

**FACTORES QUE DETERMINAN LA VARIABILIDAD DEL FITOPLANCTON EN
CIÉNAGAS DE LA DEPRESIÓN MOMPOSINA**

YASMÍN PLATA DÍAZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE MATEMÁTICAS
BUCARAMANGA**

2010

**FACTORES QUE DETERMINAN LA VARIABILIDAD DEL FITOPLANCTON EN
CIÉNAGAS DE LA DEPRESIÓN MOMPOSINA**

YASMÍN PLATA DÍAZ

**Monografía presentada como requisito para obtener el título de Especialista
en Estadística**

Director

GERMAN MORENO ARENAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE MATEMÁTICAS

BUCARAMANGA

2010

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	10
1. MATERIALES Y MÉTODOS	12
1.1 ÁREA DE ESTUDIO	12
1.2 FASE DE CAMPO Y LABORATORIO	12
1.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	14
2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
2.1 VARIABILIDAD FÍSICA Y QUÍMICA	18
2.2 ESTRUCTURA DE LA COMUNIDAD	22
2.3 RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES	26
3. SÍNTESIS DE LA INFORMACIÓN	29
4. BIBLIOGRAFÍA	31
ANEXOS	35

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio. Se presenta todo el listado de los cuerpos de agua monitoreados (incluyendo los ríos que no hacen parte del alcance del presente trabajo).	16
Figura 2. Niveles medios mensuales multianuales (1991-2009) de la estación Guaymaral, Río Chicagua y ubicación de los periodos hidrológicos.	17
Figura 3. Análisis de componentes principales para las variables físicas y químicas (A) de 27 ciénagas estudiadas entre 2006-2010. (B) Posición de las muestras en el espacio dimensionado por los dos primeros componentes.	21
Figura 4. Fluctuaciones de la densidad neta del fitoplancton (Log_{10}) a nivel de Órdenes, en relación al periodo hidrológico en la zona de estudio	24
Figura 5. Valores promedio (\bar{x}) de la diversidad de Shannon, riqueza de especies, dominancia y número de individuo (\bar{I}): intervalo de confianza para la media al 95%.	25
Figura 6. Análisis de agrupamiento para las estaciones de estudio. Medida de similitud distancia euclidiana y algoritmo de amalgamiento método de Ward.	26
Figura 7. ACC del fitoplancton y variables físicas, químicas e hidrológicas en las ciénagas de estudio. (a) Biplot variables ambientales y muestras, (b) grafico de dispersión de las especies.	28

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A Análisis de Componentes Principales	35
ANEXO B Análisis de Correspondencia Canónica	36

RESUMEN

TITULO: FACTORES QUE DETERMINAN LA VARIABILIDAD DEL FITOPLANCTON EN CIÉNAGAS DE LA DEPRESIÓN MOMPOSINA*

AUTOR: YASMÍN PLATA DÍAZ**

PALABRAS CLAVE: Fitoplancton, ciénagas, pulso de inundación, contaminación doméstica, operación industrial.

DESCRIPCIÓN

Se describen los principales factores ambientales que estructuran la dinámica del fitoplancton de 27 ciénagas de la depresión momposina, ubicadas en el área de influencia del campo petrolero Cicuco. De acuerdo con los resultados, las variables que determinaron las variaciones en la fisicoquímica del agua están relacionadas en primera medida con la variabilidad ambiental, seguida de las variables asociadas con la operación industrial, específicamente en relación al contenido de cloruros así como la mineralización natural, relacionada con la conductividad y la alcalinidad. Los euglenoides fueron los de mayor ocurrencia a lo largo del estudio, particularmente en los periodos de aguas bajas, las cianobacterias aumentaron en densidad en aguas altas y las diatomeas pennadas proliferaron en los periodos de aguas en ascenso. Los más bajos promedios de diversidad y riqueza de especies, fueron registrados tanto en los sistemas con mayor intervención antrópica como en la ciénaga de referencia.

En general, la dinámica intrínseca de las ciénagas está más relacionada con los cambios abruptos generados por los pulsos de inundación que con el nivel de impacto antrópico, generando una dominancia de Oscillatoriales principalmente en los periodos de entrada de nutrientes. El modelo canónico realizado proporciona un muy buen ajuste en la exploración de los factores determinantes de la dinámica del fitoplancton del área de estudio.

Los resultados aquí obtenidos deben considerarse como una primera aproximación, ya que para la cuantificación de un modelo que resuma de manera específica el peso de las variables ambientales aquí consideradas, se deben recurrir un modelo estadístico longitudinal que a su vez incluya otros factores físicos como la influencia del río (caudal) y el tiempo de residencia del agua en cada uno de los sistemas.

* Monografía

** Facultad de Ciencias: Escuela de Matemáticas. Director. MORENO ARENAS, Germán

ABSTRACT

TITULO: DETERMINANT VARIABLES OF PHYTOPLANKTON IN MARSHES OF THE DEPRESIÓN MOMPOSINA ZONE*

AUTOR: YASMÍN PLATA DÍAZ**

Keywords: Phytoplankton, marshes, flood pulse, domestic and industrial pollution.

DESCRIPTION

It is described the main environmental factors related to phytoplankton dynamics of 27 marshes in the Depresión Momposina zone, located in the influence area of the oil field Cicuco. The results shows physicochemical variations in water were related with environmental variability, industrial activities due to chloride concentration, as well as natural mineralization related with conductivity and alkalinity. The euglenoids were predominated during low waters periods, cyanobacteria increased in high water levels and pennate diatoms in rinsing water. The mean lowest of diversity and richness were registered in anthropogenic impacted systems and the reference marsh.

The high density of Oscillatoriales and Nostocales in anthropogenic affected systems, like in marshes without industrial impact, corroborate that cyanobacterial dominance is not the result of perturbation level. It is the product of marshes own dynamic on the study area.

In general terms, the intrinsic marshes' dynamic was more related with suddenly changes caused by flood pulse than anthropogenic impact. It generated Oscillatoriales dominance during nutrient increase. The CCA model gives a good fit of main factors in phytoplankton dynamic.

The results, most be considered like a first approach of a model that summarizes specifically the variables weight considered in this study. It is recommended a longitudinal model statistic that includes others physical variables like flow and water retention time.

* Monograph

** Science Faculty: Math School. Director. MORENO ARENAS, Germán

INTRODUCCIÓN

Las ciénagas son cuerpos de agua localizados en depresiones poco profundas y conectadas al río mediante estrechos canales meandriformes. Estas se pueden formar por la acción inundante del río sobre las tierras bajas adyacentes y por la continua acción erosiva del río, la que da origen a brazos que se convierten en ciénagas y permanecen unidas al río por uno o más caños (Roldán, 1992).

Estos sistemas se encuentran localizados principalmente en las cuencas de los ríos Magdalena, bajo San Jorge, bajo Cauca, Atrato y Sinú y constituyen los elementos principales de los planos de inundación; se localizan en zonas de baja altitud (0-1000 m) y se caracterizan por presentar temperaturas propias de clima cálido (entre los 24°C y 32°C) y por su baja profundidad, que usualmente es menor de 5m (Ramírez & Viña, 1998). Desde el punto de vista ecológico, en los sistemas de llanura aluvial el pulso de inundación es que constituyen la fuerza principal que controla la estructura y dinámica de los organismos (Junk et al, 1989) y a su vez es este proceso el que favorece la pesca, la fauna, los bosques, además de procesos de sedimentación y purificación de los sistemas cenagosos (Junk, 1997).

