

Dinámica fisicoquímica de las aguas de un sistema de planicies inundables tropicales

Physicochemical dynamics water in a tropical floodplain

*Yimmy Montoya M, Néstor Aguirre R.**

Grupo Geolimna, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. AA 1226. Medellín, Colombia

(Recibido el 21 de marzo de 2012. Aceptado el 9 de octubre de 2013)

Resumen

Se estudió el cambio de algunas variables fisicoquímicas en el agua de siete caños y siete ciénagas pertenecientes a la zona de planos de inundación de Ayapel en nueve muestreos durante el periodo 2006-2009. El valor medio de la conductividad eléctrica en la ciénaga es tres veces inferior al valor medio de las ciénagas de la región. 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ puede considerarse como discriminante entre ciénagas con valores inferiores y los caños con valores superiores. No hubo relación entre la transparencia y la concentración de pigmentos fotosintéticos, lo que podría considerarse como indicador de un nivel de estado trófico bajo del sistema. A nivel temporal todas las formas de nutrientes evaluadas presentaron diferencias lo que indica la importancia del efecto del pulso de inundación a través del ciclo hidrológico. Con la disminución de la columna de agua en época de estiaje, se evidenció un aumento de las concentraciones de nitrógeno, las cuales se ven favorecidas por la resuspensión de material del fondo de la ciénaga. La concentración de fósforo es más sensible a la variación espacial, ya que el ciclo de este nutriente estuvo asociado a los sedimentos y a la composición del suelo de cada microcuenca. Se encontró que para una misma fase del pulso en ciclos sucesivos, se registran diferencias en la dinámica del sistema, por lo que el momento hidrológico en el que se realiza el muestreo es el factor principal en el comportamiento de las condiciones fisicoquímicas del sistema.

Palabras clave: Lago de llanura de inundación, dinámica, variables físicas y químicas, Ciénaga de Ayapel

* Autor de correspondencia: teléfono: +57 4+219 55 90, 219 65 62, fax: +57 4+219 65 68, correo electrónico: naguirre@udea.edu.co. (N. Aguirre)

Abstract

We studied the physicochemical variables change in seven water swamps and seven streams outside the floodplain area Ayapel in nine samples during the period 2006-2009. The average value of electrical conductivity in the swamp is three times less than the value of the swamps of the region. 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ can be considered as discriminating among swamps with lower values, and streams with higher values. There was no relationship between transparency and the concentration of photosynthetic pigments, which could be considered as an indicator a lower level trophic system. Temporary level all evaluated forms of nutrients present differences which indicates the importance of the effect of the pulse of flooding through the hydrological cycle. With the decline of the column of water in times of drought, there was an increase in the concentrations of nitrogen, which are favored by the resuspended material from the bottom of the swamp. Phosphorus concentration is most sensitive to spatial variation, this nutrient cycle is very associated with the sediments and the composition of the soil of each basin. We found that for the same phase in successive cycles of the pulse, there are differences in the system dynamics so that when the hydrologic sampling is performed is the main factor in the behavior of the physicochemical conditions of the system.

Keywords: Flood plain lake, dynamic, physical and chemical variables, Ayapel swamp

Introducción

Las ciénagas son los componentes primarios de los planos inundables [1]. Ciénagas es el término como se llama en Colombia a los lagos de planos inundables de zonas bajas, por lo que se emplearan en el trabajo ambos términos como sinónimos. Según [2] esta clase de ecosistema presenta tres zonas ecológicas definidas: 1. Zona de aguas abiertas y de profundidad variable; 2. Zonas de bahías, por lo general menos profundas y 3. Zona marginal de vegetación, correspondiente a la parte litoral ocupada generalmente por vegetación acuática. Podría incluirse como cuarta zona la zona de transición acuático terrestre ATTZ, la cual se constituye en un ambiente dinámico, que exhibe un mosaico de sistemas complejos con unas condiciones propias [3, 4].

