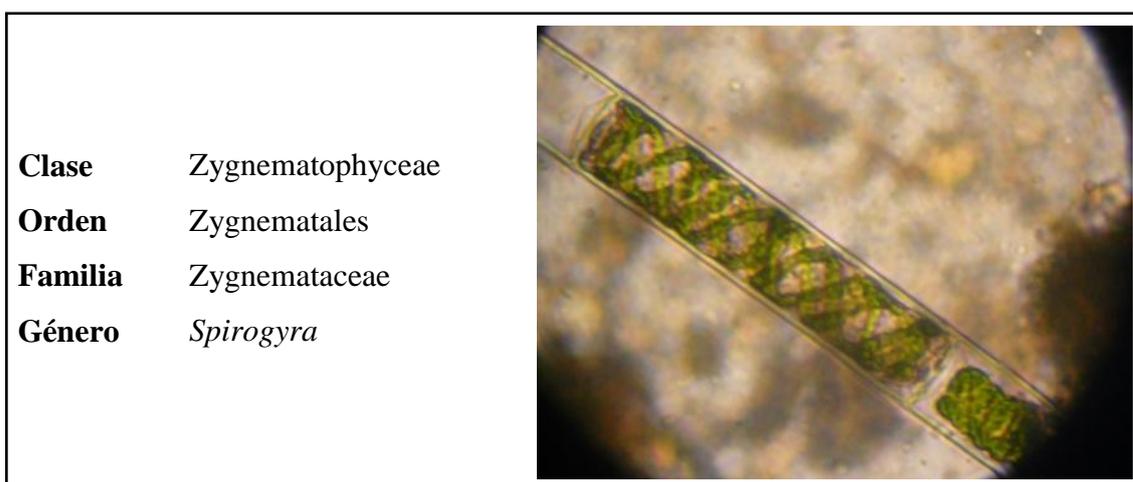
Tienen amplia distribución en diferentes ecosistemas (Bellinger y Sigee, 2010), se encuentran como organismos individuales de vida libre en muchas aguas acidificadas entre 3 y 8 de pH, además son tolerantes a altos niveles de metales pesados como zinc y aluminio, también se las encuentra en hábitats meso tróficos donde hay cambios estacionales. (Graham *et al.*, 1996; Guiry y Guiry, 2012)

#### Condición de Bioindicación

Son tolerantes a contaminación por metales pesados (Guiry y Guiry, 2012) y a la falta de luz (Reynolds *et al.*, 2002) y muy sensibles a cambios en los nutrientes del

medio (Reynolds *et al.*, 2002). Es considerada un indicador de cambios ambientales a corto plazo (Bellinger y Sigeo, 2010).

#### 4.4.3. *Spirogyra* sp.



Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 32.** *Spirogyra* sp.

#### **Características Generales**

Tienen células cilíndricas entre 10 y 200 micras de diámetro, con una capa externa de mucilago que hace una capa viscosa sobre la pared celular (Bellinger y Sigeo, 2010; Guiry y Guiry, 2012). Tienen varios cloroplastos en forma espiral que cruzan a lo largo de toda la célula (Figura 32), pueden haber hasta 15 cloroplastos en cada una, se han reconocido 271 especies (Guiry y Guiry, 2012).

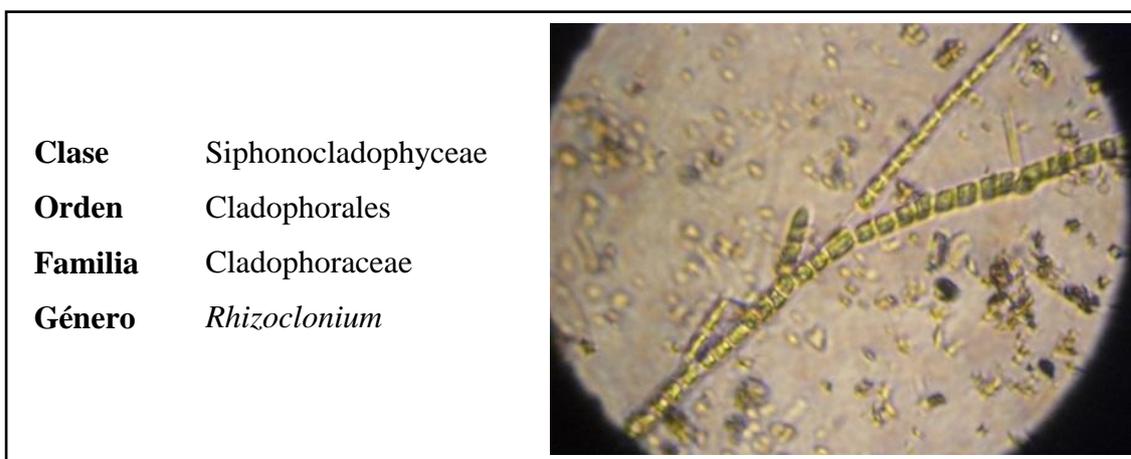
#### **Ecología y Distribución**

Se distribuyen ampliamente en aguas poco profundas desde estanques hasta grandes lagos (Prescott, 1954; Bellinger y Sigeo, 2010), se encuentran como organismos de vida libre en lagos y en ríos como parte del perifiton. Pueden formar grandes masas de color verde que en casos pueden tapar filtros de tratamiento (Bellinger y Sigeo, 2010). Se las puede encontrar en todos los continentes y en distintos pisos climáticos (Guiry y Guiry, 2012).

## Condición de Bioindicación

A pesar de que se encuentran en todo tipo de ecosistemas son muy comunes en aguas con baja cantidad de nutrientes, tanto en ríos como en lagos (Bellinger y Sigee, 2010).

### 4.4.4. *Rhizoclonium* sp.



Fuente: M. Molina, 2011.

**Figura 33.** *Rhizoclonium* sp.

## Características Generales

Son células filamentosas de 60 micras de diámetro (Figura 33) (Guiry y Guiry, 2012). En ocasiones se pueden ver extensiones como ramas pequeñas (Bellinger y Sigee, 2010), tienen de 10 a 40 micras de ancho y de 2 a 8 veces más de largo (Prescott, 1954; Bellinger y Sigee, 2010). Tienen numerosos cloroplastos con algunos pirenoides y se encuentran usualmente cerca de organismos del género *Cladophora* (Prescott, 1954). Se aceptan 21 especies taxonómicamente (Guiry y Guiry, 2012).

## Ecología y Distribución

Tienen distribución cosmopolita tanto en agua dulce, salobre y en el océano, crecen en relación con otros grupos de algas y pueden formar densas capas sobre el

agua (Guiry y Guiry, 2012). Son más comunes en aguas de poca profundidad (Bellinger y Sigeo, 2010).

### **Condición de Bioindicación**

Habitan desde ecosistemas eutróficos a hipertróficos sobre todo en lagos (Bellinger y Sigeo, 2010), por esto son indicadores de baja concentración de oxígeno.

## CAPÍTULO V RESULTADOS

### 5.1. Especies de fitoplancton encontradas en Papallacta

Se encontraron tres grandes grupos de fitoplancton en la laguna de Papallacta y los ríos tributarios Tambo y Sucus: Diatomeas (Bacillariophyta), algas verde-azules o cianobacterias (Cyanophyta) y algas verdes (Chlorophyta). En total se encontraron 21 géneros durante las tres campañas (Tabla 3).

**Tabla 3.** Géneros de microalgas encontrados en Papallacta correspondientes a laguna y río.

Grupo	Clasificación	No	Género	NCM Época seca	NCM Época de transición	NCM Época de lluvia	NCM Total
Diatomeas/Bacillariophyta	Centrales	1	<i>Cyclotella</i>	3000	9000	0	12000
		2	<i>Melosira</i>	5415000	1508000	194000	7117000
	Penales	3	<i>Campylodiscus</i>	72000	0	0	72000
		4	<i>Cymbella</i>	625000	374000	183000	1182000
		5	<i>Diploneis</i>	13000	12000	3000	28000
		6	<i>Frustulia</i>	1000	3000	0	4000
		7	<i>Hantzschia</i>	2742000	663000	289000	3694000
		8	<i>Navicula</i>	6092000	4121000	551000	10764000
		9	<i>Neidium</i>	5000	1000	6000	12000
		10	<i>Nitzschia</i>	8964500	1662000	353000	10979500
		11	<i>Pinnularia</i>	57000	0	0	57000
		12	<i>Rhopalodia</i>	49000	23000	0	72000
		13	<i>Surirella</i>	12000	2000	2000	16000
		14	<i>Synedra</i>	4215500	1255000	455000	5925500
Cianobacterias	Cyanophyta	15	<i>Microcystis</i>	158000	16000	0	174000
		16	<i>Oscillatoria</i>	268000	138000	451000	857000
		17	<i>Spirulina</i>	0	0	3000	3000
Algas verdes	Chlorophyta	18	<i>Ankistrodesmus</i>	1000	41000	9000	51000
		19	<i>Mougeotia</i>	95000	38000	0	133000
		20	<i>Rhizoclonium</i>	9000	4000	92000	105000
		21	<i>Spirogyra</i>	2000	0	0	2000

El grupo con mayor abundancia en los sitios recolectados corresponde a las diatomeas penales (12 géneros), estos predominan sobre el resto y son muy importantes como bioindicadores, (los valores se expresan en NCM = número de colonias por mililitro), *Nitzschia* es el grupo con mayor abundancia total (10979500 NCM), que corresponde al 27% de presencia en relación a la abundancia total de todos los géneros

(41260000 NCM) (Anexo 4). Su distribución es amplia ya que están presentes tanto en los ríos como en laguna y muchas veces se los encontró agrupados con el mismo tipo de organismos en ambos ecosistemas, es decir, existen ciertas asociaciones entre algunos géneros. El segundo género más abundante es *Navicula*, que de igual manera está presente en ambos ecosistemas, tiene una abundancia total de 10764000 NCM, que corresponde a un 26% de presencia en relación a todos los géneros.

Las diatomeas centrales se encontraron en un número menor (dos géneros); sin embargo, su distribución es también amplia en ríos y lagunas, encontrándose en diferentes puntos indistintamente, el género *Melosira* tiene una abundancia total de 7117000 NCM (Anexo 4), esto corresponde al 17% de presencia tomando en cuenta la abundancia total de géneros.

Se encontraron tres géneros de cianobacterias (verde-azules), los cuales tienen una distribución similar en ambos ecosistemas pero en menor abundancia en relación a las diatomeas, *Oscillatoria* es el género más abundante (857000) (Anexo 4) que corresponde al 2% de presencia total entre todos los géneros.

Finalmente se contaron 4 géneros de clorofíceas (verdes), estos tienen la menor distribución y riqueza de todos los organismos encontrados, el género más abundante es *Mougeotia* (133000 NCM) (Anexo 4) que corresponde a un 0.3% de presencia total, sin embargo su hallazgo es fundamental para el monitoreo de calidad de agua ya que son importantes productores de biomasa.

## **5.2. Análisis de las variables abióticas**

Se realizaron dos pruebas estadísticas con las variables abióticas: la primera es una prueba de correlación de Pearson para determinar el nivel de correlación existente entre las variables abióticas, y de esta manera seleccionar aquellas que por su valor estadístico expresen mejor la variación de los resultados (Figuras 39, 40 y 41). La segunda prueba es un análisis de similitud de distancia euclidiana que expresa las

condiciones de coincidencia entre los distintos puntos de muestreo, en función de los patrones expresados por cada una de las variables abióticas.

### 5.2.1. Análisis de correlaciones múltiples

Para discriminar o clasificar qué variables abióticas son las que expresan mejor la variación de los resultados, se correlacionaron todas las variables tomadas en campo, al igual que las analizadas en laboratorio. En esta investigación se toman en cuenta los valores de correlación más altos; por lo tanto, el índice de correlación se expresa haciendo referencia a la unidad y mientras más cercano sea a uno las variables tienen mayor correlación entre sí. Con los resultados de la prueba, se seleccionaron siete variables como las más significativas, tomando en cuenta que sus valores de correlación están entre 0.7 y 1, este proceso se realizó para cada campaña de muestreo.

Las variables con mayor correlación entre ellas ( $r > 0.7$ ) son DBO, DQO, Temperatura, Conductividad, Sólidos suspendidos (*In situ*), Profundidad del disco Secchi y Profundidad total del punto de muestro.

**Tabla 4.** Niveles de correlación (Pearson) de las variables abióticas para las tres estacionalidades. La tabla muestra solamente las correlaciones mayores a 0.7 que corresponden a las variables utilizadas en el Análisis Canónico de Correspondencias (Figuras 45-46).

Correlaciones de Pearson para las tres épocas				
Correlaciones	Seca	Transición	Lluviosa	
<b>DBO/DQO</b>	0.72	$r < 0.7$	0.89	
<b>Profundidad punto/Secchi</b>	$r < 0.7$	0.77	$r < 0.7$	
<b>Temperatura/Conductividad</b>		0.86	0.75	
<b>Temperatura/Sólidos suspendidos</b>		0.86	0.71	
<b>Conductividad/Sólidos suspendidos</b>		0.99	0.99	
<b>Conductividad/Secchi</b>		$r < 0.7$		0.83
<b>Sólidos suspendidos/Secchi</b>				0.81

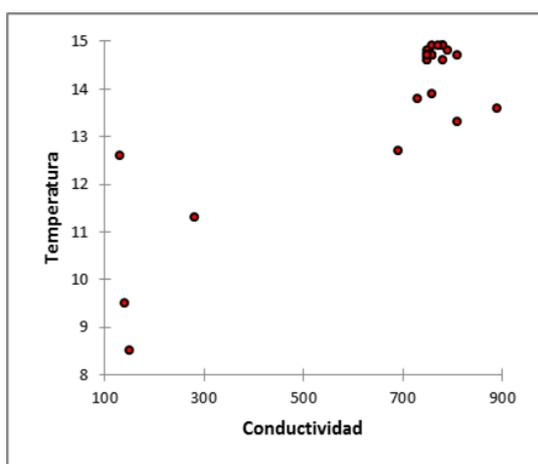
**Nota:** La tabla general con todas las variables y sus valores se detallan en el Anexo 8.

Durante la primera campaña (época seca) solo existen dos variables que tienen una correlación mayor a 0.7: DBO y DQO con una correlación de 0.72.

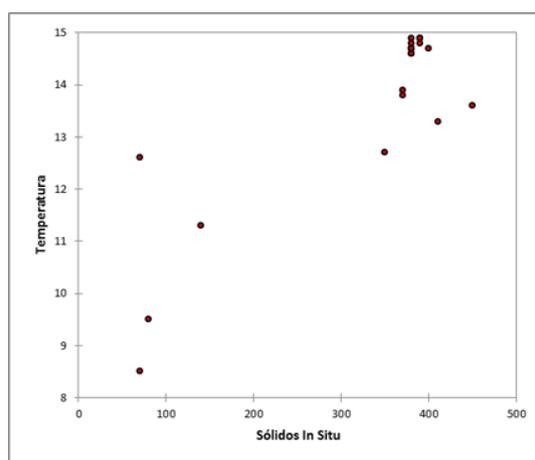
En la segunda campaña (transición), se presentan distintos valores de correlación entre temperatura, conductividad, sólidos suspendidos, profundidad del disco Secchi y profundidad total del punto de muestreo. En esta campaña no existe una correlación mayor a 0.7 entre DBO y DQO como se observó en la época seca. La correlación más alta entre dos variables es de 0.99 que corresponde a la conductividad y sólidos suspendidos, las otras cuatro correlaciones corresponden a profundidad total del punto de muestreo, profundidad del disco Secchi, temperatura y concentración de oxígeno (Tabla 4).

En la tercera campaña (época de lluvia) se encontraron correlaciones entre DBO, DQO, Profundidad de disco Secchi, temperatura, sólidos suspendidos y conductividad. Se encontraron mayor cantidad de correlaciones en esta última campaña que en las anteriores (Tabla 4).

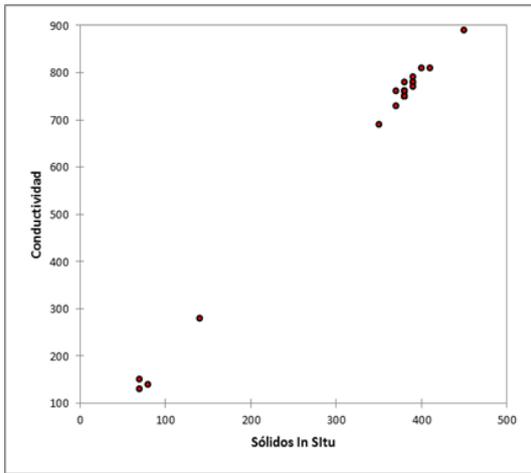
Las correlaciones más altas de todas las campañas se presentan en las Figuras 34-38, se debe recalcar que la temperatura, sólidos suspendidos y conductividad presentan mayor número de correlaciones entre sí, los valores de correlación más altos se registraron en las épocas de transición y lluvia, el DBO y DQO presentaron correlaciones sobre 0.7 durante las épocas seca y de lluvia.



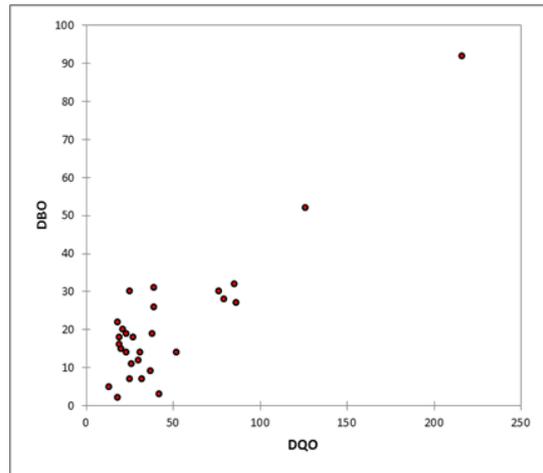
**Figura 34.** Relación entre la temperatura y conductividad para la época de transición (marzo 2011)( $r=0.86$ ).



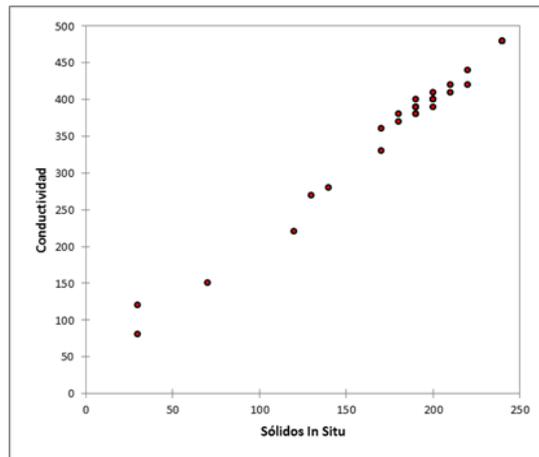
**Figura 35.** Relación entre la temperatura y sólidos suspendidos para la época de transición (marzo 2011)( $r=0.86$ ).