El área de influencia del campo petrolero Cicuco se encuentra ubicado al sur del departamento de Bolívar, entre los Municipios de Cicuco, Talaigua Nuevo y Mompós (ICP, 2001a); dicha zona hace parte de la cuenca baja del Río Magdalena y está rodeada por el brazo de Loba al occidente y el brazo Mompós al oriente; por ser una zona de menor altura respecto al entorno, tiende a inundarse completamente en los periodos de aguas altas del río Magdalena, el cual recibe a esta altura la influencia de los ríos Cauca y San Jorge. Desde el año 2005 se emprendieron campañas de muestreo semestrales enmarcados en el Pacto de Cumplimiento de Ecopetrol ante el Ministerio del Medio Ambiente, en

donde se estableció el compromiso de evaluar durante 5 años el impacto generado por la industria en la zona.

En el presente trabajo se describe la dinámica del fitoplancton de 27 ciénagas de la depresión momposina, ubicadas en el área de influencia del campo Cicuco. La estructura de la comunidad (composición y diversidad) fue analizada en relación a las variables abióticas con el propósito de relacionar los principales factores relacionados con la ocurrencia de los órdenes taxonómicos más comunes del fitoplancton en las diferentes ciénagas. Dado que el área de estudio ha sido estudiada por varios años, un estudio de la diversidad del fitoplancton y los factores ambientales determinantes es una contribución importante para entender la dinámica de estos sistemas.

Considerando las características limnológicas de las ciénagas y la variación en la composición del fitoplancton a lo largo del estudio, la pregunta de investigación estuvo dirigida a establecer ¿Cuáles son los factores ambientales determinantes en la dinámica del fitoplancton de las ciénagas de la depresión momposina que se encuentran en el área de influencia del campo Cicuco?. Dicha pregunta conllevó a considerar la siguiente hipótesis: La dinámica del fitoplancton de las ciénagas del área de influencia del campo Cicuco, está más influenciada por la temporalidad ambiental que por la contaminación doméstica e industrial.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra ubicada en la depresión momposina, la cual hace referencia al conjunto de humedales conformados por la influencia de los ríos San Jorge, Cauca y Magdalena. Se localiza en la llanura Caribe del país y está rodeada por los municipios Hatillo de Loba, Margarita, San Fernando, Mompo, Talagua Nuevo y Cicuco; su gran uniformidad espacial está mediada por una fuerte dinámica fluvial y por la impredecibilidad del comportamiento hidrológico (García & Dister, 1990)

Los 27 cuerpos de agua estudiados se encuentran distribuidos en un área aproximada de 852 km² (Figura 1). Cada punto de muestreo fue codificado por un número de 1 a 34 antecedido por la letra E, seguido por el monitoreo (1 ó 2) y año de muestreo (6:2006; 7:2007; 8:2008; 9:2009; 10:2010). Gran parte de esta zona se encuentra rodeada no solo de infraestructura petrolera sino de asentamientos humanos, los cuales alcanzan una extensión de 25km² de área rural y 78 Km² de área urbana solo para el municipio de Cicuco. Del total de los sistemas estudiados, 26 de ellos se encuentran distribuidos entre la zona noreste y sureste del campo petrolero y solo uno (E31) se encuentra alejado de su área de influencia, por lo cual es considerado como el sitio de referencia.

1.2 FASE DE CAMPO Y LABORATORIO

Desde el mes de junio de 2005 se emprendieron campañas de muestreo semestrales, con el fin de abarcar dos momentos climáticos del año: aguas altas y aguas bajas (Figura 2), sin embargo dada la variabilidad ambiental generada por el fenómeno de “La Niña”, varias de las campañas semestrales fueron realizadas

dentro de periodos hidrológicos similares (aguas altas y aguas en ascenso). Las estaciones fueron escogidas teniendo en cuenta la caracterización de línea base (ICP, 2001a), como respuesta al requerimiento por parte del Ministerio del Medio Ambiente (ICP, 2001b).

Para todas los cuerpos de agua se escogió un punto de muestreo en la zona de aguas abiertas; sin embargo las estaciones E1, E2 y E3 hacen parte de un mismo sistema (Ciénaga El Mechón), así como E4, E5 y E6, que conforman la ciénaga La Borda. Ambos sistemas son los que han presentado mayor intervención antrópica. El primero (E1) de ellos por operaciones industriales en los años 60 de la petrolera Colombian Petroleum Company, mientras que el sistema de La Borda fue alterada su comunicación con su caño principal por construcción de una vía (ICP, 2001c).

En todos los cuerpos de agua, las variables *in situ* (temperatura y pH) fueron tomadas sub-superficialmente (0,1m profundidad) en la zona de aguas abiertas de todos los sistemas, mediante una sonda multiparámetro YSI-556; la transparencia fue medida mediante el disco Sechhi y la profundidad con una ecosonda Wildco (Sonar Gun 126-A10); el oxígeno disuelto se cuantificó mediante titulación con kit Merck. Para la toma y preservación de las muestras se siguieron las especificaciones establecidas en el método AWWA 1060 (APHA, 2005) para todas las variables físicas y químicas, las cuales fueron analizadas en los laboratorios de aguas y suelos, cromatografía y espectroscopía del Instituto Colombiano del Petróleo. Para el análisis bacteriológico (coliformes fecales) e hidrobiológico (fitoplancton), las muestras fueron analizadas en el laboratorio de biotecnología del mismo instituto.

En cada estación se tomaron muestras para el análisis del fitoplancton, filtrando 20 litros en la superficie de la columna del agua con una red de plancton de 20 μ de ojo de malla, posteriormente se depositaron en frascos de boca ancha de sello hermético y fijadas inmediatamente con solución Transeau en proporción 1:1. El

conteo fue realizado en cámara Palmer-Maloney abarcando toda la cámara en un microscopio Nikon Eclipse E-100. En todos los casos tanto los organismos filamentosos como coloniales fueron contados como un individuo. Las densidades fueron registradas como abundancia relativa.

Para la determinación taxonómica se tuvieron en cuenta claves específicas para cada grupo; entre otros se siguieron los trabajos de Komárek & Anagnostidis (1999, 2005), Comas (1996), Tell & Conforti (1986), Cox (1996) Krammer & Lange-bertalot (1991a, b), Wehr et al (2002).

1.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

En todos los análisis fueron omitidos los registros del año 2005 dada la escasa información fisicoquímica colectada en la primera campaña de muestreo.

Con un Análisis de Componentes Principales (ACP) se establecieron los patrones físicos y químicos de los cuerpos de agua; en el caso que dos variables presentaran alta correlación una de ellas fue omitida en este análisis. Mediante corridas sucesivas y exclusión de variables con baja correlación con los componentes, se fraccionó la varianza hasta alcanzar el máximo porcentaje acumulado en los tres primeros componentes con el software Statistica v. 8.0 (StatSoft, 2007). Para el desarrollo de este análisis no se procedió a la transformación de las variables dado que la técnica no requiere el supuesto de normalidad (Díaz, 2002), ni se usó rotación de los ejes.

El análisis de la variabilidad en la estructura de la comunidad, se realizó mediante los índices de diversidad de Shannon-Wiener, Riqueza de especies (número de especies), Dominancia de Simpson y Equidad.