Las interacciones entre el cauce principal y el plano de inundación determinan los flujos bióticos y de materiales entre estos dos ambientes, lo que influye sobre la disponibilidad de hábitats

y el alimento que alguna vez se localizaron o actualmente se sitúan en planos inundables [3, 5-7]. Las ciénagas se caracterizan por presentar tiempos de residencia del agua elevados, esta característica del ambiente en el sistema de Ayapel representa una gran diferencia respecto a las ciénagas de la región Momposina y a las del resto del país, lo que favorece la evaluación de las siguientes preguntas de investigación: ¿cómo son los patrones de cambio en las variables fisicoquímicas a nivel espacial y temporal?, ¿Cómo es la relación entre la dinámica de las variables climáticas, físicas y químicas y el pulso de inundación?, ¿la ciénaga de Ayapel se comporta como otras ciénagas del país?.

El objetivo principal del trabajo consiste en identificar patrones de variación de las variables fisicoquímicas a través del pulso de inundación, ya que se hipotetiza que en este tipo de ecosistema, la fecha a la que se realiza el muestreo juega un papel preponderante en los resultados fisicoquímicos.

Materiales y métodos

Área de estudio

El sistema cenagoso de Ayapel se ubica en la jurisdicción del municipio de Ayapel, en el departamento de Córdoba, en la planicie atlántica del norte de Colombia (Fig. 1). Forma parte del macrosistema de humedales y zonas anegables de la depresión Momposina. La cuenca de la ciénaga tiene un área de 1.504 km², situada entre 20 y 150 msnm. El territorio se ubica en la zona de bosque

húmedo tropical, con temperaturas entre los 26 y 29 °C [8]. El sistema cenagoso de Ayapel se caracteriza por ser somero ($Z_{max} = 10m$) posee un área considerable de espejos de agua de 150 km² en época de lluvias, y una precipitación media de 2000 mm anuales. Geográficamente, la zona se encuentra en la vertiente oriental del río San Jorge. Según [9] los suelos de la región se pueden diferenciar de acuerdo a una serie de discontinuidades en las que la topografía y la saturación de agua en el suelo representan los factores directores.

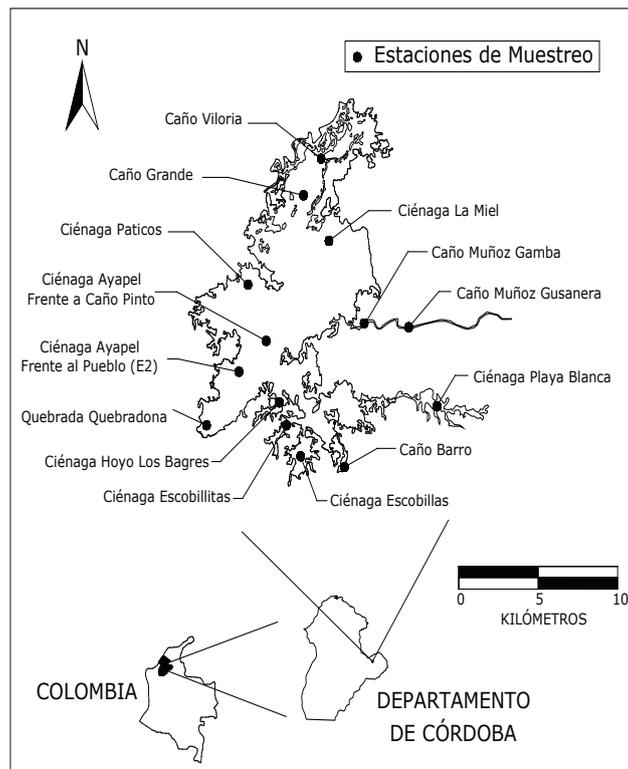


Figura 1 Localización general de la zona de estudio

Estaciones de muestreo

Siete caños y siete lagos de llanura de inundación fueron seleccionados teniendo en cuenta la información existente y la realización mediciones en un amplio espectro del sistema cenagoso de Ayapel (figura 1).

Se realizaron muestreos entre el año 2006 y 2009, los cuales abarcaron tres ciclos hidrológicos bajo condiciones diferenciales del pulso de inundación (tabla 1). Se estableció la fase del ciclo hidrológico a la que perteneció cada muestreo a partir de la variación de la precipitación mensual y del cambio en el nivel de la ciénaga (figura 2).