**Figura 36.** Relación entre la conductividad y sólidos suspendidos para la época de transición (marzo 2011)( $r=0.99$ ).



**Figura 37.** Relación entre DBO y DQO para la época de lluvia (julio 2011)( $r=0.89$ ).



**Figura 38.** Relación entre la conductividad y sólidos suspendidos para la época de lluvia (julio 2011)( $r=0.99$ ).

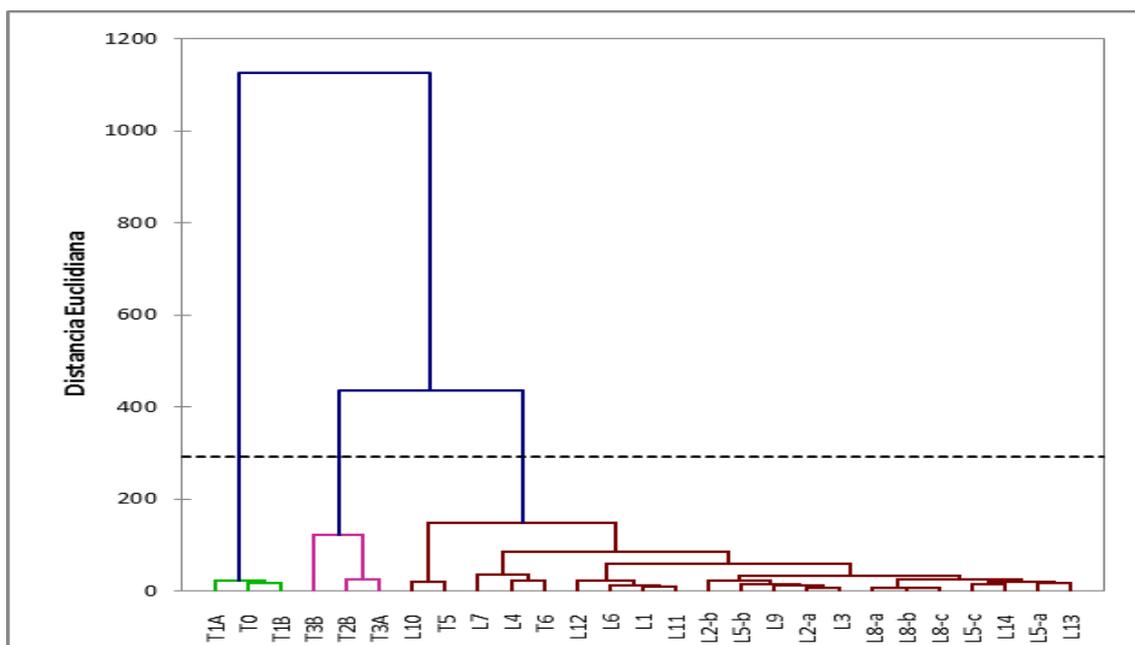
Esta discriminación se realizó para identificar que variables abióticas tienen mayor correlación positiva entre sí, para poder utilizarlas en el Análisis Canónico de Correspondencias (ACC) que se detalla más adelante, este proceso es importante ya que es necesario utilizar solamente las variables que mayor influencia pueden tener sobre el fitoplancton.

### **5.3. Análisis de clasificación considerando datos abióticos (Cluster Analysis)**

A continuación se presentan los resultados del análisis de clasificación utilizando medidas de distancia euclidiana para cada época.

#### **5.3.1. Época seca**

Durante la primera campaña (época seca) se pudo observar tres grupos de sitios (Figura 39), el más grande conformado por 21 puntos (L10 a L13), T5 corresponde a la entrada de río, el resto de sitios (19) a zonas de laguna (L) y T6 a la salida de la misma (efluente), este grupo es donde se puede observar mayor similitud entre puntos debido a que los valores de conductividad, oxígeno disuelto y sólidos suspendidos son similares (Anexo 5). Otro grupo está conformado por tres puntos que corresponden a río (T1A, T0 y T1B), estos presentan valores similares de conductividad, temperatura, oxígeno disuelto y sólidos suspendidos (Anexo 5). El último grupo se conforma igualmente por tres puntos de río (T3B, T2B y T3A), tienen menor similitud en comparación al primero, estos sitios tienen valores de turbidez, conductividad, profundidad y pH similares (Anexo 5). Para este análisis no se incluyó el punto T2A debido a que el valor de sólidos suspendidos registrado es demasiado alto ( $>2000$  mg/L) en relación al resto de puntos (cuyo máximo es 560 mg/L), este dato corresponde a un patrón atípico de comportamiento de esta variable, causado por algún factor exógeno al sistema (Anexo 5).



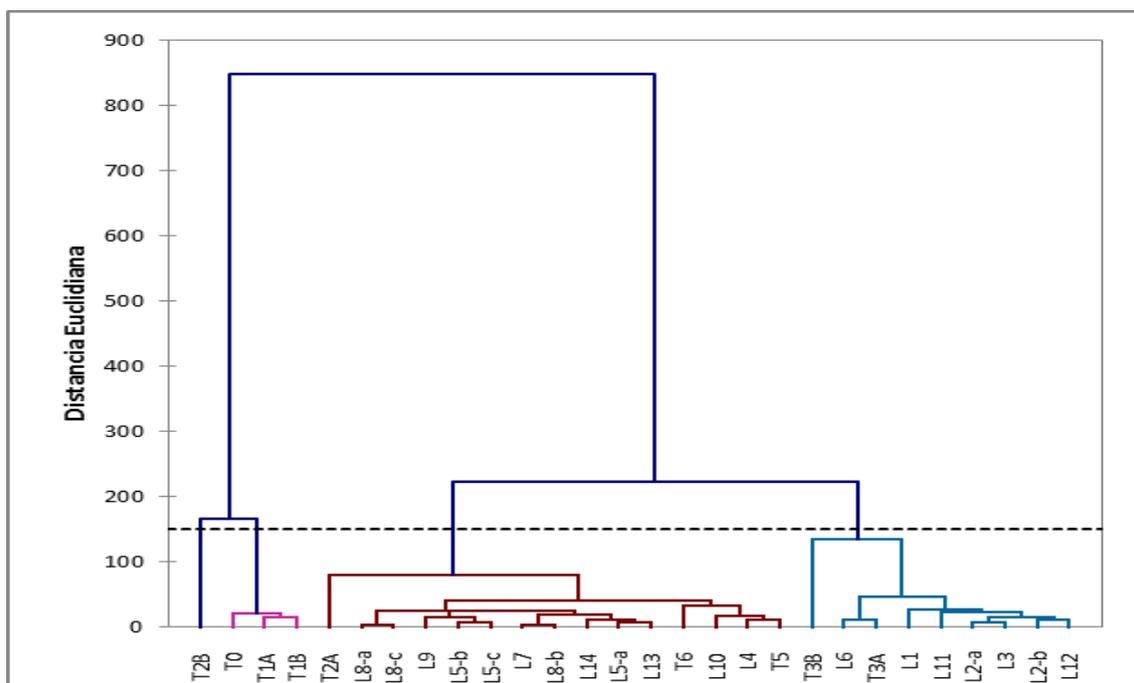
**Figura 39.** Dendrograma de similitud de los sitios muestreados en la época seca; basado en los datos abióticos registrados (Anexo 5), a través del método aglomerativo de enlace completo, utilizando medidas de distancia euclidiana.

La respuesta a los tres grupos conformados se fundamenta en mayores similitudes dentro de cada grupo en torno a temperatura, conductividad, pH, oxígeno y sólidos suspendidos (Anexo 5), y es importante destacar que hay una diferenciación relativamente clara entre los puntos de río y laguna durante esta estación.

### 5.3.2. Época de transición

Durante la época de transición se puede observar cambios en relación a la época seca, se pueden distinguir cuatro grupos (Figura 40), de los cuales el más grande (T2A a T5) está conformado, en su mayoría, por puntos de laguna, la entrada y salida de esta (T5 y T6 respectivamente), más un punto de río (T2A); la similitud entre todos estos puntos tiene que ver con los valores similares de temperatura, conductividad y sólidos suspendidos (Anexo 6). Otro grupo contiene nueve sitios tanto de río como de laguna (T3B a L12), a diferencia de la época seca en esta estación se observa como la distribución de puntos es más homogénea entre zonas de río y laguna (no están separados nítidamente) y en el caso de este grupo se evidencia claramente ya que dos

puntos de río (T3B y T3A) están agrupados con varios puntos de laguna (ej. L6, L1), esto se debe a la similitud en los valores de temperatura, conductividad y oxígeno disuelto entre estos sitios (Anexo 6). Otro grupo, conformado por T0, T1A y T1B, tiene los mismos puntos que se observaron agrupados en la época seca, presenta valores similares de conductividad, pH, oxígeno disuelto y sólidos suspendidos (Anexo 6), finalmente T2B no está agrupado con ningún otro sitio, posiblemente por un valor de conductividad alto (Anexo 6).

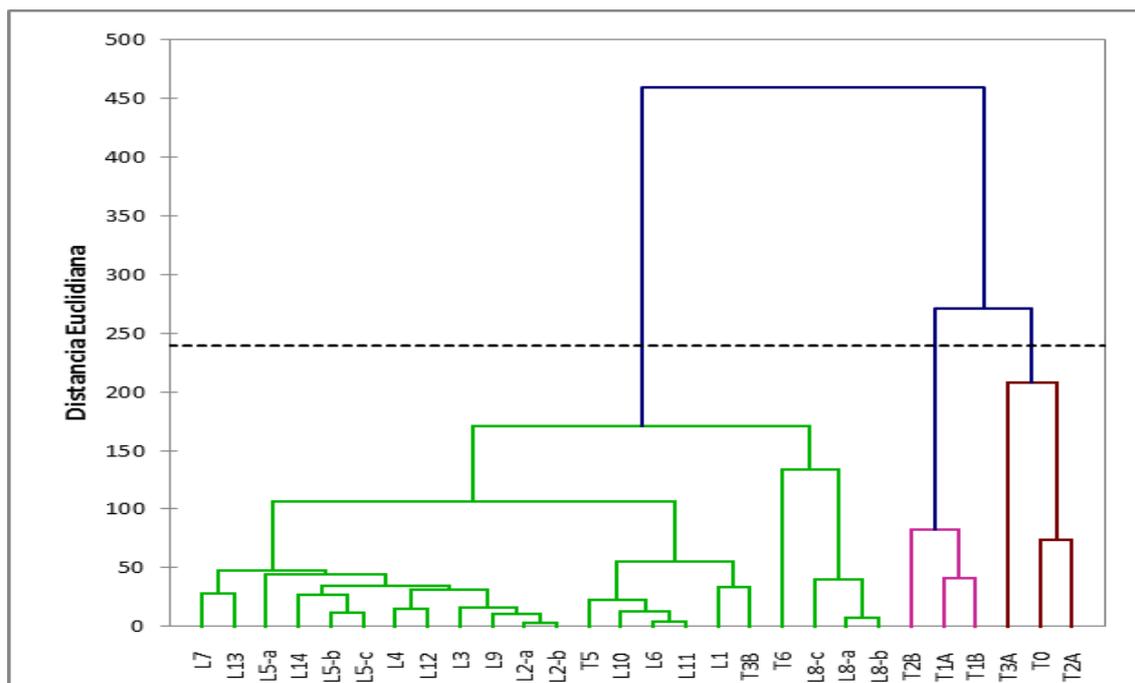


**Figura 40.** Dendrograma de similitud de los sitios muestreados en la época de transición; basado en los datos abióticos registrados (Anexo 6), a través del método aglomerativo de enlace completo, utilizando medidas de distancia euclidiana.

La diferencia en distribución de grupos que se evidencia en esta época se debe principalmente a que los valores de las variables abióticas cambian (Anexos 5-6) en relación a la estación seca debido a una mayor presencia de lloviznas esporádicas, que cambian la dinámica del sistema.

### 5.3.3. Época de lluvia

La Figura 41 muestra tres grupos diferentes en sus elementos, en relación a la época anterior (transición), los valores de las variables son más heterogéneos en esta época, ya que se puede distinguir una diferenciación entre los puntos de río y laguna.



**Figura 41.** Dendrograma de similitud de los sitios muestreados en la época de lluvia; basado en los datos abióticos registrados (Anexo 7), a través del método aglomerativo de enlace completo, utilizando medidas de distancia euclidiana.

La mayoría de puntos se encuentran en el primer grupo (L7 a L8-b), se conforma por los 19 puntos de laguna, uno de río (T3B) e igualmente la salida (T6) y entrada a la laguna (T5), las variables que mayor similitud tienen en ellos son: temperatura, conductividad, oxígeno disuelto y sólidos suspendidos (Anexo 7). El grupo conformado por T2B, T1A y T1B presenta valores similares de DBO, DQO, pH y profundidad, siendo esta última importante porque puede afectar sobre el hábitat de ciertos organismos que dependen de la corriente o el nivel del agua (Anexo 7). El último grupo donde (T3A, T0 y T2A) tiene valores similares de oxígeno disuelto, pH y sólidos suspendidos (Anexo 7).

## 5.4. Análisis de la Biota

En la parte biótica se utilizó el índice de tolerancia a contaminación orgánica de Palmer, que determina, de acuerdo a la suma de los índices asignados a cada género, si un sitio presenta contaminación orgánica (Tabla 5).

### 5.4.1. Índice de tolerancia a la contaminación orgánica de Palmer (Taylor *et al.*, 1979).

Este índice es importante para comprobar si hay grupos bioindicadores de carga orgánica en los sitios muestreados.

**Tabla 5.** Suma total de los índices asignados por Palmer (IP) a los géneros de fitoplancton estudiados por él, con los datos bióticos acumulados de las tres épocas de muestreo en Papallacta.

Géneros en Papallacta	Valor Índice (Laguna+Río)
<i>Cyclotella</i>	1
<i>Melosira</i>	1
<i>Cymbella</i>	0
<i>Diploneis</i>	0
<i>Hantzschia</i>	0
<i>Frustulia</i>	0
<i>Campylodiscus</i>	0
<i>Navicula</i>	3
<i>Neidium</i>	0
<i>Nitzschia</i>	3
<i>Pinnularia</i>	0
<i>Rhopalodia</i>	0
<i>Surirella</i>	0
<i>Synedra</i>	2
<i>Microcystis</i>	0
<i>Oscillatoria</i>	5
<i>Spirulina</i>	0
<i>Ankistrodesmus</i>	2
<i>Mougeotia</i>	0
<i>Spirogyra</i>	0
<i>Rhizoclonium</i>	0
<b>Total IP</b>	<b>17</b>

IP>20: Alta contaminación orgánica

IP entre 15 y 19: Probable contaminación orgánica (media a alta)

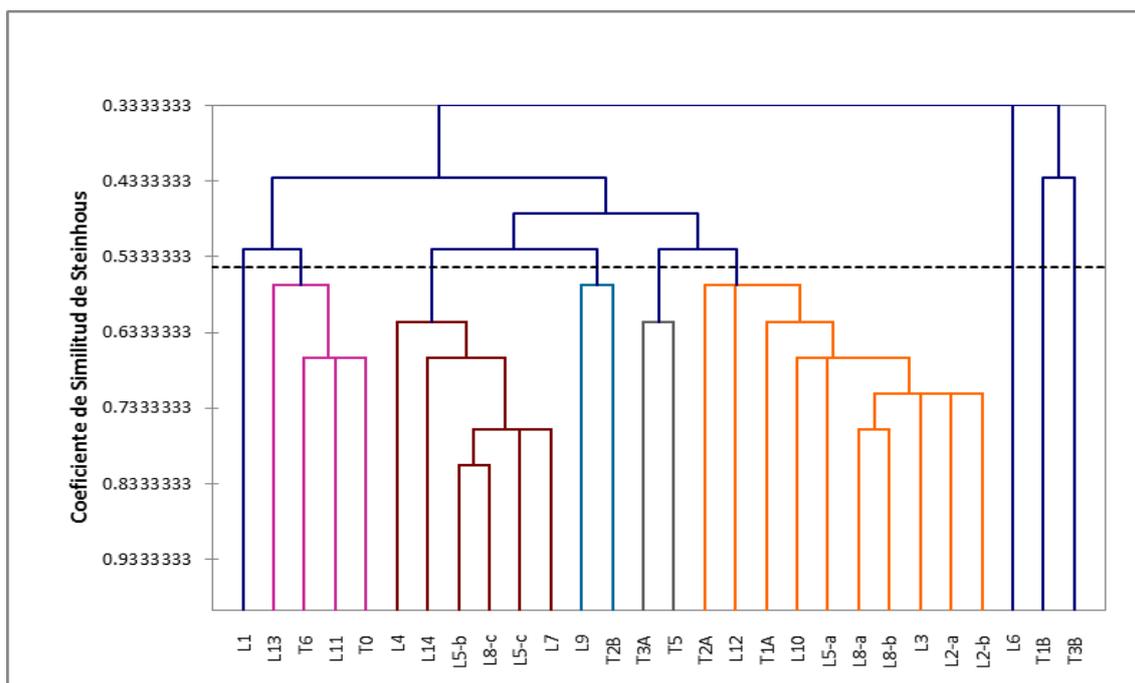
IP<15: No hay indicio de contaminación orgánica

Este resultado (17) se expresa como un indicio de carga orgánica media en Papallacta, ya que según Palmer cuando el total de la suma de los índices se encuentra entre 15 y 19 hay evidencia indirecta probable de contaminación orgánica. Estos grupos se encuentran tanto en las muestras de río como en las de laguna y tienen una presencia constante en todas las campañas, por lo que se esperaría que el IP de laguna y río tenga valores similares por separado.

## 5.5. Análisis de clasificación considerando datos bióticos por campaña

### 5.5.1. Época seca

Se puede observar una distribución heterogénea (los puntos de río y laguna no están separados nítidamente) (Figura 42), se observan siete grupos.



**Figura 42.** Dendrograma de similitud entre sitios de muestreo en la época seca, basado en datos bióticos (fitoplancton) (Anexo 1), a través del método aglomerativo de enlace completo, utilizando el Índice de Steinhaus.