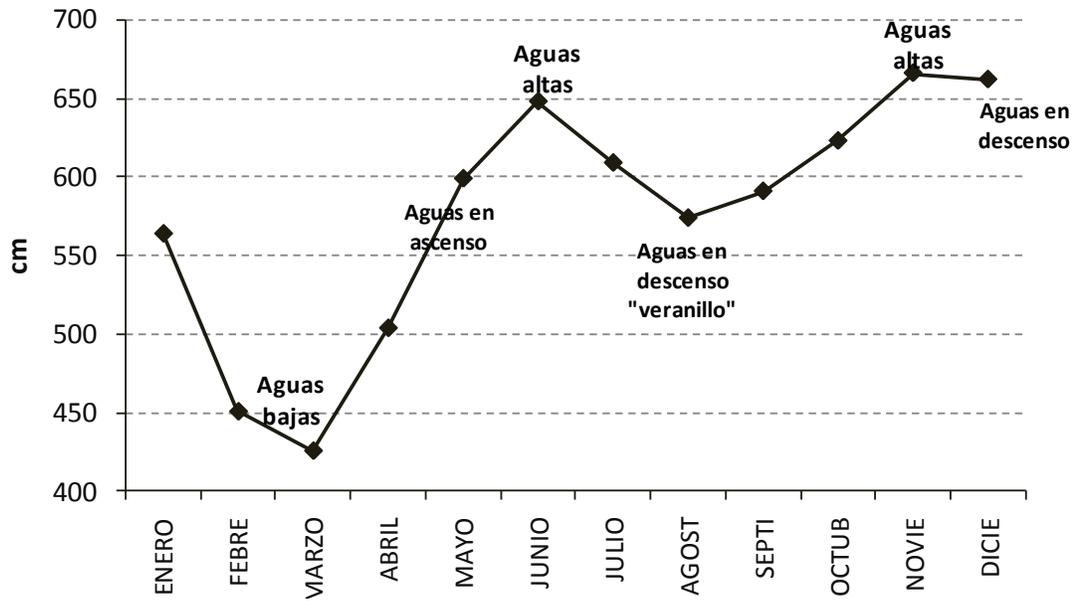
La relación entre taxones-ambiente fue establecida mediante un Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) (Jogman et al, 1995), mediante el Software Canoco v. 4.5 (ter Braak & Smilauer, 1997). Dicha técnica es apropiada cuando las especies muestran patrones de distribución unimodal a gradientes ambientales (ter Braak & Prentice, 1988), a diferencia del Análisis de Correlación Canónica, la cual asume patrones lineales (Palmer, 2010). Sin embargo, el ACC es una técnica eficiente aún cuando no se cumple el supuesto de respuesta unimodal (Palmer, 1993).

Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio. Se presenta todo el listado de los cuerpos de agua monitoreados (incluyendo los ríos que no hacen parte del alcance del presente trabajo). Los números corresponden a los mismos citados en el texto sin la letra “E”. El círculo resaltado en rojo es la ubicación de la ciénaga de referencia.



Fuente: Autor del proyecto

Figura 2. Niveles medios mensuales multianuales (1991-2009) de la estación Guaymaral, Río Chicagua y ubicación de los periodos hidrológicos.



Fuente: Autor del proyecto

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 VARIABILIDAD FÍSICA Y QUÍMICA

Los máximos valores de conductividad (COND), dureza (DUR), alcalinidad (ALCA) y cloruros (CL) fueron registrados en la ciénaga E1, particularmente en los años 2009 y 2010. En relación a los nutrientes, las concentraciones de fósforo total (PT) fueron muy bajas para la mayor parte de los sitios (0,01-0,49 mgL⁻¹) y los máximos valores de nitratos (NO₃) fueron registrados en E5 y E6 en el 2007. El nitrógeno orgánico (NKJ) mostró un amplio rango (0,1-18,3 mgL⁻¹) cuyo valor máximo fue registrado en el sitio E26 en el 2007. Los máximos valores de oxígeno disuelto (OD=12,5mgL⁻¹) y pH (9,17) fueron observados en E6 en el 2006.

El rango de temperatura del agua de las ciénagas varió entre 22,3-35,8°C. De acuerdo con lo observado, conductividad, cloruros, nitritos (NO₂) y coliformes fecales (ColiF), en su orden, presentaron la mayor variación (Tabla 1). A su vez, dentro los nutrientes se destaca la baja variabilidad del fósforo total (PT) (CV=0,76), así como el amonio (NH₃) (CV=0,92). En relación a las variables asociadas a la operación industrial la demanda química de oxígeno (DQO) presentó un menor rango de variación (CV=0,44) que los hidrocarburos totales (HCT) (CV=0,93); pH, temperatura y oxígeno disuelto también presentaron rangos pequeños de variación. Del conjunto de variables solo el pH (K-S=0,59; $p>0,05$) y el oxígeno disuelto (K-S=0,47, $p>0,05$) presentaron distribución normal.

Según la prueba de Kruskal-Wallis la DQO (H=54,005 $p =,0010$), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) (H=38,64; $p =,0528$), los cloruros (H=82,87; $p=,0000$) y la conductividad (H=59,16; $p=,0002$) presentaron diferencias significativas a nivel espacial, mientras que entre muestreos (“aguas bajas” y “aguas altas”) solo los nutrientes, conductividad, dureza y alcalinidad presentaron

diferencias importantes ($p < 0,05$), posiblemente como resultado de los periodos de muestreo escogidos en los últimos años (2008-2010), los cuales sí coincidieron con periodos hidrológicos contrastantes.

La conductividad estuvo altamente relacionada y de manera directa con la dureza ($r^2=0,990$, $p < 0,001$), DQO ($r^2=0,515$, $p < 0,001$) y cloruros ($r^2=0,993$, $p < 0,001$); de los nutrientes solo los nitratos están medianamente relacionados con los sólidos suspendidos ($r^2=0,399$, $p < 0,001$) y el fósforo total ($r^2=0,366$, $p < 0,001$). El pH y el oxígeno disuelto presentaron una correlación importante ($r^2=0,607$, $p < 0,001$), posiblemente como resultado de los más altos valores registrados en las estaciones E4, E5 y E6 en el muestreo 2006, en donde también se registró una alta densidad de cianobacterias.

El análisis de componentes principales (ACP) realizado para las variables físicas y químicas explicó el 51.10% utilizando los tres primeros componentes (ANEXO A). La primera tendencia de variación está determinada principalmente por el oxígeno disuelto, el pH y la profundidad; el segundo componente presenta una alta correlación con la conductividad y cloruros, mientras que en el tercer componente la alcalinidad es la variable de mayor peso (Figura 3 a).