Tabla 1 Fechas de muestreo y condición hidrológica

<i>Muestreo</i>	<i>Característica hidrológica</i>
Mayo/2006	Aguas en ascenso
Julio/2006	Aguas en ascenso
Septiembre/2006	Aguas altas
Diciembre/2006	Aguas altas en descenso
Marzo/2007	Aguas bajas
Agosto/2007	Aguas en ascenso
Enero/2008	Aguas altas en descenso
Septiembre/2008	Aguas altas
Enero/2009	Aguas altas en descenso

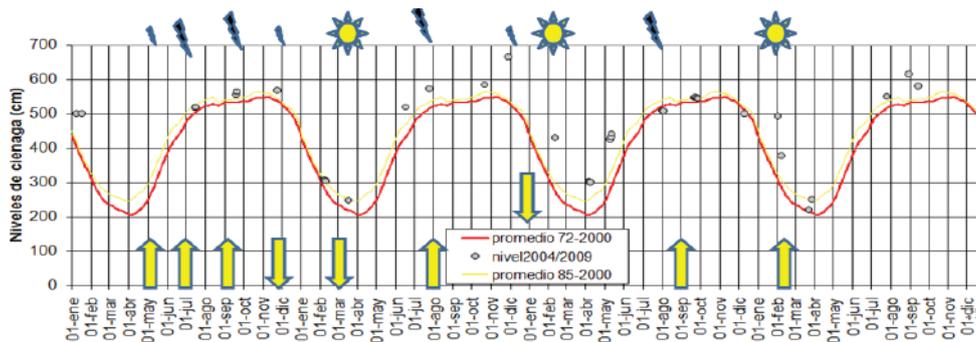


Figura 2 Variación de niveles históricos y actuales de la ciénaga de Ayapel (tomada y modificada de Wills 2008)

Caracterización ambiental y fisicoquímica

La transparencia se midió con un disco de Secchi de 20 cm de diámetro, la temperatura del agua, el oxígeno disuelto y su porcentaje de saturación, la conductividad eléctrica, y el pH, se determinaron con el empleo de medidores WTW; la profundidad total se evaluó con una plomada. Se tomaron muestras de 3 litros de agua para la determinación en el laboratorio de los sólidos totales disueltos (STD) y sólidos totales fijos (STF), nutrientes tales como nitratos (N-NO_3^-), nitritos (N-NO_2^-), nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+), fósforo soluble reactivo (P-PO_4^{3-}) y sulfatos (S-SO_4^{2-}). Se calculó la relación N/P, en función de la suma de nitrógeno amoniacal, nitratos y nitritos sobre la concentración de fósforo soluble disuelto.

Análisis estadísticos

Los datos obtenidos se sometieron a análisis exploratorio mediante el uso de estadísticos de tendencia central (media aritmética, **M. A.**) y de dispersión [desviación estándar (**S**) y coeficiente de variación relativa de Pearson (**C. V.**)]. Para explicar la relación entre variables se efectuó un análisis de regresión múltiple. Para explicar el comportamiento de las variables estudiadas en el ámbito temporal, se empleó el coeficiente de correlación de Spearman y el análisis de varianza de Friedman. La aplicación de cada prueba estadística estuvo sujeta a la comprobación de los supuestos de la misma. El análisis de componentes principales (ACP) fue empleado para identificar patrones de ordenación entre las variables físicas y químicas del agua y reducir

la dimensionalidad del conjunto de datos. Los análisis estadísticos citados fueron efectuados en el paquete *Statgraphics Centurion XVII*.

Resultados

El ciclo hidrológico muestra una distribución monomodal de las lluvias, con un máximo entre agosto y noviembre, y un periodo de sequía entre marzo y mayo. El año 2006 fue más lluvioso que los otros años estudiados, lo que implicó un aumento del nivel de la ciénaga por encima de los promedios históricos (1972-2000) como efecto del rompimiento del Río Cauca, el cual inundó la ciénaga incrementando el nivel de ésta, hecho que según habitantes de la zona se presenta cada 15 años aproximadamente. También puede observarse un aumento de los niveles actuales de la ciénaga, respecto a los valores promedios históricos, lo que puede deberse al efecto del calentamiento global y a las obras civiles realizadas en la región.