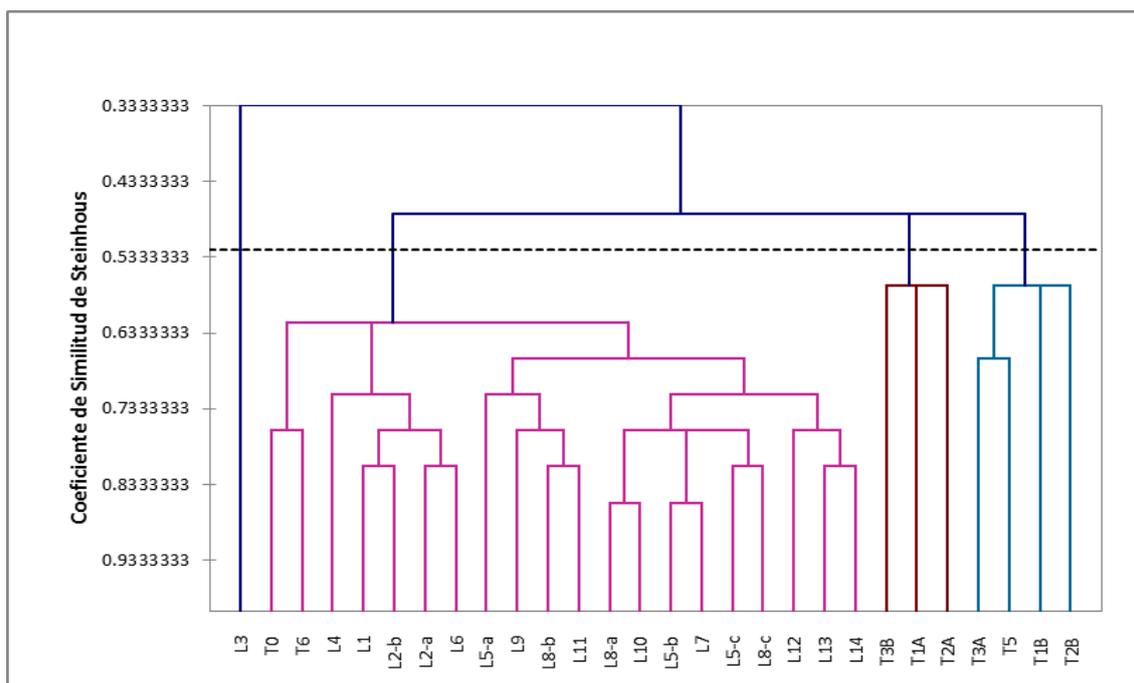
El más grande (T2A a L2-b) está compuesto por diez sitios entre los cuales hay dos puntos de río (T2A y T1A), el resto corresponden a zonas laguna; este grupo

presenta similares valores de abundancia (Anexo 1) de varios géneros comunes, *Melosira*, *Navicula*, *Nitzschia*, *Synedra*, *Microcystis*, *Oscillatoria* y *Hantzschia* (Anexo 1). Otro grupo está conformado por seis puntos, todos de laguna (L4 a L7), estos tienen los siguientes géneros en común: *Navicula*, *Neidium*, *Nitzschia*, *Synedra* y *Oscillatoria*. El grupo conformado por cuatro puntos (L13, T6, L11 y T0) es interesante, porque dos sitios son de laguna (L13, L11), uno el efluente de ésta (T6) y T0 es un punto de río, están ubicados en distintos lugares de muestreo y alejados el uno del otro, sin embargo, esta agrupación puede darse por abundancias de *Melosira*, *Hantzschia*, *Navicula*, *Nitzschia*, *Synedra* y *Rhizoclonium*, lo mismo sucede con el grupo formado por T3A y T5, que tienen en común los mismos géneros en cantidades similares (Anexo 1).

El grupo constituido por L9 y T2B tiene menor similitud que los otros antes descritos, los grupos con presencia en ambos son *Melosira*, *Diploneis*, *Hantzschia*, *Navicula*, *Nitzschia*, *Synedra* y *Microcystis*, con abundancias similares (Anexo 1). El punto L1 es un grupo separado posiblemente debido a que registra abundancias de *Cyclotella* y *Rhopadolia* que no están presentes en los otros grupos, algo similar sucede con L6 donde se registran los mismos géneros aunque con abundancias diferentes. Dos sitios de río (T1B y T3B) registran abundancias de *Campylodiscus*, *Pinnularia* y *Mougeotia*, que no están presentes en los otros grupos.

### **5.5.2. Época de transición**

Los grupos de sitios se encuentran mejor definidos en esta época en relación a la época seca, ya que ahora todos los sitios de laguna (a excepción de L3) se encuentran dentro de un mismo grupo, mientras que los de río (a excepción de T0) están separados de los de laguna, en contraste a la época seca, donde los sitios están distribuidos de manera heterogénea (río y laguna mezclados).

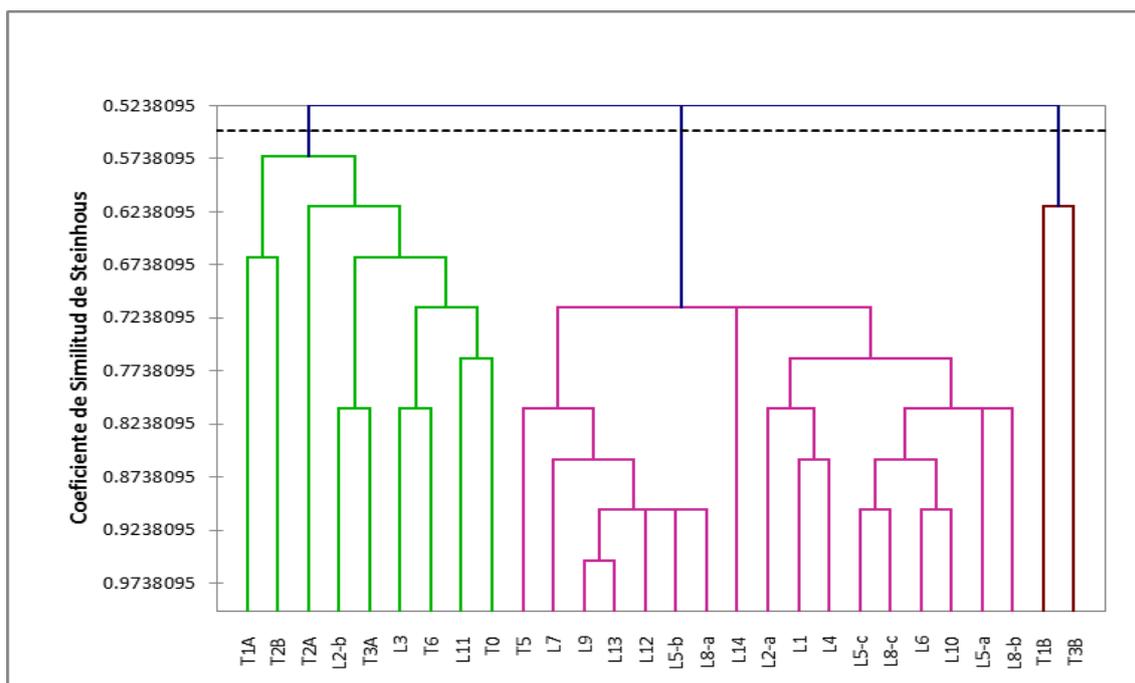


**Figura 43.** Dendrograma de similitud entre sitios de muestreo en la época de transición, basado en datos bióticos (fitoplancton) (Anexo 2), a través del método aglomerativo de enlace completo, utilizando el Índice de Steinhaus.

Se observan cuatro grupos (Figura 43); el más grande (T0 a L14), contiene todos los puntos de laguna, a excepción de L3, que forma un grupo separado, este primer conjunto registra presencia y abundancias similares de *Navicula*, *Nitzschia*, *Synedra* y *Ankistrodesmus*, géneros como *Melosira*, *Hantzschia* y *Oscillatoria* también son importantes en algunos sitios dentro de este grupo (Anexo 2). El grupo compuesto por T3A, T5 (entrada a la laguna) y T1B y T2B comparten abundancias similares de *Melosira*, *Cymbella*, *Hantzschia*, *Navicula* y *Nitzschia*. El otro grupo conformado por puntos de río (T3B, T1A, T2A) tiene similitud en abundancia de: *Melosira*, *Cymbella*, *Navicula*, *Nitzschia*, *Synedra*, *Microcystis*, *Oscillatoria* y *Mougeotia*. Es importante destacar que a pesar de compartir la misma presencia de grupos tanto en laguna como en río, las abundancias en este último tienen valores más altos (Anexo 2).

### 5.5.3. Época de lluvia

El cladograma resultante de esta época muestra tres grupos bien definidos, con ciertas variaciones en la distribución de puntos en relación a las épocas anteriores (Figura 44).



**Figura 44.** Dendrograma de similitud entre sitios de muestreo en la época de lluvia, basado en datos bióticos (fitoplancton) (Anexo 3), a través del método aglomerativo de enlace completo, utilizando el Índice de Steinhaus.

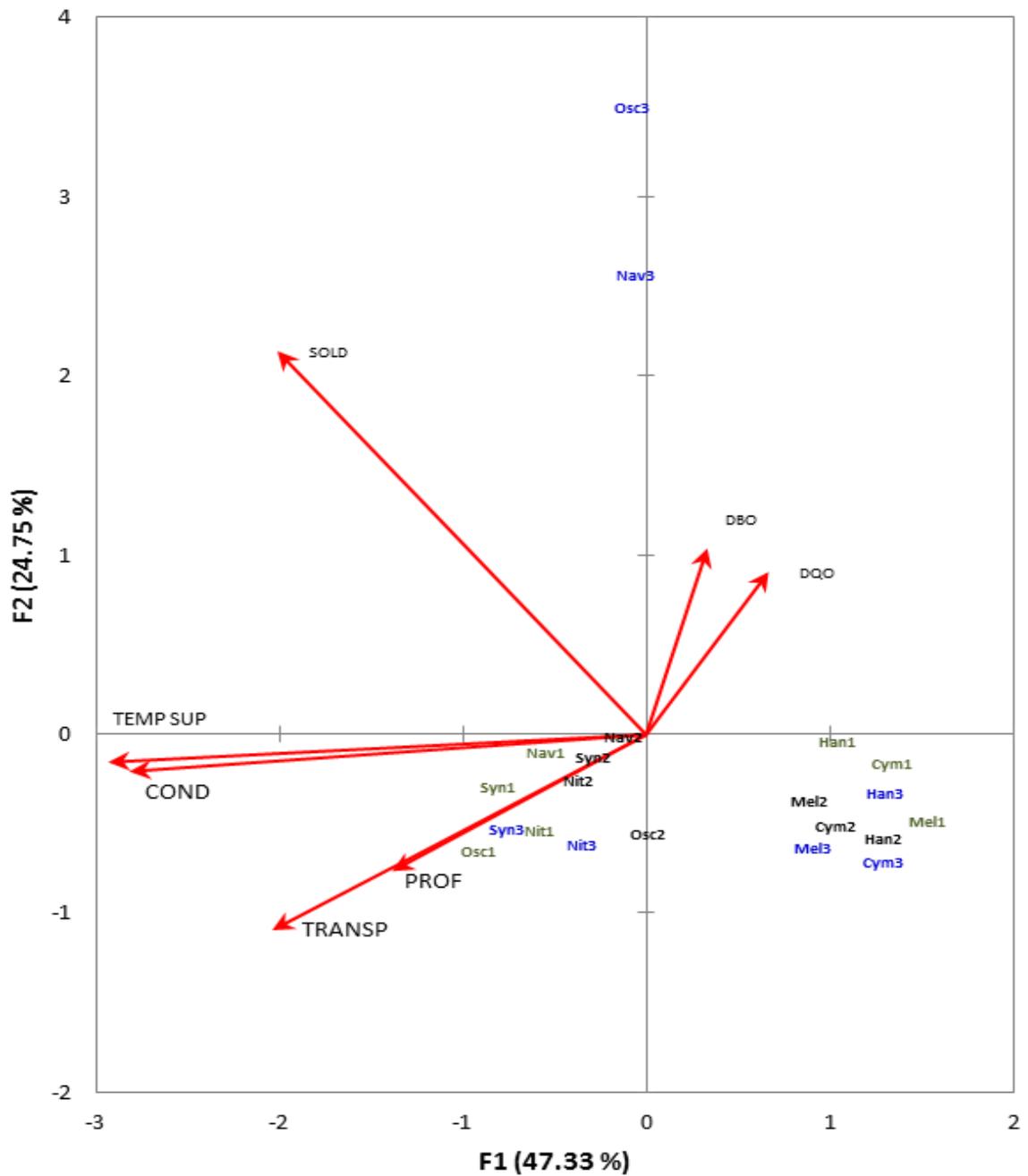
El más grande se conforma solamente de puntos de laguna y el afluente de ésta (T5 a L8-b), este grupo es donde mayor similitud se observa entre sitios; *Navicula*, *Nitzschia* y *Synedra* son los géneros con mayor abundancia en estos sitios (Anexo 3). El segundo grupo (T1A a T0) se compone por la mayoría de puntos de río, dos de laguna (L2-b y L11) y T6 que es el efluente de la laguna; *Melosira*, *Cymbella*, *Navicula*, *Nitzschia*, *Synedra* y *Oscillatoria* tienen presencia importante en estos puntos. Finalmente, el último grupo tiene menos similitud que el resto y se conforma solamente por dos puntos de río (T1B y T3B), ambos comparten abundancias similares en géneros como *Navicula* y *Spirulina* (Anexo 3). Es importante también destacar que T3B presenta algunos de los valores más bajos de abundancia en relación al resto de sitios antes detallados.

## **5.6. Análisis Canónico de Correspondencias**

Luego de haber confrontado los datos por campaña, para observar las tendencias y patrones de comportamiento de los géneros de fitoplancton y por otro lado los patrones de comportamiento de las variables abióticas en cada punto de muestro, es necesario realizar un análisis integrado, confrontando los patrones de abundancia de los géneros de fitoplancton que mayor abundancia registran tomando en cuenta todos los géneros encontrados (Anexo 4), con los patrones de variación de las condiciones abióticas reflejadas en cada punto de muestreo.

### **5.6.1. Análisis multifactorial de parámetros físicos, químicos y biológicos**

En los patrones de abundancia de los géneros de fitoplancton, los parámetros más influyentes fueron en este orden: la temperatura superficial del agua (TEMP SUP) y la conductividad (COND), luego los sólidos suspendidos (SOLD), la transparencia del agua determinada por disco Secchi (TRANSP), la profundidad de la columna de agua (PROF), finalmente la DBO y DQO (Figura 45).

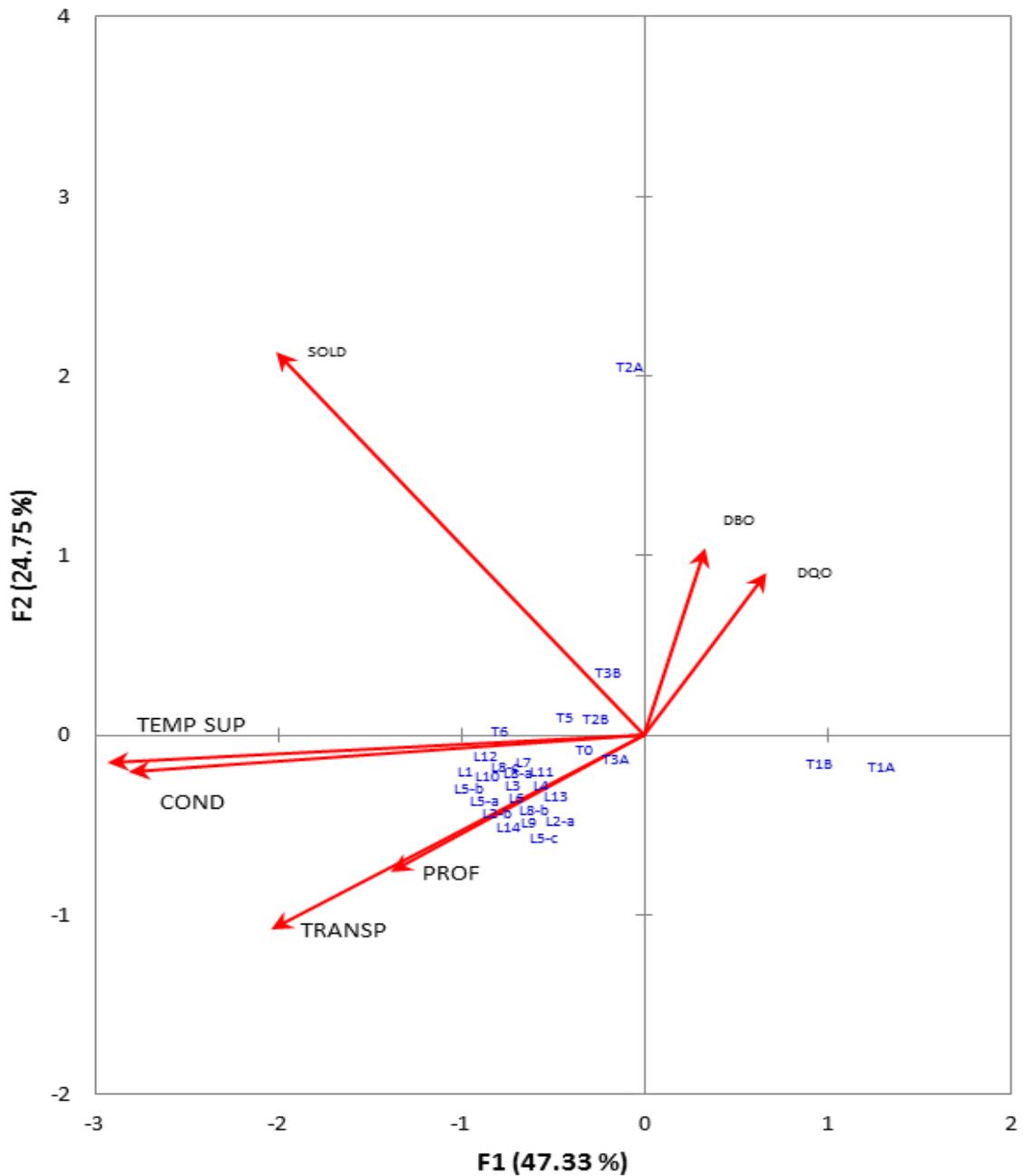


**Figura 45.** Plano de ordenamiento de variables físico-químicas y biológicas en el área de estudio, a partir de un Análisis Canónico de Correspondencias, con datos de las tres épocas de muestreo. Obsérvese en verde los géneros de la época seca representados también por el número 1, en negro los géneros de la época de transición representados por el número 2, y en azul los géneros de la época de lluvia representados por el número 3.

Hay tres grupos funcionales de géneros de fitoplancton, se puede observar como no hay una diferenciación importante entre épocas de muestreo. Los géneros que dependen o están en correlación con mayores valores de temperatura superficial, conductividad, transparencia y profundidad total son *Synedra* (Syn) y *Nitzschia* (Nit) durante las tres épocas muestreadas; *Navicula* (Nav) y *Oscillatoria* (Osc) igualmente están influenciados por estas variables, sin embargo, durante la época de lluvia, ambas se alejan de este grupo y al parecer, en esta estación, están afectadas y su presencia es influenciada por los sólidos suspendidos, éste último (*Oscillatoria*) durante la época de transición se aleja también de los vectores, lo que puede indicar una influencia simultánea de algunas variables o a su vez poca influencia de ellas, esto es aún más claro con el último grupo funcional conformado por *Melosira* (Mel), *Cymbella* (Cym) y *Hantzschia* (Han) que no dependen de ninguna variable abiótica en específico durante las tres estaciones, por esto muestran una correlación negativa ante ellas, lo cual puede deberse a la influencia de factores que no se pueden controlar o a su vez que son propios de cada género.