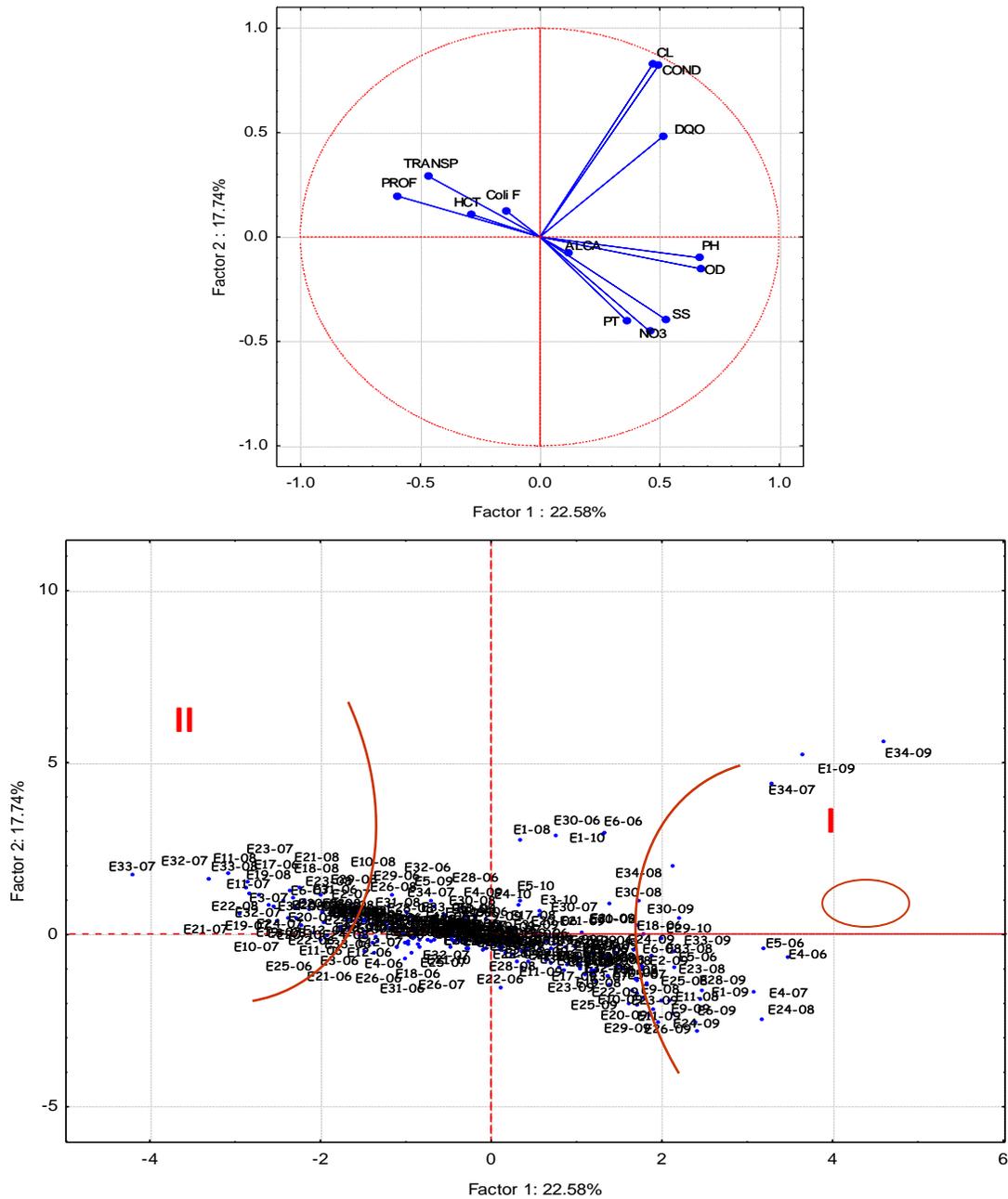
Tabla 1. Valores promedio, mínimos, máximos, desviación típica y coeficiente de variación para las variables físicas y químicas. Ver en el texto la descripción de las siglas.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.	C.V
COND ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	239	128.5	5640	258,45	427,79	1,66
DUR (mg l^{-1})	239	54.47	1076	89,52	78,94	0,88
ALCA (mg l^{-1})	239	25.7	121	63,66	11,69	0,18
PH	239	4.47	9,17	7,27	0,50	0,07
TEMP ($^{\circ}\text{C}$)	239	22.3	35,8	30,32	2,46	0,08
HCT (mg l^{-1})	239	1.07	15,58	1,74	1,63	0,93
NO3 (mg l^{-1})	239	0.01	5,04	0,57	0,69	1,21
NO2 (mg l^{-1})	239	0.01	2,25	0,09	0,30	3,32
NH3 (mg l^{-1})	239	0.09	5,04	0,65	0,59	0,92
NKJ (mg l^{-1})	239	0.1	18,3	1,28	1,37	1,07
PT (mg l^{-1})	239	0.01	0,49	0,11	0,09	0,76
OD (mg l^{-1})	239	0.7	12,5	4,67	1,81	0,39
CL (mg l^{-1})	239	0.5	1856	27,38	139,36	5,09
SS (mg l^{-1})	239	0.4	715	44,38	64,67	1,46
DBO ($\text{mgO}_2\text{l}^{-1}$)	239	1.81	7,87	2,27	0,85	0,37
DQO ($\text{mgO}_2\text{l}^{-1}$)	239	7.08	80,2	22,43	9,80	0,44
ColiF (UFC/100ml)	239	0.00	21000	916,06	2674,04	2,92
PROF (cm)	239	16.00	725	215,64	178,24	0,82
TRANS (cm)	239	2.00	260	36,50	35,14	0,96

Fuente: Autor del proyecto

El espacio dimensionado por los dos primeros componentes (Figura 3b) reúne principalmente en el Grupo I los primeros muestreos realizados en los años 2008 y 2009, los cuales corresponden a muestreos que abarcaron los dos periodos hidrológicos (aguas bajas y aguas altas). Se destacan en este grupo (círculo) las estaciones E5 y E6 en donde se registraron los máximos valores históricos de pH y oxígeno disuelto. En el Grupo II, se observa la mayor parte de los muestreos realizados en el 2006 y 2007, todos realizados en aguas altas y en ascenso.

Figura 3. Análisis de componentes principales para las variables físicas y químicas (A) de 27 ciénagas estudiadas entre 2006-2010. (B) Posición de las muestras en el espacio dimensionado por los dos primeros componentes. El círculo rojo destaca las dos estaciones con los valores más altos de pH registrados



Fuente: Autor del proyecto

En relación a lo anterior, las variables que determinan las variaciones en la fisicoquímica del agua de los sistemas cenagosos están relacionadas en primera medida con la variabilidad ambiental, específicamente con los procesos asociados al régimen hidrológico, es decir cambios en el nivel de agua (profundidad) que consecuentemente determinan cambios en la química (pH, oxígeno), seguida de las variables asociadas con la operación industrial, específicamente en relación al contenido de cloruros así como la mineralización natural (conductividad) de los sistemas; y finalmente con la variabilidad ambiental determinada por la alcalinidad.

2.2 ESTRUCTURA DE LA COMUNIDAD

En general el Orden Euglenales fue uno de los grupos taxonómicos con mayor ocurrencia a lo largo del estudio. Como se observa en la Figura 4, específicamente en los años 2006 y 2007 se observa una tendencia muy similar en la composición entre los muestreos 1 y 2, dada la similaridad de condiciones en el régimen hidrológico; en dichos años, euglenoideos, cianobacterias y algas verdes, fueron en ese orden los grupos con mayor densidad.

Específicamente en los periodos de aguas bajas el orden Euglenales fue predominante en la estación seca, periodo en donde la descomposición de macrófitas genera una alta disponibilidad de materia orgánica, mientras que las cianobacterias (Chroococcales y Oscillatoriales) aumentaron en densidad en aguas altas.

A partir del año 2008 se hacen más evidentes los cambios relacionados con la temporalidad. Se destaca la proliferación de diatomeas pennadas (Pennales) en la mayoría de los periodos de aguas en ascenso, dado como resultado de su capacidad de tolerar ambientes turbios y ricos en nutrientes (Reynolds et al, 2002), características típicas de periodos con grandes volúmenes de aguas, producto de la entrada de la corriente principal del río.