Se presentan variables que exhiben coeficientes de variación altos, tales como la transparencia, los nutrientes (N-NO_3^- , N-NO_2^- , N-NH_4^+ , FSR), sulfatos y los STD y SST (tabla 2). Esta característica podría atribuirse al efecto del pulso de inundación. Por otro lado, la temperatura del aire y del agua, presentan coeficientes de variación menores al 10 %, lo que indica una estabilidad alta de estas variables durante los 3 años de investigación. Finalmente, la conductividad eléctrica, el nivel de la ciénaga, la concentración de oxígeno disuelto y su porcentaje de saturación y la alcalinidad se encuentran en un nivel medio de variación.

Tabla 2 Medidas de tendencia central y de dispersión de la información fisicoquímica

<i>Variable</i>	<i>n</i>	<i>Media</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Coefficiente de variación</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Rango</i>
Transparencia (m)	114	0,60	0,37	61,05	0,05	1,7	1,65
Profundidad (m)	113	3,27	1,40	42,69	0,25	6,7	6,45
Temperatura del aire (°C)	110	30,84	1,46	4,75	28,2	35,6	7,4
Temperatura del agua (°C)	114	30,66	2,69	8,78	23,9	39,1	15,2
Oxígeno disuelto (mg. l ⁻¹)	112	4,92	2,04	41,45	0,4	10,6	10,2
Saturac. de oxígeno (mg.l ⁻¹)	71	65,82	29,78	45,25	4,73	143	138,27
pH (unidades de pH)	109	6,65	0,78	11,68	0,29	8	7,71
Cond. eléctrica (μS.cm ⁻¹)	110	67,63	49,63	73,38	12,1	261	248,9
Nitratos (mg. l ⁻¹)	80	1,19	1,27	106,70	0	5	5
Nitritos (mg. l ⁻¹)	72	0,19	0,41	218,34	0	2,1	2,1
Nitróg. amoniacal (mg.l ⁻¹)	81	0,08	0,08	97,65	0	0,42	0,42
FSR (mg. l ⁻¹)	88	0,56	0,57	101,82	0,03	2,8	2,77
Sulfatos (mg. l ⁻¹)	70	3,37	5,62	166,50	0,03	38	37,97
SST (mg. l ⁻¹)	46	21,81	19,69	90,29	1	76	75
SDT (mg. l ⁻¹)	48	120,99	120,47	99,57	23	543	520
Alcalinidad (mg. l ⁻¹)	23	46,99	29,79	63,40	0	100	100

Al identificar la relación entre las variables físicas y químicas (tabla 3), se encuentra que la concentración de los nutrientes, la transparencia y la profundidad

de la columna de agua son las variables que tienen mayor número de relaciones significativas sobre las demás características del agua.