#### **5.6.2. Análisis Multifactorial de parámetros físicos, químicos y sitios de muestreo**

Analizando las variables abióticas con los sitios de muestreo (Figura 46) se puede observar una distribución similar como en el caso de los géneros.



**Figura 46.** Plano de ordenamiento de variables físico-químicas y puntos de muestreo en el área de estudio, a partir de un Análisis Canónico de Correspondencias, con datos de las tres épocas de muestreo. Obsérvese los sitios en color azul.

Analizando las variables abióticas con los sitios de muestreo (Figura 46) se puede observar una distribución consistente como en el caso los géneros. Los sitios de

laguna están agrupados de manera más cercana entre sí que con los de río, los sitios correspondientes a laguna tienen valores similares de temperatura superficial, conductividad, profundidad total y transparencia del agua; T0, T3A, T6, T5 y T2B (puntos de río) también se encuentran asociados a estos mismos vectores, lo cual indica una influencia importante de estas variables sobre ellos; cabe recalcar que los géneros *Synedra*, *Navicula* y *Nitzschia* presentan altos valores de abundancia en estos puntos. El sitio T3B muestra una relación más importante con los sólidos suspendidos.

El punto T2A no tiene una relación clara con ninguna variable en específico lo cual coincide también con una mayor distribución de *Navicula* y *Oscillatoria* en la época de lluvia (Figura 45), además es importante recalcar que las abundancias de estos dos géneros durante esta estación presentan los valores más altos justamente en este punto. El último grupo se conforma por T1B y T1A, que muestran valores bajos de todas las variables abióticas, esto coincide con mayor presencia y abundancia de *Melosira*, *Cymbella* y *Hantzschia* en estos puntos.

## CAPÍTULO VI DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados confirman que existe un estado mesotrófico en la laguna de Papallacta y sus afluentes (Steinitz-Kannan, 1979), esto se determina debido a la presencia de varios grupos bioindicadores de tal estado, como *Navicula*, *Nitzschia* y *Oscillatoria*, que indican que hay concentración de carga orgánica moderada, pero no determinan alta eutrofización, este estado actual puede deberse a diferentes causas antrópicas, como descargas de agroquímicos, detergentes y posibles residuos del derrame de petróleo del 2003. Es también importante destacar que ningún género de fitoplancton encontrado, al parecer, tiene una relación de dependencia específica con una variable abiótica determinada, es decir, dependen de manera simultánea de varias (pero nunca por una sola variable en especial) como efecto general de todas las interacciones físico-químicas locales (Dacong *et al.*, 2011).

La presencia y abundancia de géneros de fitoplancton puede estar determinada de manera natural debido a procesos propios del ecosistema, relacionados con su dinámica ecológica (Reynolds, 2006), o a su vez, por alguna variación de las variables abióticas, que pueden ser determinantes en la abundancia y riqueza de todos los organismos en general y en cada época estacional, estos cambios en la dinámica se evidencian sobre todo en la tercera campaña (época de lluvia), en la que se registran las abundancias más bajas de manera general, tomando en cuenta todos los géneros encontrados (Anexo 3), contrario a lo que sucede con los grupos más significativos que se detallan en los análisis del índice de Steinhaus y ACC (Análisis Canónico de Correspondencias) (Figuras 42-46), que se mantienen durante las tres épocas como los más abundantes. Estos géneros (*Melosira*, *Hantzschia*, *Navicula*, *Nitzschia* y *Synedra*) tienen presencia tanto en río como en laguna, pero en el primero (río) es donde mayor abundancia se registra, lo cual se evidencia en el ACC, donde hay una diferenciación entre los sitios. A pesar de estas diferencias, la presencia de grupos fitoplanctónicos en la zona fótica de la laguna y sobre todo en los ríos indica que hay buenas condiciones

para el desarrollo de productores primarios, incluso con los disturbios a los que está expuesta actualmente la zona de estudio.

### **Relación de las variables abióticas con la estacionalidad**

Las siete variables abióticas altamente correlacionadas (Tabla 4, Figuras 34-38 y 45-46) son importantes para determinar los cambios que pueden influir sobre la biota de los sitios muestreados, ya que variaciones en sus valores (dadas por cambios de las estaciones o alteraciones antrópicas eventuales) pueden alterar la dinámica de la especies.

La temperatura es determinante para la reproducción de los organismos planctónicos debido a que influye directamente sobre la fisiología y el metabolismo de los organismos, además de la físico-química del ambiente acuático (González, 1995; Aznar, 2000; Bahnasawy *et al.*, 2011), en Papallacta durante la época seca es donde se registran los valores de temperatura más altos al igual que la mayor riqueza y abundancia de organismos (Anexos 1 y 5), por lo que es muy probable que esta variable sea hasta cierto grado más determinante, en esa época, para el desarrollo de los organismos, ya que en las estaciones de transición y lluvia los valores de abundancia son menores, al igual que los valores de temperatura (Anexos 2, 3, 6 y 7) (Olguín *et al.*, 2004; Manjare *et al.*, 2010). Es importante resaltar que la actividad biológica aumenta a valores de temperatura algo más altos (Aznar, 2000); por lo tanto, es importante puntualizar que cuando el nivel de agua es menor, la temperatura del agua aumenta debido a una mayor exposición del agua al sol y al menor flujo de corriente, lo que también influye sobre los organismos (Manjare *et al.*, 2010); sin embargo, se deben también tomar en cuenta el resto de variables que pueden tener también influencia sobre los organismos planctónicos, debido a que la temperatura se correlaciona (positiva o negativamente) con factores como el pH, sólidos suspendidos, concentración de oxígeno y conductividad (Aznar, 2000; Anukool y Shivani, 2011); esta última en Papallacta presenta valores menores durante la época de lluvia (entre 80 $\mu$ S y 400 $\mu$ S) en relación a época seca y transición que registran valores entre 120 $\mu$ S y 800 $\mu$ S, que puede ser a causa del nivel mayor de agua, como lo sugieren Anukool y Shivani (2011) donde se

argumenta que la disminución en los valores de conductividad se pueden dar por la dilución que se presenta cuando hay un mayor nivel de agua, y en todo caso puede estar determinada por la estacionalidad.

Un patrón similar se observa con los sólidos suspendidos, los cuales durante la estación lluviosa muestran valores inferiores, estos coinciden con un aumento en la turbidez durante esta estación, además el paso de luz natural llega a menor profundidad (cerca de la superficie), ya que el disco Secchi se observa hasta un máximo de 1.4 y 1.5 metros, a diferencia de la época seca y transición donde los valores de transparencia se registran entre 1 y 5 metros (Anexos 5-6), lo que corresponde a un mayor paso de luz en la columna de agua de la laguna, que es otro factor esencial que afecta directamente el comportamiento de los organismos por ser vital para la fotosíntesis (Reynolds, 2006; Bellinger y Sigee, 2010). Esta incidencia de luz, que depende de la turbidez y los sólidos en suspensión, puede ser determinante sobre la riqueza y abundancia de los géneros, porque en época seca y transición con valores de turbidez bajos y mayor profundidad de disco, es cuando se registran mayor riqueza y abundancia totales en relación a la época de lluvia, donde se registran valores inversos (turbidez alta y menor transparencia determinada por el disco Secchi), por lo tanto el paso de luz es menor sobre la superficie, lo que afecta la producción de fitoplancton, reflejando menor abundancia y riqueza totales durante esta época (Anexo 7), lo cual corrobora lo propuesto por Reynolds (2006). Específicamente, la transparencia del agua es importante porque brinda las condiciones para que cianobacterias proliferen con más rapidez que el resto de grupos, ya que tienen mayor facilidad de desarrollo en condiciones con poca luz, como se observa en la estación lluviosa (mayor turbidez), estas cianobacterias son un indicador de eutrofización (Nõges *et al.*, 2003; Steinitz-Kannan, 2006), específicamente en esta campaña se registra la mayor abundancia de *Oscillatoria* (cianobacteria indicadora de alta carga orgánica).

Los valores de oxígeno disuelto son constantes en las tres épocas, a excepción de unos pocos sitios en época lluviosa que son justamente donde menores abundancias se registraron (Anexos 3 y 7), al parecer no hay influencia de este componente sobre algún género específico de fitoplancton. De igual manera el pH está entre 7 y 9, un rango que

se mantiene en todas las campañas, tampoco influye directamente sobre algún organismo particular. Para DBO y DQO se registran valores altos durante la época de lluvia, especialmente es notable el DBO ya que estos altos valores coinciden con la baja abundancia de fitoplancton, que son los encargados de descomponer la materia orgánica que representa esta variable (DBO).

Los valores de nitrógeno total son sorprendentemente bajos en todas las campañas, este es un componente limitante de crecimiento para algunos grupos de fitoplancton (Collos y Berges, 2011), las cianobacterias, por ejemplo, son importantes fijadoras de nitrógeno y su presencia en la laguna y ríos muestreados es limitada, lo cual se puede vincular a la disponibilidad de nitrógeno. Las primeras dos campañas (época seca y transición) presentan valores de nitrógeno entre 0 y 1 mg/L en la mayoría de sitios, mientras que en la tercera (época de lluvia) todos los puntos tienen valores cercanos a 3mg/L lo que coincide con las mayores abundancias de la cianobacteria *Oscillatoria* y de las algas verdes *Spirogyra* y *Rhizoclonium* en esta última campaña. Anteriormente, otros investigadores han demostrado que un aumento de nitrógeno en el agua coincide con mayores abundancias de ciertos grupos de cianobacterias y algas verdes (Reynolds, 2006; Gligora *et al.*, 2007), sin embargo en la presente investigación los resultados de laboratorio registrados no son concluyentes para asegurar esta influencia.

El aumento del nivel del agua en la época de lluvia sin duda afecta sobre las variables ya que se diluyen las concentraciones de sólidos suspendidos y baja la conductividad durante esta época, las cuales son usualmente altas por la influencia de las aguas termales de la zona que aportan con grandes cantidades de sales de azufre como se observa en época seca y transición, los sólidos suspendidos también son afectados por esta dilución (valores entre 30mg/l y 240mg/l en época de lluvia, en relación a 70mg/l y 560mg/l en época seca y transición) (Anexo 7) y debido a las corrientes y el viento propios de la época lluviosa hay una remoción de estos sólidos desde las orillas, distribuyéndose homogéneamente sobre toda la superficie de la laguna, aumentando la turbidez y limitando el paso de luz. Por otra parte, con valores de temperatura inferiores, debido a la época (lluviosa), los organismos disminuyeron en riqueza y abundancia (Anexos 5, 6 y 7); entonces es posible que la estacionalidad sea

determinante para la distribución de los organismos en Papallacta (Aznar, 2000; Bellinger y Sigeo, 2010; Anukool y Shivani, 2011), también se debe tomar en cuenta el aporte de sedimentos de origen antrópico (piscinas acuícolas, centros de aglomeración turística, agricultura, ganadería, entre otros), que pueden influir en la manera que se presentan los organismos (Dokulil *et al.*, 2007; Collos y Berges, 2011). Estos factores exógenos son importantes porque su influencia no se puede controlar, como se presentó en el caso del punto T2A en la época seca, donde se registró un valor de 2100mg/l en los sólidos suspendidos, este valor posiblemente se debe a la descarga de alguna fuente termal con presencia de sales de azufre disueltas o a su vez por la acumulación de sedimentos que se presentan en el río producto del movimiento constante del agua (Gunkel, 2003; Luque y Martínez, 2003).

La profundidad, durante las dos primeras campañas (época seca y transición), es similar, mientras que en la tercera (época de lluvia) es mayor, debido al nivel alto del agua; a pesar de esta variación, la laguna de Papallacta se caracteriza por no presentar estratificación térmica hasta los 14 metros (Steinitz-Kannan, 1979) y las muestras tomadas en este estudio no se registraron a profundidades mayores a seis metros (determinada por la visibilidad del disco Secchi) (Anexos 5, 6, 7), por lo tanto, los organismos encontrados estuvieron en un rango de condiciones similar durante las tres estaciones.

### **Relación de los géneros fitoplanctónicos con la estacionalidad**

Para aseverar que los sitios muestreados están en un estado mesotrófico, se toman en cuenta los géneros encontrados, tanto en términos de riqueza (Índice de Palmer, presencia en los sitios), como de abundancia (Índice de Steinhaus, ACC); existen cinco géneros de diatomeas en todas las épocas muestreadas, que son los más representativos (mayor abundancia total en todos los puntos), tanto en laguna como en río: *Melosira*, *Hantzschia*, *Navicula*, *Nitzschia* y *Synedra*, además se toman en cuenta otros cuatro géneros con menores valores, pero que también son representativos: *Cymbella*, *Oscillatoria*, *Microcystis* y *Ankistrodesmus*, los otros 13 géneros tienen valores inferiores, a pesar de que los valores de abundancia varían para todos los

grupos, su presencia es constante durante todas las épocas de muestreo (Steinitz-Kannan, 1979, 2006).

Las cianobacterias y algas verdes descritas son comunes en aguas que presentan contaminación orgánica y algunas como *Ankistrodesmus* incluso pueden causar contaminación luego de que se presentan, considerándose a este grupo como un contaminante natural capaz de afectar sobre la concentración de oxígeno (Bellinger y Sigee, 2010; Likens, 2010).

Sin embargo la incidencia de géneros como todos los arriba descritos no necesariamente indica que exista contaminación orgánica, ya que como se trata de grupos muy resistentes, puede que su presencia se deba a que son organismos muy tolerantes (Reynolds, 2006). Por otro lado hay gran cantidad de otras algas fitoplanctónicas de varios grupos que se desarrollan en estas aguas, lo que indica que los ecosistemas estudiados en Papallacta tienen las condiciones necesarias para que exista este tipo de vida, aún después del derrame de 2003, dando lugar a que se desarrollen otros organismos de niveles tróficos superiores.

De acuerdo al índice de contaminación orgánica de Palmer los géneros encontrados en este estudio tienen una suma total de índices de 17 (Laguna + Río), lo que indica que hay evidencia probable de una moderada carga orgánica o un estado mesotrófico de la laguna y sus afluentes (Tabla 5).

La presencia de estos grupos es más notable en los ríos, ya que es donde mayores valores de abundancia se observa (Anexos 1, 2 y 3). Durante la época seca es cuando mayor riqueza y abundancia se observó de todos los grupos en general (Anexo 1) y gradualmente se pueden ver valores en descenso hasta que en la tercera campaña (época de lluvia) se observó una cantidad mucho menor de organismos (Anexo 3), esto posiblemente se debe al nivel de agua por las lluvias, el cual aumentó drásticamente, en comparación a época seca y transición, probablemente afectando la conductividad y los sólidos suspendidos como se expuso anteriormente, además la temperatura es importante ya que se observan aproximadamente entre dos y tres grados menos en

comparación a época seca y transición y el paso de luz es menor (Secchi entre 1 y 1.5 metros) lo cual afecta la producción de fitoplancton (Reynolds, 2006; Baykal, 2011). Estos cambios en la estacionalidad sin duda alteran el comportamiento de los organismos ya que también modifican los valores de las variables abióticas (Roth, 2009; Baykal, 2011).

Durante la segunda campaña (transición) hubo un aumento sustancial en la abundancia de *Ankistrodesmus* que durante la primera fue casi nula y en la tercera campaña nuevamente disminuyó, se ha demostrado que una especie dentro de este género (*Ankistrodesmus braunii*) es capaz de absorber más cantidades de nitratos cuando el pH donde habita está entre siete y ocho (Eisele y Ullrich, 1977), estos valores se presentan durante la época de transición en Papallacta, posiblemente provocando un aumento en la abundancia de este género, también los valores de temperatura en laguna son homogéneos durante esta estación, lo que puede ser importante para su desarrollo (Eisele y Ullrich, 1977), un patrón similar se observa con el género *Microcystis*, que registró mayor abundancia durante la época seca y disminuyó en las dos siguientes, este comportamiento posiblemente se deba a la estacionalidad también, ya que los niveles altos de agua mueven los sedimentos desde las riberas, por lo tanto, hay mayor turbidez, lo que coincide con el estudio de Olguín (2004) donde se registra a este género con menor presencia siempre que la turbidez aumenta, en dicho estudio los experimentos son controlados en bioensayos, por lo que en la naturaleza este patrón puede estar aún más marcado. En general se ha demostrado que hay una tendencia en la disminución de organismos cuando hay mayor turbidez acompañada de valores de temperatura y conductividad menores (Reynolds, 2006; Abd El-Monem, 2008).

### **Posibles efectos del derrame de petróleo sobre las comunidades fitoplanctónicas**

Debido a la naturaleza del fitoplancton, que está suspendido en la columna de agua, a su dependencia de las corrientes para desplazarse y su rápido metabolismo, son capaces de absorber metales pesados rápidamente (Reynolds, 2006; Bahnasawy *et al.*, 2011), este fenómeno pudo haber ocurrido debido a que el crudo tiene una fracción soluble que afecta directamente al fitoplancton a través del agua (Edema, 2012), es decir

los hidrocarburos de esta porción se mezclan con el agua, por lo tanto el fitoplancton que depende del cuerpo de agua, absorbe pasivamente estos contaminantes mediante el intercambio de iones directamente hacia la pared celular (González, 1995). Posiblemente los organismos en Papallacta absorbieron los hidrocarburos durante los primeros días después del derrame, las repercusiones inmediatas pudieron haber sido una rápida disminución de estos organismos en las zonas afectadas y cambios en su metabolismo (Reynolds, 2006); sin embargo, cuando el crudo se precipitó hacia el fondo los organismos pudieron haber seguido desarrollándose normalmente en la superficie (hasta seis metros de profundidad), esto se puede sustentar con el estudio de Steinitz-Kannan (1979) ya que varios géneros encontrados en 1979 como *Synedra* y *Melosira* están presentes aún hoy en día en la laguna y siguen siendo dominantes; otros como *Pinnularia* y *Nitzschia*, también descritos en ese estudio aún están presentes. *Fragilaria* y *Amphora* son dos géneros encontrados en 1979 que ahora no se observaron, incluso Steinitz-Kannan en su estudio del 2006 tampoco los reporta, por lo que es posible que hayan desaparecido a consecuencia del derrame, en dicho estudio (2006) además se describen grupos como los dinoflagelados *Ceratium*, *Peridinium* y diatomeas como *Cocconeis*, *Hannaea* y *Planotidium* que tampoco se registraron en los muestreos de la presente investigación, estas diferencias tal vez se deben a que los análisis realizados en el presente estudio se hicieron en la zona fótica, la cual está en un estado mesotrófico, que indicaría una disminución en la carga orgánica desde un estado eutrófico anterior, el cual si fue descrito en estudios previos en la zona (Steinitz-Kannan, 1979, 2006).