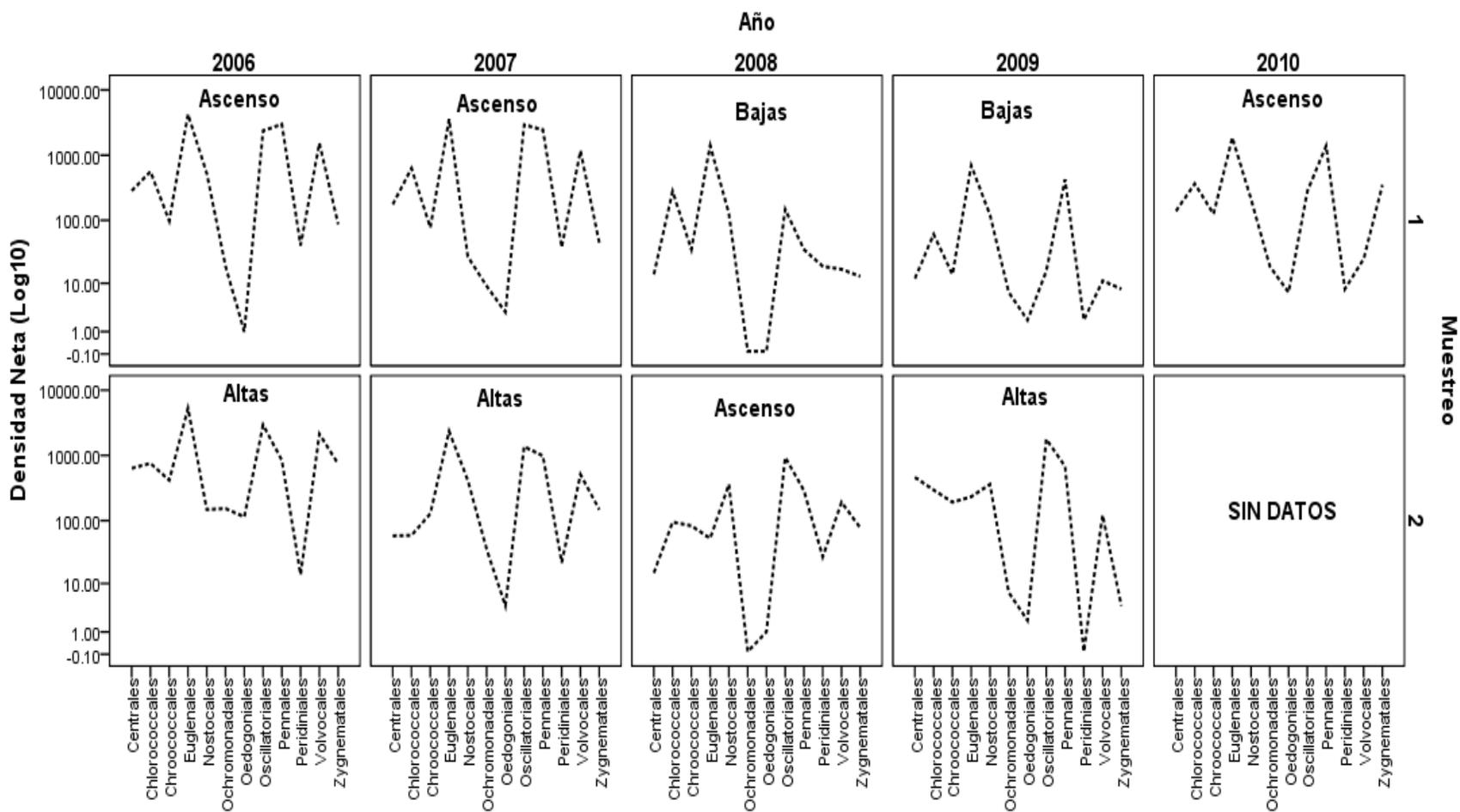
La diversidad de especies presentó una alta variación entre las estaciones de estudio (Figura 5); los valores promedio más altos fueron registrados en las estaciones E26, E30 y E33, la primera de ellas ubicada en la zona sur-este que recibe de manera directa los aportes del caño Barranco, mientras que las dos restantes se ubican hacia el noreste y son conocidos como sectores de buena pesca por los pobladores de la zona de estudio. Se destacan los sitios E4, E5, E6, E31 y E34 como los sistemas con el menor promedio de diversidad y riqueza.

Entre las estaciones con mayor promedio de Dominancia se encuentra E2, sector central de la ciénaga El Mechón la cual presenta la mayor variación hidrológica, dado que en aguas bajas desaparece completamente dejando aislados los sectores E1 y E2 de la misma ciénaga, sirviendo como camino veredal y carretable dentro de la zona. En este punto han sido registradas altas densidades de Oscillatoriales (*Planktolyngbya*, *Jaaginema*, *Oscillatoria*), así como de euglenoideos (*Trachelomonas*), lo cual está relacionado con disponibilidad de materia orgánica dada la gran cantidad de vegetación en sus orillas así como vegetación terrestre, que al inundarse en aguas altas no solo proporcionan nutrientes si no un importante aporte de sólidos en suspensión.

Aunque E31 corresponde al sitio de referencia también presentó un promedio alto de la dominancia, relacionado principalmente con el predominio de Nostocales, específicamente de *Cylindrospermopsis raciborskii* para la mayoría de los periodos de muestreo, así como Oscillatoriales (*Planktothrix*, *Leptolyngbya*).

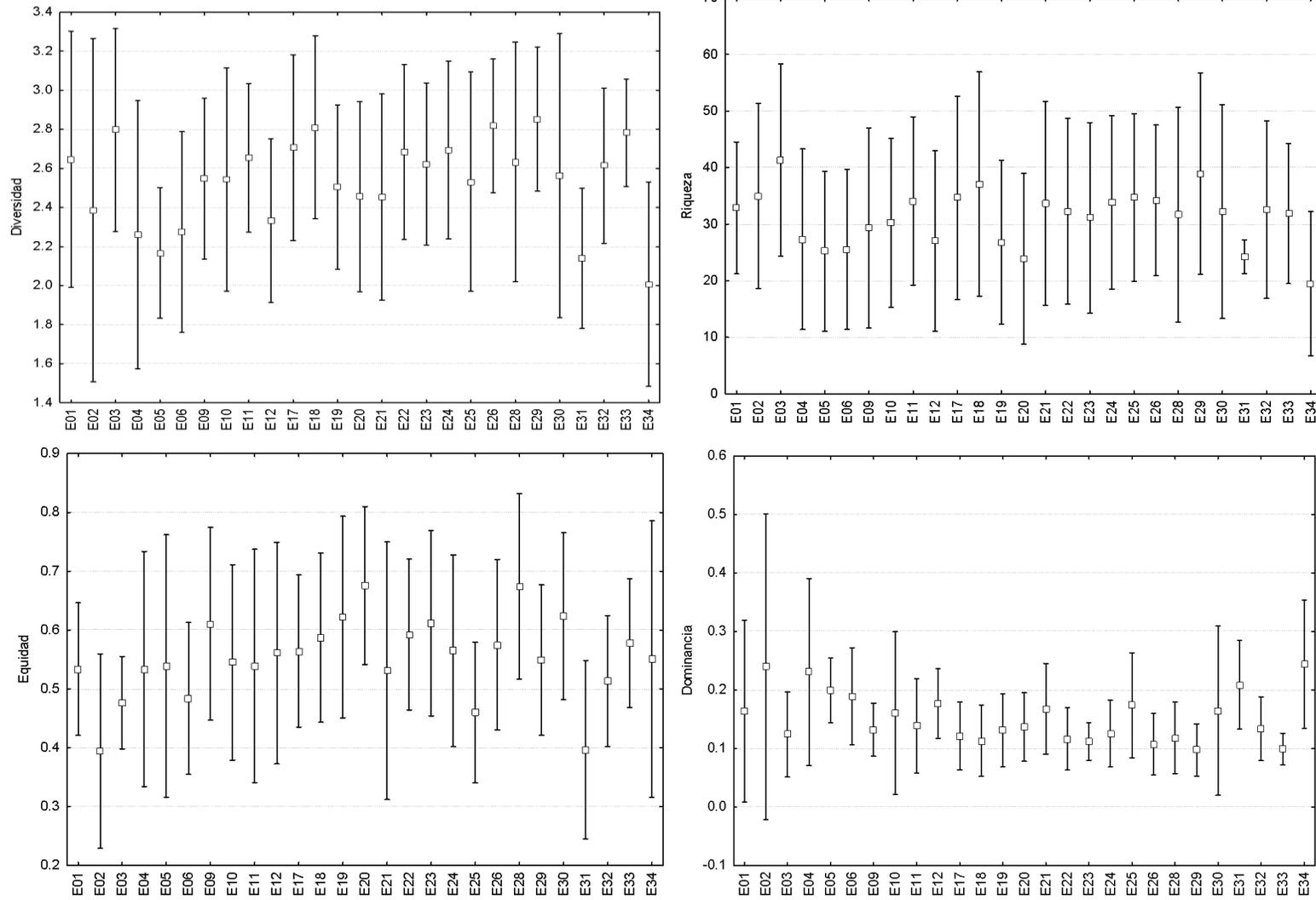
Dada la semejanza del comportamiento de los índices entre la ciénaga de referencia con las ciénagas con mayor impacto antrópico, se procedió a cuantificar dicha similitud mediante un análisis de agrupamiento tomando el promedio de la densidad neta de cada uno de los Órdenes para cada muestreo. Los resultados confirman dicho supuesto (Figura 6).