Tabla 3 Matriz de correlaciones entre las variables físicas y químicas

<i>Variables</i>	<i>N-NH₄</i>	<i>N-NO₃</i>	<i>N-NO₂</i>	<i>FSR</i>	<i>Zsd</i>	<i>D</i>	<i>OD</i>	<i>pH</i>	<i>C.E</i>	<i>T.w</i>	<i>Cl a</i>	<i>Feop</i>	<i>Precip</i>
N-NH ₄		0,43	0,53	0,60	-0,37	-0,23	0,41	0,20	0,05	0,09	0,09	-0,15	-0,39
N-NO ₃	0,43		0,62	0,43	-0,29	-0,26	0,29	0,20	-0,06	0,14	-0,1	-0,1	-0,28
N-NO ₂	0,53	0,62		0,59	-0,32	-0,51	0,09	0,08	0,08	-0,01	0,05	-0,09	-0,19
FSR	0,6	0,43	0,59		-0,54	-0,44	0,32	-0,2	-0,01	0,07	-0,1	-0,16	-0,29
Zsd	-0,37	-0,29	-0,32	-0,54		0,66	-0,27	0,14	-0,23	-0,19	0,27	0,27	0,29
D	-0,23	-0,26	-0,51	-0,44	0,66		-0,13	0,27	-0,27	-0,22	0,11	0,11	0,20
OD	0,41	0,29	0,09	0,32	-0,27	-0,13		0,04	-0,28	0,36	0,02	-0,15	-0,31
pH	0,2	0,2	0,08	-0,16	0,14	0,27	0,04		0,13	-0,13	0,15	0,18	0,01
C.E	0,05	-0,06	0,08	-0,01	-0,23	-0,27	-0,28	0,13		0,02	0,08	0,17	-0,28
T.w	0,09	0,14	-0,01	0,07	-0,19	-0,22	0,36	-0,1	0,02		-0,1	0,11	0,17
Cl a	0,09	-0,07	0,05	-0,12	0,27	0,11	0,02	0,15	0,08	-0,1		0,19	0,05
Feop	-0,15	-0,1	-0,09	-0,16	0,27	0,11	-0,15	0,18	0,17	0,11	0,19		0,36
Precipitac	-0,39	-0,28	-0,19	-0,29	0,29	0,20	-0,31	0,01	-0,28	0,17	0,05	0,36	

Los valores en negrilla indican que presentaron correlaciones significativas

($p < 0.05$). Siglas: Zsd=transparencia; D=profundidad; C.E=conductividad eléctrica; T.w=Temperatura del agua; Cl a: clorofila a; Feop: feopigmentos; Precip: precipitación.

El análisis de varianza (tabla 4) permite identificar las variables que no cambian ni espacial ni temporalmente (temperatura del agua, clorofila

a), las variables que fluctúan espacialmente (transparencia, % sat de OD, alcalinidad), las que cambian sólo a nivel temporal (temperatura del aire, pluviosidad, SST, SDT, N-NO₃, N-NO₂, N-NO₄, feopigmentos) y las que cambian en el tiempo y en el espacio (sulfatos, profundidad, pH, OD, FSR, conductividad).

Tabla 4 Análisis de varianza de la información fisicoquímica

Variable	Factor	α	Diferencias
<i>Transparencia</i>	Estaciones	0	E1, E5, E6, E7 se diferencian del resto
	Muestreos	0	n.s
<i>Temperatura del agua</i>	Estaciones	0,6757	n.s
	Muestreos	0,8365	n.s
<i>Temperatura del aire</i>	Estaciones	0,1716	n.s
	Muestreos	0,0002	M3 diferente del resto y M4-M6
<i>Pluviosidad</i>	Muestreos	0	Todos los muestreos diferentes
<i>Profundidad</i>	Estaciones	0	E2, E5, E6 diferentes del resto de estaciones
	Muestreos	0	M5 y M9 diferentes del resto
<i>pH</i>	Estaciones	0,0104	E8 diferente del resto de estaciones
	Muestreos	0,0162	1-7, 2-5, 2-9, 5-6, 5-7, 7-8
<i>Oxígeno</i>	Estaciones	0	E5, E8, E9 diferentes del resto de estaciones
	Muestreos	0	M6 y M9 diferentes del resto
<i>% de saturación de O₂</i>	Estaciones	0,0002	E1, E5 diferentes del resto de estaciones
	Muestreos	0,3054	n.s
<i>Nitritos</i>	Estaciones	0,0895	n.s
	Muestreos	0	M9 diferente del resto
<i>Nitratos</i>	Estaciones	0,2233	n.s
	Muestreos	0	M8 diferente del resto
<i>Nitrógeno amoniacal</i>	Estaciones	0,0526	n.s
	Muestreos	0	M1, M8 diferentes del resto de estaciones
<i>FSR</i>	Estaciones	0,0022	1-5,1-6, 2-8,2-12,
	Muestreos	0	M1-2, M8-9 diferentes del resto de estaciones
<i>Feopigmentos</i>	Estaciones	0,4933	n.s
	Muestreos	0,0023	M8-9 diferentes del resto de estaciones
<i>Conductividad</i>	Estaciones	0	E1, E5, E9, E13
	Muestreos	0	M1, M7, M9