Entonces es posible que algunos organismos, como los mencionados anteriormente, no tengan las mismas condiciones ambientales para manifestarse como antes, ya que se trata de organismos presentes en aguas con alta carga orgánica (Reynolds, 2006), por lo tanto los cambios ambientales a mediano y largo plazo pueden afectar de manera importante al fitoplancton de la laguna, sobre todo en especies sensibles.

Como el crudo se precipitó hacia el fondo de la laguna, es precisamente ahí donde aún hay contaminación focalizada por TPH (Hidrocarburos Totales de Petróleo),

los puntos de laguna donde se registraron altos valores de TPH (fondo de la laguna o sedimento) durante las tres campañas de manera constante son L5-a, L5-b, L5-c, L7, L8-a, L8-b, L8-c, L9, L10 y L11 (entre 0.4mg/L y 0.28mg/L) (Anexos 5, 6 y 7), sin embargo en la zona fótica de estos mismos puntos hay presencia de organismos por lo que se puede determinar que hay una recuperación desde el derrame o a su vez el tiempo que el crudo estuvo sobre la superficie no afectó de manera crítica la producción de fitoplancton, ya que las comunidades se desarrollaron aún después de ser afectadas. La misma tendencia se puede observar en río, ya que el crudo, debido a las corrientes, se depositó en la laguna, lo cual pudo ayudar a que este ecosistema (río) se recupere más rápido (autodepuración), una vez que no hubo presencia de crudo, en todos los puntos de río los TPH están entre 0.8mg/L y 0.26mg/L (Anexos 5, 6 y 7), sin embargo se registraron mayores valores de abundancia de fitoplancton en todas las épocas en contraste con la laguna, esto se debe a que los ríos tienen una constante oxigenación que les permite depurarse con mayor rapidez en relación a la laguna (Sierra, 2011), esta es una razón probable por la cual los ríos albergan mayor cantidad de organismos en forma de perifiton y epiliton (fitoplancton pegado a las plantas y rocas), esta forma de vida se desarrolla sobre sustratos a manera de biofilm como una capa que permanece pegada sobre dicho sustrato posiblemente permitiendo mayor resistencia a los cambios ambientales (Reynolds, 2006; Bellinger y Sigeo, 2010). Sin embargo, tanto en laguna como en río la riqueza y abundancia de fitoplancton es inversamente dependiente de las lluvias ya que con mayor precipitación el nivel del agua aumenta en la laguna diluyendo todo y en los ríos se produce un efecto abrasivo ya que las corrientes son más fuertes (Luque y Martínez, 2003), esta tendencia está bien marcada en época de lluvia donde la riqueza y abundancia general de géneros disminuyó considerablemente.

Los registros de TPH en todas las campañas y en todos los puntos están bajo 0.3 mg/l, que está dentro de los límites aceptados por el TULAS, pero esto solamente se trata de muestras tomadas hasta seis metros de profundidad en la zona fótica y no representan valores de zonas donde el crudo está asentado hacia el fondo.

En el caso de los ríos locales, ya que no existen estudios de las comunidades fitoplanctónicas previos al derrame, no se puede afirmar qué géneros estuvieron

presentes o que comportamiento presentaron décadas atrás, sin embargo se puede esperar una tendencia similar ya que el río desemboca en la laguna, haciendo que mucho del fitoplancton que habita en la laguna llegue desde los ríos, y a pesar de que ambos ecosistemas tienen dinámicas distintas y el fitoplancton tiene formas de vida diferentes, los mismos géneros están presentes en ambos entornos.

## **Conclusiones finales**

No existe una relación de similitud definida entre puntos en cuanto a abundancia o riqueza, como se expuso en los resultados y se muestra en los dendrogramas del índice de Steinhaus (Figuras 42, 43 y 44), se observa una tendencia diferente en las similitudes en cada campaña, esto se puede atribuir en mayor parte a las variaciones estacionales (Sierra, 2011). Es además importante destacar que tampoco se encuentra una influencia directa en las variaciones de abundancia y riqueza en los puntos con mayor acumulación de crudo reportada (L5-a, L5-b, L5-c, L7, L8-a, L8-b, L8-c, L9, L10, L11), posiblemente se debe a que el crudo permanece aún en el fondo, afectando directamente a los organismos que habitan en el sedimento y no a los de la zona fótica.

Las similitudes de abundancia que existen entre varios puntos de muestreo, están casi siempre limitadas a la presencia de los grupos principales: *Melosira*, *Hantzschia*, *Navicula*, *Nitzschia* y *Synedra* o a su vez por *Cymbella* u *Oscillatoria*, por lo tanto el resultado de los análisis de similitud de Steinhaus se debe principalmente a la distribución de estos grupos en río y laguna, y a pesar de que el resto de géneros encontrados son importantes para evaluar el estado de salud ecológica, sus abundancias son mucho menores en relación a estos grupos. Es importante destacar que la ubicación geográfica tampoco tiene una influencia directa sobre la presencia o abundancia de organismos.

Debido a la naturaleza polimíctica de la laguna de Papallacta (no presenta estratificación termal por largos períodos y sus aguas se mezclan desde la superficie hacia el fondo) y a que es un sistema lacustre abierto (Terneus, 2002; Steinitz-Kannan, 2006; Roldán y Ramírez, 2008), es posible que los organismos pasen del río hacia la

laguna gracias a las corrientes, por esa razón se observan los mismos géneros (riqueza) en ambos ecosistemas, y a pesar de que esta riqueza varía de acuerdo a la época, los organismos más importantes (*Melosira*, *Hantzschia*, *Navicula*, *Nitzschia*, *Synedra* y *Oscillatoria*), se presentaron como dominantes, en ambos sistemas, en relación al resto de grupos durante cada una de las tres épocas (en términos de abundancia). Las variaciones de abundancia, están determinadas por la variación de los factores de acuerdo a la época, esto se observa en los dendrogramas del índice de Steinhaus (Figuras 22, 24, 26), se puede ver cómo por campaña las relaciones de abundancia entre puntos cambia y esta tendencia nunca es la misma (por mas similar que sea), ya que durante cada época la presencia y abundancia varía por sitio.

A pesar del derrame y las condiciones cambiantes de la zona es importante enfatizar que grupos como *Synedra*, *Pinnularia*, *Oscillatoria*, *Nitzschia* y *Melosira* han estado presentes en las últimas décadas en Papallacta (Steinitz-Kannan, 1979, 2006), esto es un indicador de que el ecosistema se está regenerando o que a su vez estos organismos son tolerantes a cambios drásticos en su hábitat y han podido sobrevivir a pesar de las alteradas condiciones ambientales (Reynolds, 2006). Por otro lado las abundancias de *Navicula* pueden indicar que la dinámica de la laguna no ha cambiado mucho a pesar del derrame, ya que durante la presente investigación las abundancias de este género fueron de las más altas y de la misma forma que *Synedra*, *Nitzschia* y *Oscillatoria*, este género también indica que hay carga orgánica en el agua, lo cual coincide con los resultados encontrados por Steinitz-Kannan (2006).

Como se ha expuesto, la zona fótica muestra que tiene las condiciones para albergar vida a pesar de los cambios ambientales y del derrame, por lo que es importante que investigaciones en el futuro se concentren en monitorear si estos patrones se mantienen y no son producto de condiciones aisladas, ya que como se muestra en el informe de Grandes (2011), realizado en varios cuerpos de agua de zonas cercanas y en la misma laguna, la riqueza y abundancia de organismos en la laguna es mucho menor en contraste a lo que se encontró durante la presente investigación, lo cual puede depender de las condiciones cambiantes del ecosistema. Es además importante enfatizar que los estudios de Steinitz-Kannan (2006) y Grandes (2011) se concentran en

la laguna solamente, mientras que la presente investigación se desarrolló tomando en cuenta los ríos, que es donde se registran las mayores abundancias y se demuestra que su aporte, tanto de elementos bióticos como abióticos, influye significativamente en la dinámica de la laguna y sus procesos de recuperación y autodepuración.

## **RECOMENDACIONES**

- ❖ Es importante crear una base de datos pública con información de los géneros o especies de fitoplancton de agua dulce del Ecuador, ya que actualmente el acceso es limitado en esta área de estudio.
- ❖ Realizar un monitoreo periódico es primordial en la zona de Papallacta, no solamente en la laguna descrita en el presente estudio, sino también en las lagunas cercanas y en otros ríos, debido a la importancia que representan para la comunidad de Quito por el recurso agua y como parte de una zona protegida y turística.
- ❖ Puede ser importante realizar estudios controlados en un laboratorio, con los géneros encontrados en Papallacta y las distintas variables abióticas registradas, para determinar qué condiciones pueden influir más sobre cada género de manera específica.

## LITERATURA CITADA

Abd El-Monem, A. (2008). Impact of Summer Thermal Stratification on Depth Profile of Phytoplankton Productivity, Biomass, Density and Photosynthetic Capacity in Lake Nasser (Egypt). *Jordan Journal of Biological Sciences*, 1, 173-180.

Addinsoft. (2004). *Xlstat Pro Manual*. Addinsoft, 222.

Alberta Environment. (2006). *Aquatic Ecosystems Field Sampling Protocols*. Environmental Monitoring and Evaluation Branch: Alberta Environment, 1(1), 1-149.

Alles, D. (Ed) (2008). *Water Pollution and Algal Blooms in the Coastal Waters of the U.S.* Western Washington University, 1-24.

Andrade, E., Armisen, J., Cruz, J., y Larrosa, C. (2005). Percepción social del riesgo y vulnerabilidad de la población de Papallacta por derrames petroleros. *XXXIII Curso Internacional De Geografía Aplicada: "Geografía y Riesgos Ambientales"*, 1(1), 1-32.

Anukool, S., y Shivani, S. (2011). Assessment of Physico-Chemical properties and sewage pollution indicator bacteria in surface water of River Gomti in Uttar Pradesh. *International Journal of Environmental Sciences*, 2(1), 325-336.

Arce, O. H. (2006). *Indicadores Biológicos de Calidad de Agua*. Universidad Mayor de San Simon, 1-21. Cochamamba, Bolivia.

Aske, N. (2002). *Characterisation of Crude Oil Components, Asphaltene Aggregation and Emulsion Stability by means of Near Infrared Spectroscopy and Multivariate Analysis*. Department of Chemical Engineering. Tesis de Doctorado. Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología 1(1), 1-58.

Aveiga, I., Cabrera, L., Tapia, I., y Ponce, P. (2005). Remediation of the Impacts caused by the Petroleum spill in the lagoon of Papallacta In Ecuador-South America. *International Oil Spill Conference*, 1(1), 2-4.

Ayolabi, E., Folorunso, A., y Obende, P. (2010). Integrated Assessments of Possible Effects of Hydrocarbon and salt water intrusion on the groundwater of Inganmu area of Lagos Metropolis, Southwestern Nigeria. *Earth Sciences Research Journal*, 14(1), 100-110.

Aznar, A. (2000). Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas. *Gestión Ambiental*, 2(23), 12-19.

Bahnasawy, M., Khidr, A., y Dheina, N. (2011). Assessment of heavy metal concentrations in water, plankton, and fish of Lake Manzala, Egypt. *Turkish Journal of Zoology*, 35(2), 271-280.

Bathurst, R., Zori, D., y Byock, J. (2010). Diatoms as bioindicators of site use: locating turf structures from the Viking Age. *Journal of Archaeological Science*, 1(37), 2920-2928.

Baykal, T. A. (2011). Seasonal variations in phytoplankton composition and biomass in a small lowland river-lake system (Melen River, Turkey). *Turkish Journal of Biology*, 1(35), 485-501.

Bellinger, E., y Sigeo, D. (2010). *Freshwater Algae: Identification and Use as Bioindicators* (Vol. 1). Wiley-Blackwell. Hoboken, USA.

Canter-Lund, H. (2012). The Hilda Canter-Lund Collection: en [www.freshwaterlife.org](http://www.freshwaterlife.org). (Abril 2012).

Cartaxana, P. C. (2009). Phytoplankton and ecological assessment of brackish and freshwater coastal lagoons in the Algarve, Portugal. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, Blackwell Publishing. Asia, 14, 221-230.

Casallas, J., y Gunkel, G. (2001). Algunos aspectos limnológicos de un lago altoandino: el lago San Pablo, Ecuador. *Limnetica*, 215 - 232.

Catalogue of Diatom Names, California Academy of Sciences, Versión en línea actualizada 19 de septiembre 2011. Compilado por Elisabeth Fourtanier y J. Patrick Kociolek. Disponible en línea:

<http://research.calacademy.org/research/diatoms/names/index.asp>

Chakraborty, P., Acharyya, T., Babu, R., y Bandhyopadhyay, D. (2011). Impact of salinity and pH on phytoplankton community in a tropical freshwater system: An investigation with pigment analysis by HPLC. *J. Environ. Monit*, 13(3), 614-620.

Chattopadhyay, C. B. (2007). Temporal Changes in Environmental Characteristics and Diversity of Net Phytoplankton in a Freshwater Lake. *Turkish Journal of Botany*, 1(31), 287-296.

Chen, C., y Durbin, E. (1994). Effects of pH on the growth and carbon uptake of marine phytoplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 109(1), 83-94.

Chorus, I. B. (1999). *Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring and management*. Londres: Routledge.

Collos, Y., y Berges, J. (2011). Nitrogen Metabolism in Phytoplankton. *Marine Ecology*, 1(1), 1-7.

Cuassolo, F., Bastidas, M., Balseiro, E., y Monedutti, B. (2011). Leachates and elemental ratios of macrophytes and benthic algae of an Andean high altitude wetland. *Journal of Limnology*, 70(2), 1-9.

Dacong, Y., Lingling, Z., y Lirong, S. (2011). Spatio-temporal distribution of phytoplankton in the Danjiangkou Reservoir, a water source area for the South-to-North Water Diversion Project (Middle Route), China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 29(3), 531-540.

Delgado, J., Carrillo, P., Medina, J., Villar, M., y Bullejos, F. (2009). Interactive effects of phosphorus loads and ambient ultraviolet radiation on the algal community in a high-mountain lake. *Journal of Plankton Research*, 31(6), 619-634.

Dokulil, M., Donabaum, K., y Teubner, K. (2007). Modifications in phytoplankton size structure by environmental constraints induced by regime shifts in an urban lake. *Hydrobiologia*, 59–63.

Edema, N. (2012). *Effects of Crude Oil Contaminated Water on the Environment*. Delta State University. Cleveland, Mississippi. 1(1), 169-180.

Eisele, R., y Ullrich, W. (1977). Effect of Glucose and CO<sub>2</sub> on Nitrate Uptake and Coupled OH<sup>-</sup> Flux in *Ankistrodesmus braunii*. *Plant Physiology*, 59(1), 18-21.

Energy Information Administration (EIA). (2011). *Country Analysis Briefs: Ecuador*. <http://www.eia.gov/emeu/cabs/ecuador/pdf.pdf>. Estados Unidos. (Septiembre 2011).

EPA. (2007). *Ambient Water Quality Criteria for Dissolved Oxygen, Water Clarity and Chlorophyll a for the Chesapeake Bay and Its Tidal Tributaries*. U.S. Environmental Protection Agency. En: *National Field Manual for the Collection of Water Quality Data*. 1(1), 30-79.

Fingas, M., Hollebone, B., y Fieldhouse, B. (2006). *The Density Behaviour of Heavy Oils in Freshwater: The Example of the Lake Wabamun Spill*. Emergencies Science and Technology Division, Environment Canada. Ottawa, Canada. 1-15.

French-McCay, D., Graham, E., Schroeder, M., y Hahn, D. (2011). *Deepwater Horizon Oil Spill: NRDA Plankton Sampling Plan y Winter 2011 Cruise Plan*. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 1-13.

Gligora, M., Plenkovic, A., Kralj, K., Grigorszky, I., y Peros, D. (2007). The relationship between phytoplankton species dominance and environmental variables in a shallow lake (Lake Vrana, Croatia). *Hydrobiologia*, 584, 337–346.

Goldman, J. (1977). Temperature effects on phytoplankton growth in continuous culture. *Woods Hole Oceanographic Institution*, 22(5), 932-936.

González, M. (1995). The role of phytoplankton cells on the control of heavy metal concentration in seawater. *Marine Chemistry*, 48(1), 215-236.

Google Earth. (2013). *Mapas de la zona de Papallacta*. Acceso 04/02/2013.

- Goslee, S., y Urban, D. (2007). The Ecodist Package for Dissimilarity-based Analysis of Ecological Data. *Journal of Statistical Software*, 22(7), 1-19.
- Graham, J., Arancibia, P., y Graham, L. (1996). Effects of pH and selected metals on growth of the filamentous green alga *Mougeotia* under acidic conditions. *Limnology Oceanography*, 41(2), 63-270.
- Grandes, X. (2011). Informe técnico del análisis limnológico del fitoplancton y zooplancton del agua de los embalses La Mica, Salve Faccha, Mogotes, Sucus y de la laguna Papallacta. *Epmaps*, 1(1), 1-200.
- Guiry, M., y Guiry, G. (2012). *AlgaeBase*. Galway: National University of Ireland. World-wide electronic publication disponible en: [www.algaebase.org](http://www.algaebase.org).
- Gunkel, G. (2003). Limnología de un Lago Tropical de Alta Montaña, en Ecuador: Características de los sedimentos y tasa de sedimentación. *Revista Biología Tropical*, 51, 381-390.
- Hasle, G., y Syvertsen, E. (1996). Marine diatoms. En: *Identifying Marine Phytoplankton* (1 ed., Vol. 1). Academic Press. San Diego, USA.
- Hill, T., y Lewicki, P. (2006). *Statistics: methods and applications : a comprehensive reference for science, industry, and data mining* (1 ed.). Statsoft. Tulsa, USA.
- Hohn, M. H. 1969. Qualitative and quantitative analysis of plankton diatoms, Bass Island area, Lake Erie. *Bull. Ohio Biology Survey*. 3: 1-211.
- Humminbird. (2007). 100 Series Fishfinder Manual. [www.humminbird.com](http://www.humminbird.com).
- Hunding, C., y Lange, R. (2006). *Ecotoxicology of Aquatic Plant Communities*. National Agency of Environmental Protection, Denmark, 1(1).
- Kelly, M., Bennion, H., Cox, E., Goldsmith, B., Jamieson, J., Juggins, S., y Telford, R. (2005). *Common freshwater diatoms of Britain and Ireland: an interactive key*. Ireland.
- Komarek, J. (1992). *Diversita a moderní klasifikace sinic (Cyanoprocaryota)* [Diversity and modern classification of Cyanobacteria (Cyanoprokaryota)]. *Disertación Inaugural: No Publicada*
- Kumari, P., Dhadse, S., Chaudhari, P., y Wate, S. (2008). A Biomonitoring of Plankton to Assess Quality of Water in the Lakes of Nagpur City. *World Lake Conference*, 160-164.
- Lawrence, J., y Weldon, L. (2005). *Identification of Aquatic Weeds*. U.S. Department of Agriculture, Plantation Field Laboratory. Fort Lauderdale. 1(1), 1-13.