Figura 4. Fluctuaciones de la densidad neta del fitoplancton (Log_{10}) a nivel de Órdenes, en relación al periodo hidrológico en la zona de estudio



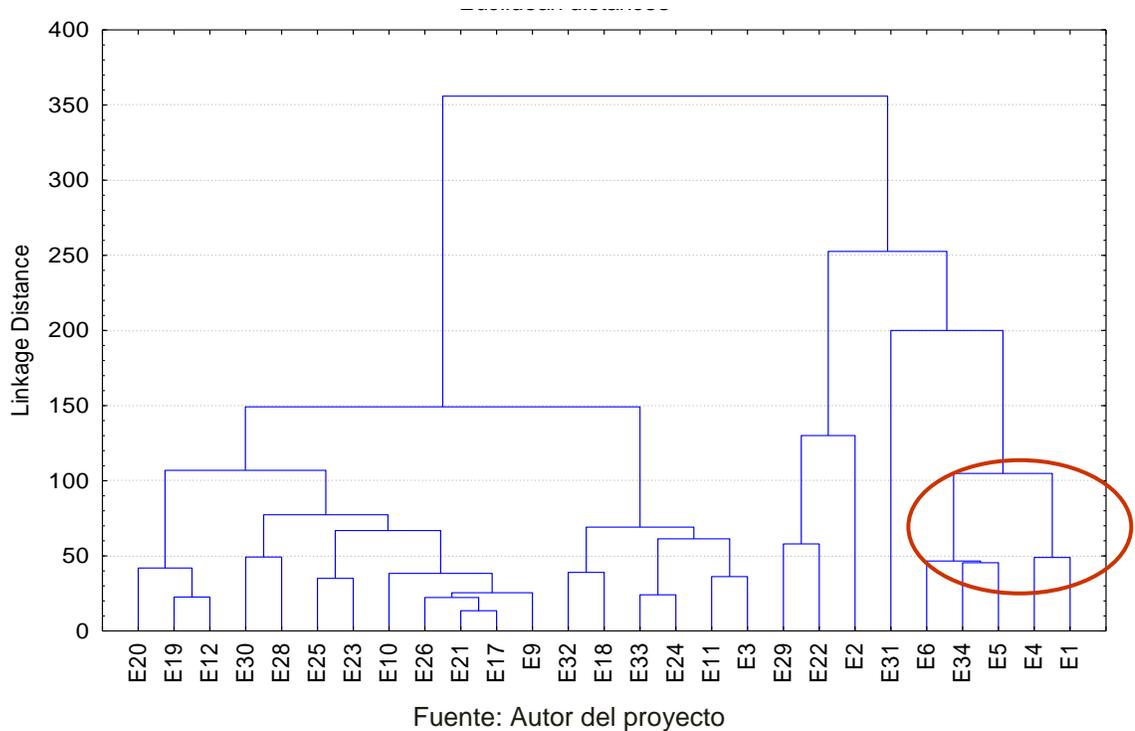
Fuente: Autor del proyecto

Figura 5. Valores promedio (\square) de la diversidad de Shannon, riqueza de especies, dominancia y número de individuos. (\square): intervalo de confianza para la media al 95%.



Fuente: Autor del proyecto

Figura 6. Análisis de agrupamiento para las estaciones de estudio. Medida de similitud distancia euclidiana y algoritmo de amalgamiento método de Ward. Se destaca en rojo el grupo conformado por las estaciones con mayor impacto antrópico junto con la ciénaga de referencia.



2.3 RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES

Las variables más significativas en el ACP fueron el punto de partida para realizar el ACC (ANEXO B). Mediante el procedimiento de *forward selection* las variables ambientales fueron secuencialmente incluidas en el modelo y a través del test de permutaciones de Monte Carlo (2000 permutaciones) se determinó la significancia estadística ($p < 0.05$) de cada variable seleccionada. En todas las corridas, los hidrocarburos totales y la transparencia del agua no aportaron información al modelo ($\lambda = 0$).

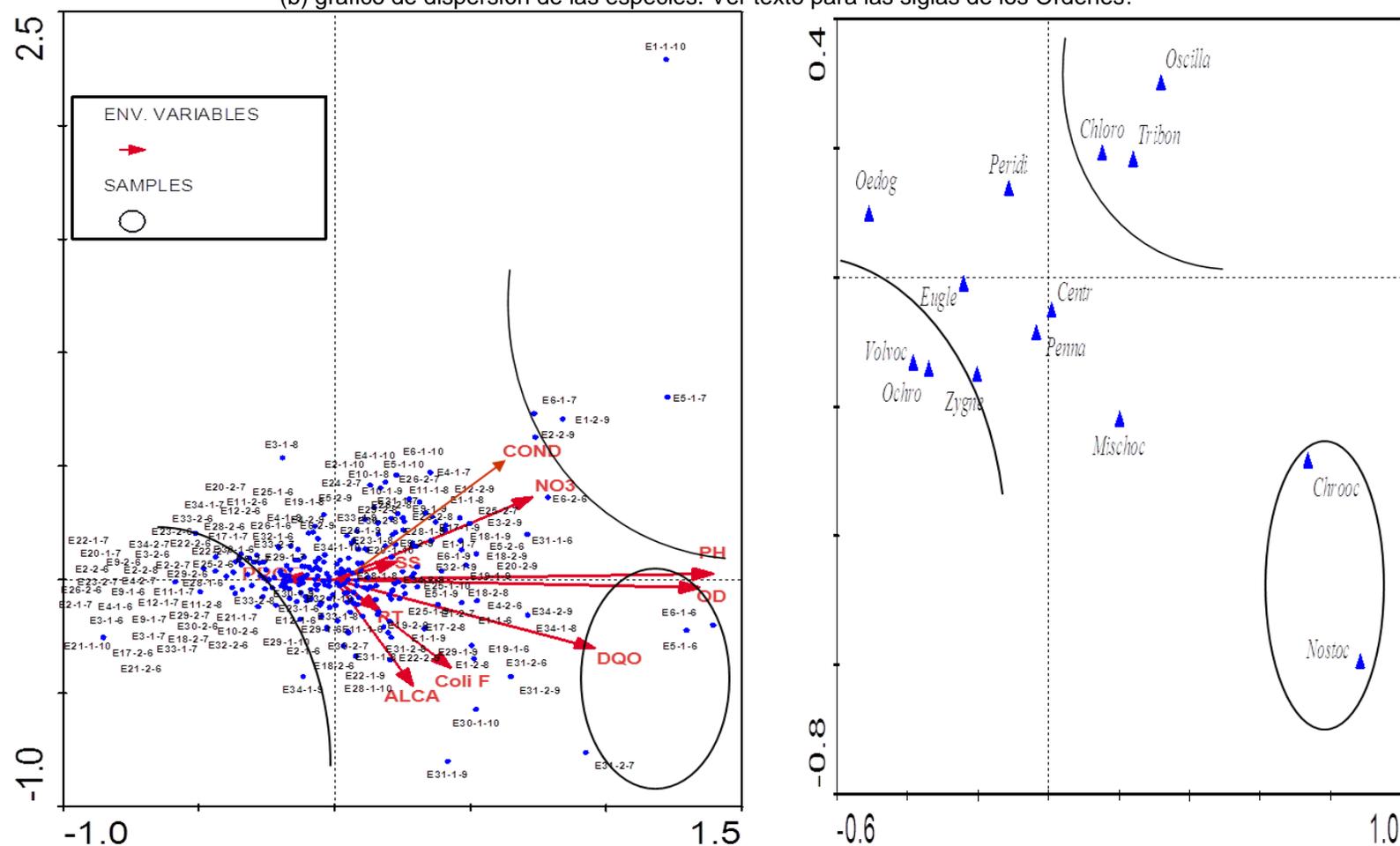
De igual manera se excluyeron los Órdenes cuya ocurrencia fuese menor del 10% del total de las muestras, dejando por fuera Chaetophorales, Cladophorales,

Gymnodiniales, Tetrasporales y Ulotrichales, que para el presente estudio son considerados como taxones raros o poco comunes en las ciénagas estudiadas.