Variable	Factor	α	Diferencias
Clorofila	Estaciones	0,1306	n.s
	Muestreos	0,7367	n.s
Alcalinidad	Estaciones	0,0065	E5, E9, E11
	Muestreos	0,0566	n.s
Sulfatos	Estaciones	0,0366	E1 diferente del resto de estaciones
	Muestreos	0	M1 y M2 diferentes del resto
SST	Estaciones	0,1063	n.s
	Muestreos	0,0006	M5 y M2 diferentes del resto
SDT	Estaciones	0,6959	n.s
	Muestreos	0,0157	M8 diferente del resto

Abreviaturas: n.s: no significativas; E: estación; M: muestreo

La ordenación a nivel temporal al separar las ciénagas de los caños permitió evidenciar que el momento hidrológico de estudio genera una

mayor organización que el ordenamiento espacial (figura 3 a y b).

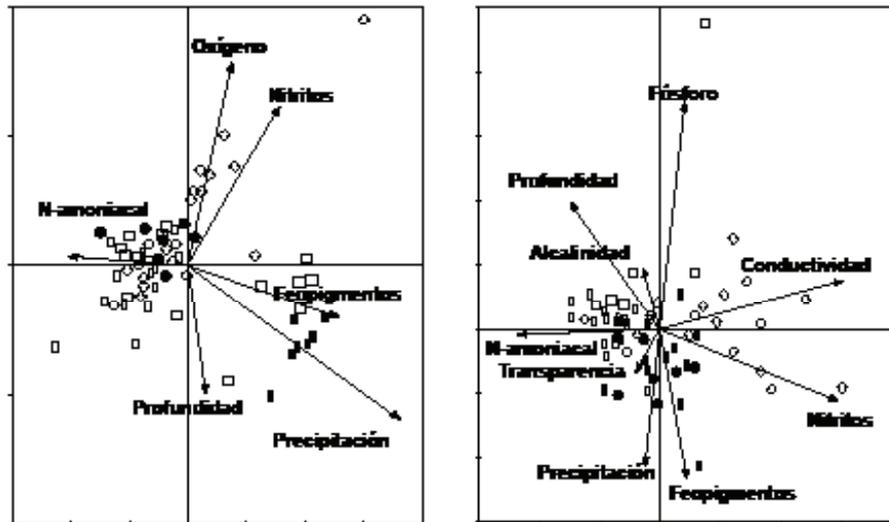


Figura 3 Análisis de ordenación de los muestreos a través del pulso de inundación en las ciénagas (a) y en los caños (b). Convenciones figura a: ● Aguas bajas, □ Aguas altas, ■ Aguas en ascenso 2007, □ Aguas en ascenso y ◇ Aguas altas en descenso. Convenciones figura b: ● Aguas en ascenso 2007, □ Aguas altas, ■ Aguas bajas, □ Aguas en ascenso y ◇ Aguas altas en descenso

En estas figuras se evidenció como las estaciones lólicas y lénticas se agrupan de acuerdo al momento hidrológico del pulso de inundación en que se realicen, minimizándose los gradientes espaciales. A partir del un

análisis de redundancia canónica (RDA) o un análisis de correspondencia canónica (CCA) según correspondió, se encontraron que las tendencias varían entre ciénagas y caños (Figura 4 a y b).