- Lehr, J., y Keeley, J. (2005). *Water Encyclopedia: Domestic, Municipal, and Industrial Water Supply and Waste Disposal* (Vol. 1). John Wiley y Sons, Inc. Hoboken, USA
- Lerner, L., y Wilmoth, B. (2005). *Encyclopedia of Water Science*. Thomson Gale. Farmington Hills, Michigan.
- Likens, G. (2010). *Plankton of Inland Waters: A derivative of encyclopedia of Inland Waters* (1 ed., Vol. 1). Elsevier Inc. San Diego, USA.
- Luque, M., y Martínez, A. (2003). Distribución temporal del fitoplancton y epilíton en el río Piedra Blanca (Córdoba, Argentina). *Limnetica*, 22(3-4), 19-34.
- Maldonado, M., Maldonado, J., Ortega, H., Encalada, A., Carvajal, F., Rivadeneira, J., Acosta, F., Jacobsen, D., Crespo, A., y Rivera, C. (2011). Biodiversity in Aquatic Systems of the Tropical Andes. *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*. 276-294.
- Manjare, S., Vhanalakar, A., y Muley, D. (2010). Analysis of Water Quality using physico-chemical parameters Tamdolge Tank in Kolhapur district, Maharashtra. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*, 1(2), 115-119.
- Marshall, H. (1965). The Annual Distribution and Stratification of Phytoplankton at Aurora Lake, Portage County, Ohio. *The Ohio Journal of Science*, 2, 190 - 202.
- Mena, P. (2005). La Biodiversidad de los Páramos en el Ecuador. *Banco de la Republica, Colombia*. 1(1), 496-513.
- Mena, P., y Hofstede, R. (2006). Los páramos ecuatorianos. *Botánica Económica de los Andes Centrales*, 1(1), 91-109.
- Miller, D. (1977). *Water at the Surface of the Earth: An Introduction to Ecosystem Hydrodynamics* (2 ed., Vol. 1). Academic Press. Milwaukee, USA.
- Miller, M., Alexander, V., y Barsdate, R. (1978). The Effects Of Oil Spills On Phytoplankton In An Arctic Lake And Ponds. *Arctic*, 192-218.
- Moreno-Ostos, E., Cruz-Pizarro, L., Basanta-Alvés, S., Escot, C., y George, D. (2006). Algae in the motion: Spatial distribution of phytoplankton in thermally stratified reservoirs. *Limnetica*, 205-215.
- Nõges, T., Nõges, P., y Laugaste, R. (2003). Water level as the mediator between climate change and phytoplankton composition in a large shallow temperate lake. *Hydrobiologia*, 1(1), 257-263.
- O'Sullivan, P., y Reynolds, C. (2004). *The Lakes Handbook: Limnology and Limnetic Ecology* (Vol. 1). Blackwell Science. Malden, USA.

Olguín, H., Puig, A., Loez, C., Salibián, A., Topalián, M., Castañe, P., y Rovedatti, M. (2004). An integration of water physicochemistry, algal bioassays, phytoplankton, and zooplankton for ecotoxicological assessment in a highly polluted lowland river. *Water, Air, and Soil Pollution: Kluwer Academic Publishers, Holanda*. 1(155), 355–381.

Petroecuador. (2006). Examen de control ambiental al derrame de crudo ocurrido en el área de Reserva Cayambe-Coca por la ruptura de la tubería del Sistema de Oleoducto Transecuatoriano (SOTE), a cargo de Petroecuador. Quito. Reporte disponible en [www.environmental-auditing.org](http://www.environmental-auditing.org).

Prescott, G. (1954). *How To Know The Freshwater Algae* (Vol. 1). Brown Company. Dubuque, Iowa, U.S.A.

Radtke, D., Davis, J., y Wilde, F. (2010). National Field Manual for the Collection of Water-Quality Data. U.S. Geological Survey, 9(1), 3-22.

Reynolds, C. (2006). *The Ecology of Phytoplankton* (Vol. 2). Cambridge University Press. Cambridge, UK.

Reynolds, C., Huszar, V., Kruk, C., Naselli, L., y Melo, S. (2002). Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 24(5), 417-428.

Roldán, G., y Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de Limnología Neotropical* (2 ed.). Editorial Universidad de Antioquia. Antioquia, Colombia.

Roth, R. A. (2009). *Freshwater Aquatic Biomes* (Vol. 1). Greenwood Press. Westport, USA.

Sayer, C., Burgess, A., Kari, K., Davidson, T., Peglar, S., Yang, H., y Rose, N. (2010). Long-term dynamics of submerged macrophytes and algae in a small and shallow, eutrophic lake: implications for the stability of macrophyte-dominance. *Freshwater Biology*, 55(1), 565–583.

Sierra, C. (2011). *Calidad de Agua: Evaluación y Diagnóstico* (1 ed.). Ediciones de la Universidad de Medellín. Medellín, Colombia.

Sierra, R. (1999). Propuesta preliminar de un sistema de clasificación de vegetación para el Ecuador continental (Vol. 1). Quito, Ecuador: Proyecto INEFAN/GEF-BIRF y EcoCiencia.

Spaulding, S., y Edlund, M. (2009). *Cymbella*. In *Diatoms of the United States*. Acceso: marzo 09, 2012 de: <http://westerndiatoms.colorado.edu/taxa/genus/Cymbella>.

Spaulding, S., y Metzeltin, D. (2011). *Diploneis*. In *Diatoms of the United States*. Acceso: marzo 10, 2012 de: <http://westerndiatoms.colorado.edu/taxa/genus/diploneis>.

- Spaulding, S., y Edlund, M. (2009). *Neidium*. In Diatoms of the United States. Acceso: marzo 14, 2012 de: from <http://westerndiatoms.colorado.edu/taxa/genus/Neidium>.
- Steinitz-Kannan, M. (1979). Comparative Limnology of Ecuadorian Lakes: A Study of Species Number and Composition of Plankton Communities of the Galapagos Islands and the Equatorial Andes. Ohio State University, 1(1), 1-372.
- Steinitz-Kannan, M. (2006). Informe para Ecuambiente sobre el monitoreo de la laguna de Papallacta realizada el 25 de julio del 2006. Northern Kentucky University, 1(1), 1-5.
- Stoermer, E., y Smol, J. (2004). The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences (Vol. 2). Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Striebel, M., Ptacnik, R., Stibor, H., Behl, S., Berninger, U., Haupt, F., Hingsamer, P., Mangold, C., Ptacnikova, R., Steinböck, M., Stockenreiter, M., Wickham, S., y Wollrab, S. (2010). Water Column Stratification, Phytoplankton diversity and consequences for resource use and productivity. Proceedings of the HYDRALAB III Joint User Meeting. Hannover, Alemania. 1-4.
- Suthers, I. (2009). Plankton: A guide to their ecology and monitoring for water quality (Vol. 1). CSIRO Publishing. Collingwood, Australia.
- Taylor, W., Williams, L., Hern, S., y Lambou, V. (1979). Phytoplankton water quality relationships in U.S. Lakes (1 ed., Vol. 1). EPA. Las Vegas, USA.
- ter Braak, C., y Verdonschot, P. (1995). Canonical correspondence analysis and related multivariate methods in aquatic ecology. *Aquatic Sciences*, 57(3), 1015-1621.
- Terneus, E. (2002). Plantas acuáticas de los páramos ecuatorianos. Tesis de Doctorado de la Pontificia Universidad Católica de Ecuador. Quito-Ecuador. 1-135.
- Tirira, D. (1999). Mamíferos del Ecuador (1 ed., Vol. 1). Museo de Zoología. Pontificia Universidad Católica del Ecuador y SIMBIOE. Quito, Ecuador.
- Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente (TULAS). (2003). Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua. Libro VI, Anexo 1.
- UNESCO. (2009). Cianobacterias Planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión. Documento Técnico PHI-LAC, N° 16, 1, 1-105.
- Vázquez, G. (2006). Bioindicadores como herramientas para determinar la calidad del agua. *Universidad Autónoma de México*, 60(1), 41-48.
- Vincent, W., y Laybourn, J. (2008). Limnology of Arctic and Antarctic Aquatic Ecosystems (Vol. 1). Oxford University Press. Oxford, UK.

Walsh, G. (2006). Toxic Effects of Pollutants on Plankton. EPA. Gulf Breeze, Florida. 1-18.

Werner, D. (1977). The Biology of Diatoms. University of California Press. Blackwell Publishing, 1(1).

Wu, J. (1984). Phytoplankton as Bioindicator for Water Quality in Taipei. Botanical Bulletin of Academia Sinica, 25, 205-214.

Yoshioka, P. (2008). Misidentification of the Bray-Curtis similarity index. Marine Ecology Progress Series. 368, 309–310.

## ANEXOS

**Anexo 1.** Detalle de los géneros encontrados en Papallacta durante primera campaña (época seca). Se observa el número de colonias por mililitro (NCM) de cada género, en cada uno de los puntos muestreados. También se detallan las abundancias y riquezas de cada género por punto, al igual que las abundancias y riquezas totales.

Puntos de muestreo	Diatomeas/Bacillariophyta													Cianobacterias/Cyanophyta			Algas verdes/Chlorophyta				Abundancia por punto	Riqueza por punto	
	<i>Cyclotella</i>	<i>Melosira</i>	<i>Cymbella</i>	<i>Diploneis</i>	<i>Hantzschia</i>	<i>Frustulia</i>	<i>Campylodiscus</i>	<i>Navicula</i>	<i>Neidium</i>	<i>Nitzschia</i>	<i>Pinnularia</i>	<i>Rhopalodia</i>	<i>Surirella</i>	<i>Synedra</i>	<i>Microcystis</i>	<i>Oscillatoria</i>	<i>Spirulina</i>	<i>Ankistrodesmus</i>	<i>Mougeotia</i>	<i>Spyrogira</i>			<i>Rhizoclonium</i>
L1	2000	28000	0	0	0	0	0	216000	0	162000	0	4000	0	40000	12000	57000	0	0	0	0	1000	522000	9
L2-a	0	24000	0	0	0	0	0	164000	0	699000	0	0	0	554000	20000	33000	0	0	0	0	0	1494000	6
L2-b	0	8000	0	0	0	0	0	54000	0	167000	0	0	0	13000	5000	6000	0	0	0	0	0	253000	6
L3	0	30000	0	0	0	0	0	220000	0	351000	0	0	0	46000	7000	7000	0	0	0	0	0	661000	6
L4	0	0	0	0	0	0	0	9000	2000	45000	1000	0	0	52000	1000	1000	0	0	0	0	0	111000	7
L5-a	0	6000	0	0	5000	0	0	92000	0	105000	0	0	0	48000	12000	0	0	0	0	0	0	268000	6
L5-b	0	0	2000	0	0	0	0	0	0	42000	0	0	0	12000	0	0	0	0	0	0	0	56000	3
L5-c	0	0	3000	0	0	0	0	2000	0	48000	0	0	0	6000	0	1000	0	0	0	0	0	60000	5
L6	1000	93000	16000	1000	4000	0	0	529000	0	707000	0	44000	2000	146000	22000	38000	0	0	0	0	0	1603000	12
L7	0	0	0	0	0	0	0	1000	0	15000	0	0	0	17000	0	4000	0	0	0	0	0	37000	4
L8-a	0	3000	0	0	0	0	0	10000	0	73000	0	0	0	75000	2000	0	0	0	0	0	0	163000	5
L8-b	0	0	0	0	0	0	0	23000	0	34000	0	0	0	28000	3000	0	0	0	0	0	0	88000	4
L8-c	0	0	0	0	0	0	0	4000	0	39000	0	0	0	16000	0	0	0	0	0	0	0	59000	3
L9	0	13000	0	2000	1000	0	0	181000	2000	568000	0	0	0	103000	6000	43000	0	0	0	0	0	919000	9
L10	0	67000	0	0	0	0	0	402000	0	893000	0	0	0	46000	33000	0	0	1000	0	0	0	1442000	6
L11	0	7000	0	0	1000	0	0	126000	0	293000	0	0	0	48000	11000	29000	0	0	0	0	1000	516000	8
L12	0	52000	0	0	2000	0	0	157000	0	151000	0	0	1000	76000	16000	11000	0	0	0	0	0	466000	8
L13	0	0	0	3000	0	1000	0	66000	0	248000	0	0	0	88000	0	14000	0	0	0	0	1000	421000	7
L14	0	0	0	0	7000	0	0	28000	1000	106000	0	0	0	40000	0	3000	0	0	0	0	0	185000	6
T0	0	105000	7000	0	1000	0	0	353000	0	159000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000	626000	6
T1A	0	2869000	329000	0	625000	0	0	136000	0	187000	0	0	0	0	2000	0	0	0	0	0	0	4148000	6
T1B	0	1813000	196000	0	1520000	0	72000	247000	0	768000	0	1000	0	0	0	0	0	0	95000	0	0	4712000	8
T2A	0	111000	25000	0	249000	0	0	569000	0	48000	0	0	2000	146000	3000	0	0	0	0	0	0	1153000	8
T2B	0	35000	0	2000	72000	0	0	600000	0	175000	0	0	0	46000	1000	0	0	0	0	2000	0	933000	8
T3A	0	47000	0	1000	49000	0	0	528000	0	194000	0	0	0	32000	0	0	0	0	0	0	2000	853000	7
T3B	0	61000	47000	4000	163000	0	0	511000	0	72000	56000	0	7000	218000	0	0	0	0	0	0	0	1139000	9
T5	0	6000	0	0	6000	0	0	126000	0	156000	0	0	0	74000	1000	21000	0	0	0	0	2000	392000	8
T6	0	37000	0	0	37000	0	0	738000	0	2459500	0	0	0	2245500	1000	0	0	0	0	0	1000	5519000	7
<b>Abundancia Total</b>	<b>3000</b>	<b>5415000</b>	<b>625000</b>	<b>13000</b>	<b>2742000</b>	<b>1000</b>	<b>72000</b>	<b>6092000</b>	<b>5000</b>	<b>8964500</b>	<b>57000</b>	<b>49000</b>	<b>12000</b>	<b>4215500</b>	<b>158000</b>	<b>268000</b>	<b>0</b>	<b>1000</b>	<b>95000</b>	<b>2000</b>	<b>9000</b>		
<b>Riqueza Total</b>	<b>2</b>	<b>20</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>15</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>27</b>	<b>3</b>	<b>28</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>25</b>	<b>18</b>	<b>14</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>7</b>		

**Anexo 2.** Detalle de los géneros encontrados en Papallacta durante la segunda campaña (transición). Se observa el número de colonias por mililitro (NCM) de cada género, en cada uno de los puntos muestreados. También se detallan las abundancias y riquezas de cada género por punto, al igual que las abundancias y riquezas totales.

Puntos de muestreo	Diatomeas/Bacillariophyta													Cianobacterias/Cyanophyta			Algas verdes/Chlorophyta				Abundancia por punto	Riqueza por punto	
	<i>Cyclotella</i>	<i>Melosira</i>	<i>Cymbella</i>	<i>Diploneis</i>	<i>Hantzschia</i>	<i>Frustulia</i>	<i>Campylodiscus</i>	<i>Navicula</i>	<i>Neidium</i>	<i>Nitzschia</i>	<i>Pinnularia</i>	<i>Rhopalodia</i>	<i>Surirella</i>	<i>Synedra</i>	<i>Microcystis</i>	<i>Oscillatoria</i>	<i>Spirulina</i>	<i>Ankistrodesmus</i>	<i>Mougeotia</i>	<i>Spyrogira</i>			<i>Rhizoclonium</i>
L1	0	0	0	0	0	0	0	1000	0	16000	0	0	0	6000	2000	0	0	5000	0	0	0	30000	5
L2-a	0	1000	0	0	0	0	0	1000	0	26000	0	0	0	40000	3000	0	0	3000	0	0	0	74000	6
L2-b	0	0	0	0	0	0	0	1000	0	7000	0	0	0	23000	1000	0	0	1000	0	0	0	33000	5
L3	9000	73000	2000	0	10000	3000	0	88000	0	104000	0	3000	0	119000	0	60000	0	1000	0	0	4000	476000	12
L4	0	1000	0	0	0	0	0	1000	0	9000	0	0	0	21000	1000	5000	0	4000	0	0	0	42000	7
L5-a	0	0	1000	0	0	0	0	30000	0	43000	0	0	0	46000	0	1000	0	4000	0	0	0	125000	6
L5-b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11000	0	0	0	4000	0	0	0	0	0	0	0	15000	2
L5-c	0	0	0	0	0	0	0	3000	0	24000	0	0	0	0	0	1000	0	0	0	0	0	28000	3
L6	0	1000	0	0	0	0	0	1000	0	17000	0	0	0	22000	2000	0	0	1000	0	0	0	44000	6
L7	0	0	0	0	0	0	0	0	1000	5000	0	0	0	9000	0	0	0	0	0	0	0	15000	3
L8-a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3000	0	0	0	6000	0	0	0	1000	0	0	0	10000	3
L8-b	0	0	0	0	0	0	0	7000	0	2000	0	0	0	7000	0	0	0	6000	0	0	0	22000	4
L8-c	0	0	0	0	0	0	0	3000	0	7000	0	0	0	1000	0	0	0	3000	0	0	0	14000	4
L9	0	0	0	3000	0	0	0	2000	0	4000	0	0	0	10000	0	1000	0	6000	0	0	0	26000	6
L10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7000	0	0	0	13000	0	2000	0	1000	0	0	0	23000	4
L11	0	0	0	0	0	0	0	4000	0	4000	0	0	0	11000	0	0	0	1000	0	0	0	20000	4
L12	0	0	0	0	2000	0	0	4000	0	6000	0	0	0	8000	0	0	0	0	0	0	0	20000	4
L13	0	0	0	1000	0	0	0	1000	0	16000	0	0	0	31000	0	0	0	0	0	0	0	49000	4
L14	0	0	0	1000	0	0	0	4000	0	1000	0	0	0	9000	0	0	0	4000	0	0	0	19000	5
T0	0	46000	10000	0	0	0	0	229000	0	20000	0	0	0	0	0	2000	0	0	0	0	0	307000	5
T1A	0	48000	66000	0	91000	0	0	163000	0	0	0	0	0	88000	1000	45000	0	0	6000	0	0	508000	8
T1B	0	1116000	248000	0	486000	0	0	509000	0	306000	0	20000	0	0	0	0	0	0	30000	0	0	2715000	7
T2A	0	36000	0	0	0	0	0	379000	0	66000	0	0	0	13000	3000	0	0	0	2000	0	0	499000	6
T2B	0	46000	5000	4000	38000	0	0	776000	0	101000	0	0	0	0	2000	0	0	0	0	0	0	972000	7
T3A	0	70000	18000	0	33000	0	0	452000	0	10000	0	0	1000	348000	0	0	0	0	0	0	0	932000	7
T3B	0	28000	24000	3000	0	0	0	679000	0	37000	0	0	0	420000	1000	1000	0	0	0	0	0	1193000	8
T5	0	19000	0	0	3000	0	0	25000	0	37000	0	0	1000	0	0	15000	0	0	0	0	0	100000	6
T6	0	23000	0	0	0	0	0	758000	0	773000	0	0	0	0	0	5000	0	0	0	0	0	1559000	4
<b>Abundancia Total</b>	<b>9000</b>	<b>1508000</b>	<b>374000</b>	<b>12000</b>	<b>663000</b>	<b>3000</b>	<b>0</b>	<b>4121000</b>	<b>1000</b>	<b>1662000</b>	<b>0</b>	<b>23000</b>	<b>2000</b>	<b>1255000</b>	<b>16000</b>	<b>138000</b>	<b>0</b>	<b>41000</b>	<b>38000</b>	<b>0</b>	<b>4000</b>		
<b>Riqueza Total</b>	<b>1</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>24</b>	<b>1</b>	<b>27</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>22</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>0</b>	<b>14</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>1</b>		

**Anexo 3.** Detalle de los géneros encontrados en Papallacta durante la tercera campaña (época de lluvia). Se observa el número de colonias por mililitro (NCM) de cada género, en cada uno de los puntos muestreados. También se detallan las abundancias y riquezas de cada género por punto, al igual que las abundancias y riquezas totales.