El análisis mostró que la relación entre las especies y las variables ambientales explicó un 79.8% en los tres primeros ejes y un 10,3% de la varianza de los datos de las especies. Las variables que más aportaron al modelo en términos de la varianza explicada fueron oxígeno disuelto (30,43%) y coliformes fecales (13.04%). Las variables ambientales que presentaron una alta correlación con el primer eje canónico fueron el pH, oxígeno disuelto y DQO; en el segundo, la conductividad y negativamente la alcalinidad, mientras que en el tercero fueron los coliformes fecales y los sólidos suspendidos.

En la Figura 7 se presenta la ordenación de las especies y las muestras con las variables ambientales. Aunque la profundidad de las ciénagas no alcanzó una alta correlación con los tres ejes canónicos, en general se puede apreciar una separación en función de periodicidad en los muestreos reuniendo hacia el cuadrante izquierdo los muestreos que coincidieron con los mayores volúmenes en las ciénagas (2006-2007) con predominio de los taxa más comunes como Euglenales (Eugle), Volvocales (Volvo) y Zygnematales (Zygne), mientras que dentro del cuadrante derecho se encuentran principalmente los muestreos de 2008-2009 en donde se abarcaron tanto el periodo de aguas altas como aguas bajas. Sin embargo, en el eje 1 las variables más determinantes están relacionadas con el componente ambiental y la operación industrial (pH y DQO), agrupando específicamente las estaciones en donde se han registrado blooms de cianobacterias, específicamente Chroococcales y Nostocales, reuniendo diferentes periodos de muestreo de las estaciones E31, E34, E5, E6. De igual manera, los taxones separados por el gradiente generado por la conductividad (positivamente relacionada con el eje 2), reúne las estaciones con predominio de Oscillatoriales, Chlorococcales y Tribonematales, este último taxón particularmente predominante en 2010 en las estaciones E4, E5.

Figura 7. ACC del fitoplancton y variables físicas, químicas e hidrológicas en las ciénagas de estudio. (a) Biplot variables ambientales y muestras, (b) grafico de dispersión de las especies. Ver texto para las siglas de los Órdenes.



Fuente: Autor del proyecto

3. SÍNTESIS DE LA INFORMACIÓN

De acuerdo con el ACC, existe un mayor peso de las variables ambientales que las relacionadas con la operación industrial (DQO, Hidrocarburos totales) y la carga doméstica (coliformes fecales), lo cual se corrobora con la alta similitud del sitio de referencia (E31) con las estaciones con mayor impacto antrópico (E1, E2, E4, E5, E6) en todos los análisis. Esto sugiere que la dinámica intrínseca de las ciénagas podría estar más relacionada con los cambios abruptos generados por los pulsos de inundación que con el nivel de impacto antrópico, generando una dominancia de Oscillatoriales principalmente en los periodos de entrada de nutrientes (aguas altas y en ascenso) y alta densidad de Euglenales en aguas bajas.

Aunque todas las especies algales poseen un rango y un óptimo para su desarrollo, es bien conocido que las cianobacterias dominan en ambientes muy cálidos; su ocurrencia está determinada entre muchas características por su pigmentación y flexibilidad metabólica, lo cual les permite tolerar condiciones variables como la concentración de nutrientes y baja irradiancia (DeNicola, 1996; Dokulil & Teubner 2000); de ahí su predominancia en los sistemas cenagosos no solo con influencia antrópica si no en sistemas sujetos a variaciones drásticas en su hidrología.

Si bien la dominancia de cianobacterias ha sido relacionada con problemas de salud ecológica en reservorios y lagos naturales, dado que dicho fenómeno es asociado con eutroficación, algunos estudios han demostrado que dicha condición constituye un estado estable de la comunidad algal en lagos turbios y poco profundos (Scheffer *et al.*, 1997). Por lo tanto, las altas densidades de cianobacterias, en especial de Oscillatoriales y Nostocales, no son el resultado del nivel de perturbación antrópica si no de la dinámica propia de los sistemas cenagosos.

En conclusión, el modelo canónico realizado proporciona un muy buen ajuste en la exploración de los factores determinantes de la dinámica del fitoplancton de las ciénagas del área de influencia del campo Cicuco. Sin embargo, los resultados aquí obtenidos deben considerarse como una primera aproximación, ya que para la cuantificación de un modelo que resuma de manera específica el peso de las variables ambientales aquí consideradas, se deben recurrir un modelo estadístico longitudinal que a su vez incluya otros factores físicos como la influencia del río (caudal) y el tiempo de residencia del agua en cada uno de los sistemas.

4. BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). 2005. Standard methods for examination of water and wastewater. 21st edition. Amer. Pub. Heal. Assoc., Washington. 1536 p.

COMAS, A. 1996. Las Chlorococcales dulciacuícolas de Cuba. J. Cramer, Stuttgart.

COX, E. 1996. Identification of freshwater diatoms from live material. Chapman & Hall, New York.

DÍAZ-MONROY, L.G. 2002. Estadística multivariada: Inferencia y métodos. Ed. Panamericana. 529 Pp.

DENICOLA, D.M. 1996. Periphyton responses to temperatura at difference ecological levels. En: R.J.Stevenson, M.L. Botwell & R.L.Lowe (Eds). Algal Ecology, Freshwater Benthic Ecosystems. Academic Press, pp.149-181. USA.

DOKULIL, M., TEUBNER, K. 2000. Cyanobacterial dominance in lakes. Hydrobiologia. 48 : 1 -12 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETROLEO (ICP). 2001a. Informe de Elementos Probatorios en Cumplimiento del Auto 666/2000 del Ministerio del Medio Ambiente. Capítulo Dos: Definición Área de Influencia.

INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETROLEO (ICP). 2001b. Informe de Avance. Estudio de la Dinámica Hídrica Área de Influencia Campos Cicuco Boquete. Bucaramanga.

ICP, 2001c. Estudio de la dinámica hídrica y monitoreo de sedimentos de los humedales del área de influencia del campo cicuco - boquete caracterización ambiental. Bucaramanga.

JONGMAN, R.H., C.J.F. ter BRAAK, O.F. Van TONGEREN. 1995. Data analysis in community and landscape ecology. Pudoc, Wageningen, The Netherlands.

JUNK, W. J. , P. B. BAYLEY & R. E. SPARKS. 1989. The flood pulse concept in river- floodplain systems. In D.P. Dodge. proceedings of International Large River Symposium. Can. Spec. Public. Fish. Aquatic. Sci. 106: 110-127.

JUNK, W. J. 1.997.The central Amazon Floodplain. Ecology of a pulsing system 3-521Springer.

GARCÍA-LOZANO, L. C. & E. DISTER. 1990. La planicie de inundación del medio-bajo Magdalena: Restauración y conservación de hábitats. Interciencia Nov-Dic 15 (6): 396-410.

KOMÁREK, J. & K. ANAGNOSTIDIS, 1999. Sübwasserflora von Mitteleuropa Band 19/1. Cyanoprokaryota. 1. Teil: Chroococcales. H. Ettl, G. Gärtner, H. Heynig & D. Mollenhauer eds. Berlin.