Puntos de muestreo	Diatomeas/Bacillariophyta														Cianobacterias/Cyanophyta			Algas verdes/Chlorophyta				Abundancia por punto	Riqueza por punto
	<i>Cyclotella</i>	<i>Melosira</i>	<i>Cymbella</i>	<i>Diploneis</i>	<i>Hantzschia</i>	<i>Frustulia</i>	<i>Campylodiscus</i>	<i>Navicula</i>	<i>Neidium</i>	<i>Nitzschia</i>	<i>Pinnularia</i>	<i>Rhopalodia</i>	<i>Surirella</i>	<i>Synedra</i>	<i>Microcystis</i>	<i>Oscillatoria</i>	<i>Spirulina</i>	<i>Ankistrodesmus</i>	<i>Mougeotia</i>	<i>Spyrogira</i>	<i>Rhizoclonium</i>		
L1	0	0	0	0	1000	0	0	2000	0	2000	0	0	0	16000	0	0	0	0	0	0	0	21000	4
L2-a	0	0	0	0	1000	0	0	5000	0	23000	0	0	0	30000	0	0	0	1000	0	0	0	60000	5
L2-b	0	0	1000	0	0	0	0	9000	0	40000	0	0	0	17000	0	1000	0	0	0	0	0	68000	5
L3	0	1000	0	0	0	0	0	4000	0	20000	0	0	0	10000	0	2000	0	0	0	0	0	37000	5
L4	0	0	0	0	1000	0	0	6000	0	0	0	0	0	73000	0	0	0	0	0	0	0	80000	3
L5-a	0	0	0	0	0	0	0	5000	0	16000	0	0	0	10000	0	0	0	5000	0	0	0	36000	4
L5-b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22000	0	0	0	21000	0	0	0	0	0	0	0	43000	2
L5-c	0	0	0	0	0	0	0	1000	0	0	0	0	0	1000	0	0	0	0	0	0	0	2000	2
L6	0	0	0	0	0	0	0	2000	0	18000	0	0	0	12000	0	0	0	0	0	0	0	32000	3
L7	0	0	1000	0	0	0	0	0	0	1000	0	0	0	4000	0	0	0	0	0	0	0	6000	3
L8-a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11000	0	0	0	8000	0	0	0	0	0	0	0	19000	2
L8-b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9000	0	0	0	20000	0	0	0	2000	0	0	0	31000	3
L8-c	0	0	0	0	0	0	0	1000	0	1000	0	0	0	16000	0	0	0	0	0	0	0	18000	3
L9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7000	0	0	0	12000	0	0	0	0	0	0	0	19000	2
L10	0	0	0	0	0	0	0	2000	0	9000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11000	2
L11	0	0	0	0	2000	0	0	6000	0	15000	0	0	0	7000	0	1000	0	0	0	0	0	31000	5
L12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23000	0	0	0	36000	0	0	0	0	0	0	0	59000	2
L13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7000	0	0	0	24000	0	0	0	0	0	0	0	31000	2
L14	0	0	0	1000	0	0	0	0	0	19000	0	0	0	52000	0	0	0	1000	0	0	0	73000	4
T0	0	6000	0	0	0	0	0	3000	0	1000	0	0	0	8000	0	1000	0	0	0	0	0	19000	5
T1A	0	1000	5000	0	0	0	0	23000	5000	19000	0	0	0	5000	0	0	0	0	0	0	0	58000	6
T1B	0	178000	168000	0	270000	0	0	6000	0	61000	0	0	0	0	0	0	2000	0	0	0	92000	777000	7
T2A	0	3000	4000	0	13000	0	0	415000	0	0	0	0	1000	24000	0	427000	0	0	0	0	0	887000	7
T2B	0	1000	2000	0	1000	0	0	44000	1000	2000	0	0	0	0	0	15000	0	0	0	0	0	66000	7
T3A	0	0	1000	0	0	0	0	9000	0	1000	0	0	1000	0	0	2000	0	0	0	0	0	14000	5
T3B	0	4000	0	2000	0	0	0	6000	0	9000	0	0	0	1000	0	0	1000	0	0	0	0	23000	6
T5	0	0	1000	0	0	0	0	2000	0	5000	0	0	0	20000	0	0	0	0	0	0	0	28000	4
T6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12000	0	0	0	28000	0	2000	0	0	0	0	0	42000	3
<b>Abundancia Total</b>	0	194000	183000	3000	289000	0	0	551000	6000	353000	0	0	2000	455000	0	451000	3000	9000	0	0	92000		
<b>Riqueza Total</b>	0	7	8	2	7	0	0	19	2	25	0	0	2	24	0	8	2	4	0	0	1		

**Anexo 4.** Detalle de los géneros encontrados en Papallacta en total para las tres campañas de muestreo. Se observa el número de colonias por mililitro (NCM) de cada género, en cada uno de los puntos muestreados.

	<i>Cyclotella</i>	<i>Melosira</i>	<i>Cymbella</i>	<i>Diploneis</i>	<i>Hantzschia</i>	<i>Frustulia</i>	<i>Campylodiscus</i>	<i>Navicula</i>	<i>Neidium</i>	<i>Nitzschia</i>	<i>Pinnularia</i>	<i>Rhopalodia</i>	<i>Surirella</i>	<i>Synedra</i>	<i>Microcystis</i>	<i>Oscillatoria</i>	<i>Spirulina</i>	<i>Ankistrodesmus</i>	<i>Mougeotia</i>	<i>Spirogyra</i>	<i>Rhizoclonium</i>	
L1	2000	28000	0	0	1000	0	0	219000	0	180000	0	4000	0	62000	14000	57000	0	5000	0	0	1000	
L2-a	0	25000	0	0	1000	0	0	170000	0	748000	0	0	0	624000	23000	33000	0	4000	0	0	0	
L2-b	0	8000	1000	0	0	0	0	64000	0	214000	0	0	0	53000	6000	7000	0	1000	0	0	0	
L3	9000	104000	2000	0	10000	3000	0	312000	0	475000	0	3000	0	175000	7000	69000	0	1000	0	0	4000	
L4	0	1000	0	0	1000	0	0	16000	2000	54000	1000	0	0	146000	2000	6000	0	4000	0	0	0	
L5-a	0	6000	1000	0	5000	0	0	127000	0	164000	0	0	0	104000	12000	1000	0	9000	0	0	0	
L5-b	0	0	2000	0	0	0	0	0	0	75000	0	0	0	37000	0	0	0	0	0	0	0	
L5-c	0	0	3000	0	0	0	0	6000	0	72000	0	0	0	7000	0	2000	0	0	0	0	0	
L6	1000	94000	16000	1000	4000	0	0	532000	0	742000	0	44000	2000	180000	24000	38000	0	1000	0	0	0	
L7	0	0	1000	0	0	0	0	1000	1000	21000	0	0	0	30000	0	4000	0	0	0	0	0	
L8-a	0	3000	0	0	0	0	0	10000	0	87000	0	0	0	89000	2000	0	0	1000	0	0	0	
L8-b	0	0	0	0	0	0	0	30000	0	45000	0	0	0	55000	3000	0	0	8000	0	0	0	
L8-c	0	0	0	0	0	0	0	8000	0	47000	0	0	0	33000	0	0	0	3000	0	0	0	
L9	0	13000	0	5000	1000	0	0	183000	2000	579000	0	0	0	125000	6000	44000	0	6000	0	0	0	
L10	0	67000	0	0	0	0	0	404000	0	909000	0	0	0	59000	33000	2000	0	2000	0	0	0	
L11	0	7000	0	0	3000	0	0	136000	0	312000	0	0	0	66000	11000	30000	0	1000	0	0	1000	
L12	0	52000	0	0	4000	0	0	161000	0	180000	0	0	1000	120000	16000	11000	0	0	0	0	0	
L13	0	0	0	4000	0	1000	0	67000	0	271000	0	0	0	143000	0	14000	0	0	0	0	1000	
L14	0	0	0	2000	7000	0	0	32000	1000	126000	0	0	0	101000	0	3000	0	5000	0	0	0	
T0	0	157000	17000	0	1000	0	0	585000	0	180000	0	0	0	8000	0	3000	0	0	0	0	1000	
T1A	0	2918000	400000	0	716000	0	0	322000	5000	206000	0	0	0	93000	3000	45000	0	0	6000	0	0	
T1B	0	3107000	612000	0	2276000	0	72000	762000	0	1135000	0	21000	0	0	0	0	2000	0	125000	0	92000	
T2A	0	150000	29000	0	262000	0	0	1363000	0	114000	0	0	3000	183000	6000	427000	0	0	2000	0	0	
T2B	0	82000	7000	6000	111000	0	0	1420000	1000	278000	0	0	0	46000	3000	15000	0	0	0	2000	0	
T3A	0	117000	19000	1000	82000	0	0	989000	0	205000	0	0	2000	380000	0	2000	0	0	0	0	2000	
T3B	0	93000	71000	9000	163000	0	0	1196000	0	118000	56000	0	7000	639000	1000	1000	1000	0	0	0	0	
T5	0	25000	1000	0	9000	0	0	153000	0	198000	0	0	1000	94000	1000	36000	0	0	0	0	2000	
T6	0	60000	0	0	37000	0	0	1496000	0	3244500	0	0	0	2273500	1000	7000	0	0	0	0	1000	
<b>Total de individuos por género</b>	12000	7117000	1182000	28000	3694000	4000	72000	10764000	12000	10979500	57000	72000	16000	5925500	174000	857000	3000	51000	133000	2000	105000	<b>41260000</b>
																						<b>Abundancia total</b>

**Anexo 5.** Detalle de las variables abióticas para la primera campaña (época seca). Se muestran los valores tomados en campo al igual que los análisis de laboratorio.

	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	Metros	Celsius	µS	pH	ppm	mg/L	Metros/Centímetros
	Bario	Cromo	DBO	DQO	Fenoles	Nitrogeno global	Plomo	Sólidos disueltos	TPH	Turbidez	Vanadio	Profundidad Punto	Temperatura	Conductividad	pH	Oxígeno Disuelto	Sólidos Suspendidos	Profundidad Secchi Regleta para Ríos
L1	0	0	4	18	0	0.3	0	16	0.08	7	0	1	14.4	810	8.9	6.1	400	1.3
L2-a	0	0	2	14	0	0.4	0	17	0.07	7	0	6	14.3	790	9.0	6.2	390	5.7
L2-b	0	0	13	29	0	0.3	0	8	0.08	6	0	6	14.3	790	9.0	6.2	390	5.7
L3	0	0	2	15	0	0.3	0	10	0.13	7	0	3	14.4	790	8.9	6.0	390	3.1
L4	0	0	1	14	0	0.4	0	6	0.05	6	0	2	13.3	760	9.0	5.5	370	2.1
L5-a	0	0	8	16	0	0.5	0	18	0.12	13	0	12	13.7	770	8.9	5.4	380	3.1
L5-b	0	0	1	16	0	0.4	0	5	0.05	5	0	15	13.8	790	9.1	5.6	390	3.1
L5-c	0	0	15	20	0	0.5	0	8	0.04	6	0	14	13.8	780	9.0	5.5	385	3.1
L6	0	0	3	15	0	0.4	0	11	0.07	19	0	2	14.6	810	8.9	6.1	400	1.6
L7	0	0	1	5	0	0.3	0	6	0.05	5	0	29	13.3	740	9.2	5.6	370	3.1
L8-a	0	0	1	11	0	0.4	0	9	0.05	6	0	28	12.2	780	9.3	5.5	380	3.0
L8-b	0	0	1	16	0	0.4	0	8	0.05	8	0	24	12.2	780	9.3	5.5	380	3.0
L8-c	0	0	1	18	0	0.3	0	5	0.06	6	0	29	12.2	780	9.3	5.5	380	3.0
L9	0	0	1	13	0	0.4	0	13	0.05	9	0	9	13.8	780	9.2	5.6	390	3.5
L10	0	0	6	17	0	0.4	0	23	0.10	9	0	1	14.9	870	8.9	6.2	430	2.0
L11	0	0	4	10	0	0.4	0	14	0.11	7	0	3	14.5	810	8.9	6.1	400	3.0
L12	0	0	1	5	0	0.4	0	15	0.02	7	0	4	14.3	820	8.7	6.0	390	2.0
L13	0	0	1	10	0	0.3	0	6	0.05	6	0	16	13.3	770	9.4	5.5	380	3.5
L14	0	0	10	27	0	0.4	0	6	0.02	4	0	18	13.3	770	9.2	5.3	380	3.3
T0	0	0	15	22	0	0.4	0	5	0.07	7	0	0	11.0	130	8.9	6.1	70	0.2
T1A	0	0	10	26	0	0.3	0	16	0.10	22	0	0	12.4	130	9.4	6.1	60	0.0
T1B	0	0	13	29	0	0.3	0	12	0.06	6	0	0	12.2	120	9.5	6.0	60	0.1
T2A	0	0	14	28	0	0.3	0	8	0.08	12	0	1	16.2	810	9.4	6.8	2100	0.4
T2B	0	0	11	20	0	0.3	0	10	0.06	11	0	1	15.5	1040	9.9	5.1	520	0.4
T3A	0	0	8	9	0	0.5	0	5	0.06	11	0	1	17.0	1020	9.8	4.1	510	0.3
T3B	0	0	13	25	0	0.5	0	8	0.08	10	0	1	15.6	1130	9.6	5.1	560	0.3
T5	0	0	1	22	0	0.5	0	6	0.05	8	0	1	13.9	860	9.3	6.0	430	0.9
T6	0	0	12	20	0	0.4	0	10	0.07	6	0	1	15.3	740	9.8	6.0	370	0.3

**Anexo 6.** Detalle de las variables abióticas para la segunda campaña (transición). Se muestran los valores tomados en campo al igual que los análisis de laboratorio.

	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	Metros	Celsius	µS	pH	ppm	mg/L	Metros/Céntímetros
	Bario	Cromo	DBO	DQO	Fenoles	Nitrogeno global	Plomo	Sólidos disueltos	TPH	Turbidez	Vanadio	Profundidad Punto	Temperatura	Conductividad	pH	Oxígeno Disuelto	Sólidos Suspendidos	Profundidad Secchi Regleta para Ríos
L1	0	0	1	31	0	0.9	0	5	0.14	8	0	1	14.6	780	7.7	6.1	380	1.2
L2-a	0	0	1	14	0	0.3	0	9	0.10	16	0	5	14.9	780	7.8	6.1	390	2.3
L2-b	0	0	1	15	0	0.2	0	14	0.10	7	0	5	14.9	780	7.8	6.1	390	2.3
L3	0	0	1	12	0	0.4	0	15	0.15	19	0	3	14.9	780	7.9	6.5	390	2.4
L4	0	0	1	16	0	0.6	0	13	0.14	10	0	3	14.9	760	7.9	6.3	380	3.1
L5-a	0	0	1	14	0	5.2	0	5	0.14	4	0	15	14.7	760	8.1	5.9	380	3.5
L5-b	0	0	1	28	0	3.5	0	5	0.18	6	0	14	14.7	760	8.1	5.9	380	3.5
L5-c	0	0	1	21	0	3.4	0	5	0.28	6	0	14	14.7	760	8.1	5.9	380	3.5
L6	0	0	1	9	0	0.1	0	8	0.12	8	0	2	14.7	810	7.6	6.1	400	1.6
L7	0	0	1	14	0	0.2	0	7	0.18	9	0	28	14.8	750	8.3	6.1	380	3.6
L8-a	0	0	1	33	0	0.0	0	5	0.18	3	0	28	14.7	750	7.6	5.9	380	3.3
L8-b	0	0	1	12	0	0.7	0	5	0.20	7	0	27	14.7	750	7.6	5.9	380	3.3
L8-c	0	0	2	33	0	0.3	0	5	0.12	6	0	27	14.7	750	7.6	5.9	380	3.3
L9	0	0	1	23	0	0.1	0	6	0.16	8	0	6	14.6	750	7.9	5.9	380	3.2
L10	0	0	1	15	0	0.1	0	8	0.13	6	0	1	13.9	760	7.8	6.5	370	1.2
L11	0	0	1	14	0	0.1	0	21	0.15	8	0	4	14.8	790	7.8	6.2	390	2.1
L12	0	0	1	16	0	0.8	0	10	0.14	10	0	3	14.9	770	7.9	6.3	390	2.1
L13	0	0	1	15	0	0.0	0	6	0.09	9	0	16	14.7	760	7.8	6.3	380	3.6
L14	0	0	1	12	0	0.0	0	5	0.18	5	0	17	14.6	750	8.3	5.6	380	3.5
T0	0	0	1	2	0	0.1	0	5	0.15	5	0	0	8.5	150	8.8	5.0	70	0.1
T1A	0	0	1	7	0	0.1	0	7	0.25	10	0	0	12.6	130	7.9	6.1	70	0.1
T1B	0	0	1	4	0	0.4	0	6	0.26	11	0	0	9.5	140	8.9	6.0	80	0.2
T2A	0	0	1	8	0	0.0	0	12	0.12	12	0	1	12.7	690	8.2	5.1	350	0.3
T2B	0	0	1	8	0	0.1	0	5	0.15	14	0	0	11.3	280	8.0	5.0	140	0.3
T3A	0	0	2	13	0	0.3	0	5	0.15	10	0	1	13.3	810	8.3	6.5	410	0.1
T3B	0	0	3	15	0	0.3	0	6	0.23	10	0	1	13.6	890	7.9	6.0	450	0.1
T5	0	0	4	16	0	0.4	0	16	0.09	13	0	1	14.7	750	8.2	6.3	380	1.3
T6	0	0	5	14	0	0.4	0	5	0.21	5	0	1	13.8	730	9.2	5.7	370	0.3

**Anexo 7.** Detalle de las variables abióticas para la tercera campaña (época de lluvia). Se muestran los valores tomados en campo al igual que los análisis de laboratorio.