KOMÁREK J. & ANAGNOSTIDIS K. 2005. Cyanoprokaryota 2. Teil/ 2nd Part: Oscillatoriales. - In: BÜDEL B., KRIENITZ L., GÄRTNER G. & SCHAGERL M. (eds): Süßwasserflora von Mitteleuropa 19/2, Elsevier/Spektrum, Heidelberg, 759 pp.

KRAMMER, K. AND LANGE-BERTALOT, H. 1991a. Bacillariophyceae. 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. in Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H. and

Mollenhauer, D. (eds) Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/3. Gustav Fischer Verlag: Stuttgart, Jena. 576 pp.

KRAMMER, K. AND LANGE-BERTALOT, H. 1991b. Bacillariophyceae. 4. Teil: Achnantheaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema, Gesamtliteraturverzeichnis Teil 1-4. in Ettl, H., Gärtner, G., Gerloff, J., Heynig, H. and Mollenhauer, D. (eds) Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/4. Gustav Fischer Verlag: Stuttgart, Jena. 437 pp.

PALMER, M.W. 1993. Putting things in ever better order: The advantages of canonical correspondence analysis. *Ecology* 74(8) :2215-2230.

PALMER, M.W. 2010. Ordination methods for ecologist (Consultado : 1° Octubre, 2010 <http://www.carex.osuunx.uss.okstate.edu/>)

RAMIREZ, A. & G. VIÑA. 1998. Limnología Colombiana. Aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis. BP Exploration Company (Colombia) LTD. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

REYNOLDS, C.S, V. HUSZAR, C. KRUK, N. FLORES & S. MELO. 2002. Toward a functional classification of freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research* 24: 417- 428.

ROLDÁN, G. 1992. Fundamentos de Limnología Neotropical. Ed. Universidad de Antioquia. Medellín.

SCHEFFER, M., S. RINALDI, A. GRAGNANI, L. R. MUR & E. H. VAN NES. 1997. On the dominance of filamentous cyanobacteria in shallow, turbid lakes. *Ecology* 78(1):272-282.

STATSOFT, INC. (2007). STATISTICA (data analysis software system), version 8.0. www.statsoft.com.

TELL, G. & V. CONFORTI. 1986. Euglenophyta pigmentados de la Argentina. *Bibl. Phycol.* 75: 301 p

TER BRAAK, C. J. F., AND I. C. PRENTICE. 1988. A theory of gradient analysis. *Adv. Ecol. Res.* 18:271-313.

TER BRAAK C. J. F & P. SMILAUER. 1997. Canoco for windows Version 4.51. Biometrics-Plant research international. Wageningen, The Netherlands.

WEHR, J.D., R. G. SHEATH & J. H. THORP. 2002. *Freshwater Algae of North America: Ecology and classification* . Academic Press. 917 pp.

ANEXO A

Análisis de Componentes Principales

Eigenvalores y porcentaje acumulado de la varianza para cada componente

Value number	Eigenvalue	% Total variance	Cumulative Eigenvalue	Cumulative %
1	2.935514	22.58088	2.93551	22.5809
2	2.306108	17.73929	5.24162	40.3202
3	1.402025	10.78481	6.64365	51.1050
4	1.053149	8.10114	7.69680	59.2061
5	1.036310	7.97162	8.73311	67.1777
6	0.898751	6.91347	9.63186	74.0912
7	0.807011	6.20778	10.43887	80.2990
8	0.770421	5.92632	11.20929	86.2253
9	0.638553	4.91195	11.84784	91.1373
10	0.543799	4.18307	12.39164	95.3203
11	0.341842	2.62956	12.73348	97.9499
12	0.258482	1.98832	12.99197	99.9382
13	0.008033	0.06179	13.00000	100.0000

Correlación de las variables con los factores (factor loadings).

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6	Factor 7	Factor 8	Factor 9	Fact.10
COND	0.495133	0.821124	0.084198	0.053461	0.206980	0.010163	-0.044802	-0.068128	-0.029132	0.037615
ALCA	0.119826	-0.077498	-0.776054	0.372473	-0.227822	0.213474	0.260084	-0.068635	-0.054816	-0.096482
PH	0.664988	-0.099542	0.018837	0.024521	-0.563168	-0.016471	-0.214688	0.041484	-0.217459	-0.014177
HCT	-0.286328	0.108466	-0.203209	0.454147	0.011082	-0.776329	-0.217329	0.081131	-0.039594	-0.008202
NO3	0.458030	-0.452017	-0.319511	-0.054158	0.268621	0.040459	-0.200254	0.257286	-0.019441	0.546167
PT	0.364003	-0.402948	-0.217620	0.064052	0.403439	0.108009	-0.415856	-0.447201	-0.195552	-0.238981
OD	0.671665	-0.152717	0.359318	-0.030684	-0.439603	-0.085965	-0.167980	-0.017158	-0.010777	-0.013970
CL	0.471089	0.828170	0.088901	0.030609	0.223486	0.005520	-0.067422	-0.052754	-0.042054	0.042237
SS	0.528236	-0.397401	-0.056355	-0.326382	0.249972	-0.221476	0.022577	0.317753	0.270098	-0.356582
DQO	0.512817	0.481159	-0.511060	-0.125811	-0.060618	0.004734	0.088505	0.255938	0.056156	-0.109985
Coli F	-0.141304	0.125389	-0.367499	-0.707956	-0.159799	-0.343383	0.090441	-0.389102	-0.079099	0.122923
PROF	-0.597473	0.196473	-0.084578	-0.259912	0.015980	0.134729	-0.254741	0.406637	-0.495665	-0.145071
TRANSP	-0.466370	0.290762	-0.240834	-0.068411	-0.232847	0.210373	-0.562869	-0.016702	0.466148	-0.003830

ANEXO B

Análisis de Correspondencia Canónica

Resumen del Modelo

	Eje 1	Eje 2	Eje 3
Eigenvalues	0,105	0,043	0,033
Correlación Especies-Var.Ambientales	0,562	0,449	0,393
% Acumulado de la Varianza			
<i>de los datos de especies</i>	6	8,5	10,3
<i>de la relación especies-var.ambientales</i>	46,4	65,2	79,8

Correlación intragrupos para las variables ambientales con todos los ejes canónicos

	Ejes Canónicos Variables Ambientales			Ejes Canónicos Especies		
	Env ax1	Env ax2	Env ax3	Spec ax1	Spec ax2	Spec ax3
Cond	0,36	0,47	-0,01	0,20	0,21	0,00
Alca	0,17	-0,43	-0,08	0,09	-0,19	-0,03
pH	0,81	0,02	0,06	0,45	0,01	0,02
NO3	0,42	0,33	-0,04	0,24	0,15	-0,02
PT	0,10	-0,12	-0,04	0,05	-0,05	-0,02
OD	0,78	-0,03	-0,18	0,44	-0,01	-0,07
SS	0,13	0,07	0,50	0,07	0,03	0,19
DQO	0,56	-0,28	-0,06	0,31	-0,12	-0,02
ColiF	0,25	-0,35	0,67	0,14	-0,16	0,26
Prof	-0,11	0,00	0,08	-0,06	0,00	0,03

Resumen de la selección de variables (forward selection). El orden de las variables está en función de la varianza explicada cuando fueron incluidas en el modelo.

Variable	Código Variable	Lambda A	p	F	Varianza explicada
OD	12	0,07	0,001	9,86	30,43
Coli F	17	0,03	0,028	4,19	13,04
PH	4	0,02	0,002	3,42	8,70
ALCA	3	0,02	0,008	2,81	8,70
NO3	7	0,02	0,051	2,16	8,70
COND	1	0,01	0,036	2,76	4,35
SS	14	0,02	0,049	2,51	8,70
DQO	16	0,02	0,027	2,27	8,70
PT	11	0,01	0,098	1,62	4,35
PROF	18	0,01	0,248	1,26	4,35