	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	Metros	Celsius	µS	pH	ppm	mg/L	Metros/Centímetros
	Bario	Cromo	DBO	DQO	Fenoles	Nitrogeno global	Plomo	Sólidos disueltos	TPH	Turbidez	Vanadio	Profundidad Punto	Temperatura	Conductividad	pH	Oxígeno Disuelto	Sólidos Suspendedos	Profundidad Secchi
																		Regleta para Ríos
L1	0	0	31	39	0	2.8	0	16	0.11	17	0	5	10.8	360	7.9	6.0	170	1.5
L2-a	0	0	18	19	0	2.9	0	16	0.12	17	0	10	11.0	390	8.9	5.7	190	1.4
L2-b	0	0	15	20	0	2.8	0	16	0.13	16	0	10	11.0	390	8.9	5.7	190	1.4
L3	0	0	16	19	0	2.8	0	19	0.17	20	0	8	11.3	400	8.9	6.4	190	1.4
L4	0	0	14	23	0	2.9	0	16	0.05	21	0	4	11.3	410	7.5	11.8	200	1.4
L5-a	0	0	14	31	0	2.8	0	50	0.24	35	0	19	11.0	400	8.0	5.9	200	1.4
L5-b	0	0	3	42	0	2.8	0	19	0.23	13	0	19	11.0	400	8.0	5.9	200	1.4
L5-c	0	0	7	32	0	2.9	0	16	0.10	12	0	19	11.0	400	8.0	5.9	200	1.4
L6	0	0	19	23	0	2.8	0	16	0.11	17	0	6	11.0	380	8.1	6.0	190	1.3
L7	0	0	11	26	0	2.8	0	27	0.09	29	0	33	10.9	420	7.6	5.6	210	1.5
L8-a	0	0	2	18	0	2.7	0	18	0.12	16	0	32	11.1	480	7.6	8.5	240	1.5
L8-b	0	0	5	13	0	2.8	0	16	0.12	12	0	32	11.1	480	7.6	8.5	240	1.5
L8-c	0	0	14	52	0	2.8	0	16	0.09	11	0	32	11.1	480	7.6	8.5	240	1.5
L9	0	0	18	27	0	2.8	0	20	0.07	13	0	13	11.2	390	7.9	4.9	190	1.5
L10	0	0	22	18	0	2.9	0	16	0.14	21	0	7	11.1	380	8.9	6.5	180	1.4
L11	0	0	20	21	0	2.8	0	16	0.07	17	0	9	11.2	380	8.1	6.1	190	1.3
L12	0	0	12	30	0	2.8	0	16	0.08	17	0	7	11.3	410	7.8	4.7	210	1.5
L13	0	0	19	38	0	2.7	0	17	0.10	18	0	17	11.2	420	7.8	7.5	220	1.5
L14	0	0	26	39	0	2.8	0	21	0.06	20	0	22	11.4	390	8.3	5.9	200	1.5
T0	0	0	9	37	0	2.7	0	16	0.17	5	0	1	7.7	220	8.8	6.3	120	0.6
T1A	0	0	27	86	0	2.8	0	16	0.15	6	0	0	7.7	80	7.9	7.4	30	0.4
T1B	0	0	28	79	0	2.8	0	16	0.19	9	0	0	10.1	120	8.9	5.6	30	0.4
T2A	0	0	32	85	0	2.8	0	16	0.17	10	0	0	10.6	270	8.2	6.0	130	0.2
T2B	0	0	30	76	0	2.9	0	26	0.14	10	0	0	10.2	150	8.0	4.7	70	0.4
T3A	0	0	92	216	0	2.7	0	19	0.18	13	0	0	10.2	280	8.3	5.1	140	0.1
T3B	0	0	30	25	0	2.7	0	16	0.09	15	0	2	11.2	330	7.9	5.8	170	0.8
T5	0	0	7	25	0	2.8	0	16	0.11	9	0	5	11.1	370	8.0	3.8	180	1.5
T6	0	0	52	126	0	2.8	0	16	0.15	10	0	1	10.5	440	9.2	4.0	220	1.0

**Anexo 8.** Tabla de Correlación de Pearson para las tres épocas. Las celdas vacías corresponden a valores que en los resultados son menores que uno, por lo tanto el programa no los toma en cuenta para la prueba. Las variables que tienen una correlación positiva mayor a 0.7 se marcan en amarillo.

Variables	Bario	Cromo	DBO	DQO	Fenoles	Nitrogeno	Plomo	Sólidos Lab	TPH	Turbidez	Vanadio	Prof Punto	Temperatura	Conductividad	pH	Oxígeno	Sólidos Susp	Prof Secchi
Bario																		
Cromo																		
DBO			<b>1.00</b>	<b>0.72</b>		0.06		-0.04	0.16	0.16		<b>-0.42</b>	0.17	-0.27	0.31	0.06	0.18	<b>-0.42</b>
DQO			<b>0.72</b>	<b>1.00</b>		-0.14		-0.08	0.14	0.16		<b>-0.32</b>	-0.06	-0.33	0.25	0.29	0.17	-0.28
Fenoles																		
Nitrogeno global			0.06	-0.14		<b>1.00</b>		-0.01	-0.12	0.03		-0.10	0.20	0.33	-0.05	<b>-0.41</b>	-0.09	-0.07
Plomo																		
Sólidos Suspendidos			-0.04	-0.08		-0.01	<b>1.00</b>	<b>0.48</b>	0.34			-0.34	0.14	-0.07	-0.35	<b>0.38</b>	-0.11	0.06
TPH			0.16	0.14		-0.12	<b>0.48</b>	<b>1.00</b>	<b>0.40</b>			-0.37	0.20	-0.08	-0.16	0.30	0.06	-0.06
Turbidez			0.16	0.16		0.03		<b>0.34</b>	<b>0.40</b>	<b>1.00</b>		<b>-0.38</b>	0.19	-0.15	0.11	0.07	0.11	<b>-0.41</b>
Vanadio																		
Profundidad Punto			<b>-0.42</b>	-0.32		-0.10		-0.34	-0.37	<b>-0.38</b>		<b>1.00</b>	<b>-0.48</b>	0.10	-0.04	-0.27	-0.11	<b>0.52</b>
Temperatura			0.17	-0.06		0.20		0.14	0.20	0.19		<b>-0.48</b>	<b>1.00</b>	<b>0.69</b>	0.29	-0.15	<b>0.55</b>	-0.18
Conductividad			-0.27	-0.33		0.33		-0.07	-0.08	-0.15		0.10	<b>0.69</b>	<b>1.00</b>	0.12	<b>-0.39</b>	<b>0.38</b>	0.23
pH			0.31	0.25		-0.05		-0.35	-0.16	0.11		-0.04	0.29	0.12	<b>1.00</b>	<b>-0.47</b>	0.16	<b>-0.48</b>
Oxígeno			0.06	0.29		<b>-0.41</b>		<b>0.38</b>	0.30	0.07		-0.27	-0.15	<b>-0.39</b>	<b>-0.47</b>	<b>1.00</b>	0.24	0.07
Sólidos			0.18	0.17		-0.09		-0.11	0.06	0.11		-0.11	<b>0.55</b>	<b>0.38</b>	0.16	0.24	<b>1.00</b>	-0.13
Profundidad Secchi			<b>-0.42</b>	-0.28		-0.07		0.06	-0.06	<b>-0.41</b>		<b>0.52</b>	-0.18	0.23	<b>-0.48</b>	0.07	-0.13	<b>1.00</b>
Variables	Bario	Cromo	DBO	DQO	Fenoles	Nitrogeno	Plomo	Sólidos Lab	TPH	Turbidez	Vanadio	Prof Punto	Temperatura	Conductividad	pH	Oxígeno	Sólidos Susp	Prof Secchi
Bario																		
Cromo																		
DBO			<b>1.00</b>	0.04	-0.14	-0.11		0.02	0.06	-0.01		-0.20	0.03	0.17	<b>0.44</b>	0.05	0.19	-0.36
DQO			0.04	<b>1.00</b>	0.11	0.23		-0.17	-0.10	-0.35		<b>0.48</b>	<b>0.58</b>	<b>0.53</b>	<b>-0.45</b>	0.25	<b>0.53</b>	<b>0.52</b>
Fenoles			-0.14	0.11	<b>1.00</b>	-0.08		-0.19	0.18	-0.22		<b>0.64</b>	0.17	0.11	-0.26	0.01	0.12	0.32
Nitrogeno global			-0.11	0.23	-0.08	<b>1.00</b>		-0.24	0.22	-0.30		0.21	0.21	0.16	0.04	0.00	0.16	<b>0.38</b>
Plomo																		
Sólidos Suspendidos			0.02	-0.17	-0.19	-0.24		<b>1.00</b>	<b>-0.39</b>	<b>0.44</b>		-0.34	0.26	0.21	-0.18	0.32	0.21	-0.02
TPH			0.06	-0.10	0.18	0.22		<b>-0.39</b>	<b>1.00</b>	-0.20		0.08	-0.29	-0.35	-0.14	-0.14	-0.34	-0.14
Turbidez			-0.01	-0.35	-0.22	-0.30		<b>0.44</b>	-0.20	<b>1.00</b>		<b>-0.43</b>	-0.05	-0.09	-0.08	0.19	-0.09	-0.29
Vanadio																		
Profundidad Punto			-0.20	<b>0.48</b>	<b>0.64</b>	0.21		-0.34	0.08	<b>-0.43</b>		<b>1.00</b>	<b>0.39</b>	0.28	-0.28	0.00	0.29	<b>0.77</b>
Temperatura			0.03	<b>0.58</b>	0.17	0.21		0.26	-0.29	-0.05		<b>0.39</b>	<b>1.00</b>	<b>0.86</b>	<b>-0.59</b>	<b>0.55</b>	<b>0.86</b>	<b>0.68</b>
Conductividad			0.17	<b>0.53</b>	0.11	0.16		0.21	-0.35	-0.09		0.28	<b>0.86</b>	<b>1.00</b>	<b>-0.43</b>	<b>0.47</b>	<b>1.00</b>	<b>0.50</b>
pH			<b>0.44</b>	<b>-0.45</b>	-0.26	0.04		-0.18	0.35	-0.08		-0.28	<b>-0.59</b>	<b>-0.43</b>	<b>1.00</b>	-0.35	<b>-0.42</b>	<b>-0.42</b>
Oxígeno			0.05	0.25	0.01	0.00		0.32	-0.14	0.19		0.00	<b>0.55</b>	<b>0.47</b>	-0.35	<b>1.00</b>	<b>0.46</b>	0.23
Sólidos			0.19	<b>0.53</b>	0.12	0.16		0.21	-0.34	-0.09		0.29	<b>0.86</b>	<b>1.00</b>	<b>-0.42</b>	<b>0.46</b>	<b>1.00</b>	<b>0.51</b>
Profundidad Secchi			-0.36	<b>0.52</b>	0.32	<b>0.38</b>		-0.02	-0.14	-0.29		<b>0.77</b>	<b>0.68</b>	<b>0.50</b>	<b>-0.42</b>	0.23	<b>0.51</b>	<b>1.00</b>
Variables	Bario	Cromo	DBO	DQO	Fenoles	Nitrogeno	Plomo	Sólidos Lab	TPH	Turbidez	Vanadio	Prof Punto	Temperatura	Conductividad	pH	Oxígeno	Sólidos Susp	Prof Secchi
Bario																		
Cromo																		
DBO			<b>1.00</b>	<b>0.89</b>	<b>0.53</b>	-0.13		-0.05	0.18	-0.16		<b>-0.51</b>	-0.18	-0.34	0.30	-0.30	-0.33	<b>-0.63</b>
DQO			<b>0.89</b>	<b>1.00</b>	<b>0.67</b>	-0.22		-0.02	0.36	-0.34		<b>-0.41</b>	-0.37	<b>-0.43</b>	0.21	-0.27	<b>-0.41</b>	<b>-0.73</b>
Fenoles			<b>0.53</b>	<b>0.67</b>	<b>1.00</b>	-0.01		0.01	0.09	<b>-0.39</b>		-0.37	<b>-0.38</b>	<b>-0.42</b>	-0.03	-0.13	<b>-0.39</b>	<b>-0.67</b>
Nitrogeno global			-0.13	-0.22	-0.01	<b>1.00</b>		0.02	-0.21	0.10		-0.16	0.22	-0.07	0.20	-0.08	-0.11	0.14
Plomo																		
Sólidos Suspendidos			-0.05	-0.02	0.01	0.02		<b>1.00</b>	<b>0.41</b>	<b>0.67</b>		0.24	0.08	0.03	-0.15	-0.13	0.04	0.07
TPH			0.18	0.36	0.09	-0.21		<b>0.41</b>	<b>1.00</b>	-0.04		-0.21	-0.37	-0.36	<b>0.40</b>	-0.23	-0.37	<b>-0.44</b>
Turbidez			-0.16	-0.34	<b>-0.39</b>	0.10		<b>0.67</b>	-0.04	<b>1.00</b>		<b>0.39</b>	<b>0.53</b>	<b>0.46</b>	-0.16	0.12	<b>0.45</b>	<b>0.50</b>
Vanadio																		
Profundidad Punto			<b>-0.51</b>	<b>-0.41</b>	-0.37	-0.16		0.24	-0.21	<b>0.39</b>		<b>1.00</b>	<b>0.42</b>	<b>0.66</b>	<b>-0.49</b>	0.33	<b>0.66</b>	<b>0.64</b>
Temperatura			-0.18	-0.37	<b>-0.38</b>	0.22		0.08	-0.37	<b>0.53</b>		<b>0.42</b>	<b>1.00</b>	<b>0.75</b>	-0.21	0.04	<b>0.71</b>	<b>0.64</b>
Conductividad			-0.34	<b>-0.43</b>	<b>-0.42</b>	-0.07		0.03	-0.36	<b>0.46</b>		<b>0.66</b>	<b>0.75</b>	<b>1.00</b>	-0.24	0.22	<b>0.99</b>	<b>0.83</b>
pH			0.30	0.21	-0.03	0.20		-0.15	<b>0.40</b>	-0.16		<b>-0.49</b>	-0.21	-0.24	<b>1.00</b>	<b>-0.44</b>	-0.27	-0.26
Oxígeno			-0.30	-0.27	-0.13	-0.08		-0.13	-0.23	0.12		0.33	0.04	0.22	<b>-0.44</b>	<b>1.00</b>	0.21	0.20
Sólidos			-0.33	<b>-0.41</b>	<b>-0.39</b>	-0.11		0.04	-0.37	<b>0.45</b>		<b>0.66</b>	<b>0.71</b>	<b>0.99</b>	-0.27	0.21	<b>1.00</b>	<b>0.81</b>
Profundidad Secchi			<b>-0.63</b>	<b>-0.73</b>	<b>-0.67</b>	0.14		0.07	<b>-0.44</b>	<b>0.50</b>		<b>0.64</b>	<b>0.64</b>	<b>0.83</b>	-0.26	0.20	<b>0.81</b>	<b>1.00</b>

**Anexo 9.** Coordenadas de ubicación de los puntos de muestreo en la laguna de Papallacta y sus afluentes.

PUNTOS DE MUESTREO			LOCALIZACIÓN	COORD. WGS84	
CÓDIGO				E	N
<b>LAGUNA</b>					
L1			Extremo suroeste desembocadura Tambo	815,501	9,958,381
L2-a	L2-b		Cercana a orilla sur	815,726	9,958,283
L3			Cerca a orilla norte (piedra referencia)	815,690	9,958,395
L4			Cerca a orilla norte	815,898	9,958,355
L5-a	L5-b	L5-c	Centro laguna cercano orilla sur	815,940	9,958,117
L6			Extremo oeste cerca desembocadura Tambo	815,548	9,958,417
L7			Centro de laguna (fosa profunda)	816,256	9,958,171
L8-a	L8-b	L8-c	Extremo sureste orilla norte	816,217	9,957,905
L9			Extremo noreste orilla sur	816,643	9,958,105
L10			a 50 m del inicio laguna orilla sur	815,525	9,958,324
L11			a 100 m del inicio laguna orilla sur	815,600	9,958,367
L12			a 200 m del inicio laguna orilla sur	815,736	9,958,369
L13			extremo este laguna sector medio	816,436	9,957,957
L14			extremo este laguna sector centro	816,648	9,958,042
<b>RÍO</b>					
T0			Sucus 100 m aguas arriba sitio derrame	812,856	9,959,639
T1A			Sucus 200 m aguas abajo sitio derrame	812,825	9,959,544
			Sitio de derrame	812,820	9,959,586
T1B			Sucus aguas abajo R. Cachilarca	813,049	9,958,543
T2A			Sucus aguas arriba Tambo Host.Pachacushy	813,846	9,958,411
T2B			Tambo (Quebrada)	812,909	9,958,163
T3A			Tambo abs. 4000 junto Host.Jamanco	815,008	9,958,466
T3B			Tambo despues de descarga Host.Jamanco	815,219	9,958,394
T5			Tambo desembocadura en laguna	815,492	9,958,337
T6			Rio Cuchiyacu en inicio (desague Laguna)	816,860	9,958,048

## Glosario

**Botella Van Dorn:** Es un envase plástico con tapas en ambos extremos las cuales se cierran bajo el agua mediante un sistema especial, de esta manera se asegura que la muestra recolectada es de la profundidad a la que se desea recoger la muestra.

**Estratificación termal:** Se refiere a la variación en temperatura a diferentes profundidades en ecosistemas de laguna, este fenómeno no se presenta en Papallacta debido a su naturaleza polimíctica.

**Estrías:** Son rasgos característicos que presentan algunas especies de diatomeas que permiten la identificación más precisa cuando se conocen el número con las que cuentan. Se presentan a manera de líneas que pueden cruzar a lo largo de su estructura o ciertas partes y varían en número de acuerdo a la especie.

**Frústula:** Es la capa externa que cubre a las diatomeas, está compuesta de varios polisacáridos y principalmente de sílice. Tiene una naturaleza dura y porosa que protege al organismo.

**Mucílago:** Es una sustancia que secretan algunas especies de fitoplancton (cianobacterias y algas verdes) que usan principalmente para su movimiento.

**Polimíctica:** Característica de algunas lagunas donde no hay estratificación termal o esta solo se presenta en períodos cortos determinados por el clima, en ese caso las variaciones se dan solamente entre el día y la noche.

**Raphe:** Es una parte que se presenta en ciertas diatomeas que se caracteriza por presentar una costura o unión entre dos partes de su estructura, se identifica por ser una línea que se extiende de extremo a extremo en la frústula presentando una unión centro, que es donde usualmente se adhieren las valvas.

**Valva:** Se refiere a las dos partes dentro de la frústula de una diatomea que se unen en el raphe (en las especies que lo presentan) o a su vez están unidas en algún punto como dos partes de una concha. Esta siempre está encapsulada dentro de la frústula.