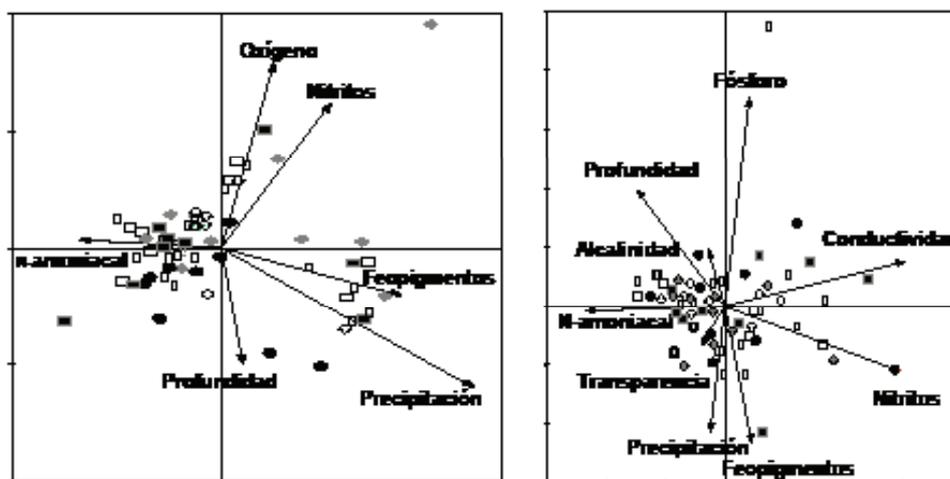


Figura 4 Análisis de componentes principales (ACP) de los de los muestreos a través del pulso de inundación en las ciénagas (a) y en los caños (b). Convenciones figura a: ■ E1 E2 E4 ● E5 ■ E6 ◆ E13 E11, Convenciones figura b: E3 ◆ E7 ■ E8 E9 ● E10 E12 ■ E14

Las ciénagas presentan una ordenación orientada por dos grupos, los nutrientes-oxígeno disuelto y la precipitación, los cuales agrupan la mayoría de las estaciones y momentos del pulso. La concentración de nitrógeno en forma amoniacal agrupa la mayoría de estaciones. La E13 (Escobillas) se aísla de las otras ciénagas parcialmente, ya que parece estar influenciada por condiciones de su cuenca y su comportamiento obedece a dinámicas propias.

El resto de las ciénagas presentan un patrón de ordenación similar lo que puede indicar que son sistemas de mayor conectividad respecto al cuerpo principal. En las ciénagas la precipitación y la concentración de oxígeno y de nitritos presentan mayor influencia en la ordenación de las estaciones (tabla 5). En los caños las variables asociadas a la precipitación ejercieron mayor influencia en la ordenación de las estaciones, tales como la conductividad y los nutrientes (tabla 6), aunque los feopigmentos alcanzan también a tener influencia alta en el segundo eje canónico.

Tabla 5 Correlaciones de las variables con los componentes principales 1 y 2 en las ciénagas

Variable	Eje 1	Eje 2
Oxígeno disuelto	0,11	0,41
Nitritos	0,25	0,35
Nitrógeno amoniacal	-0,32	0,01
Profundidad	0,05	-0,38
Feopigmentos	-0,41	-0,11
Precipitación	0,61	-0,33

Tabla 6 Correlaciones de las variables con los componentes principales 1 y 2 en los caños

Variable	Eje 1	Eje 2
Conductividad eléctrica	0,64	0,09
Fósforo soluble	0,08	0,56
Nitrógeno amoniacal	-0,43	0,23
Nitrito	0,62	-0,13
Profundidad total	-0,2	0,02
Alcalinidad	0,14	0,22
Transparencia	-0,07	-0,37
Clorofila	-0,06	-0,38
Feopigmentos	0,03	-0,59
Precipitación	-0,13	-0,72

La ordenación de los muestreos y estaciones en los caños es uniforme. El valor propio del fósforo en el eje 2 es el mayor, no obstante presenta poca influencia directa en la ordenación, en la que el nitrógeno en forma amoniacal y la precipitación presentan un papel preponderante. Las estaciones lóaticas presentan menor variabilidad espacio-temporal, ya que la mayoría de puntos se agrupa entorno al centro del diagrama de ordenación.

La relación profundidad promedio/ profundidad Secchi se puede emplear como indicador de las condiciones de iluminación de la columna de agua

(figura 5). Si la transparencia aumenta, el valor de la razón disminuye a partir de profundidades medias constantes. A partir de las observaciones en campo, se puede plantear una relación Z_m/Z_{sd} de 5 como límite entre sistemas parcialmente iluminados y turbios, ya que la transparencia media del sistema fue del 18,4% de la profundidad media. Respecto a este valor, las ciénagas presentan mayores valores de transparencia que los caños y las estaciones E3 (Caño Pinto), E5 (Ciénaga Playa Blanca) y E14 (Caño Grande) presentan condiciones de iluminación deficiente.

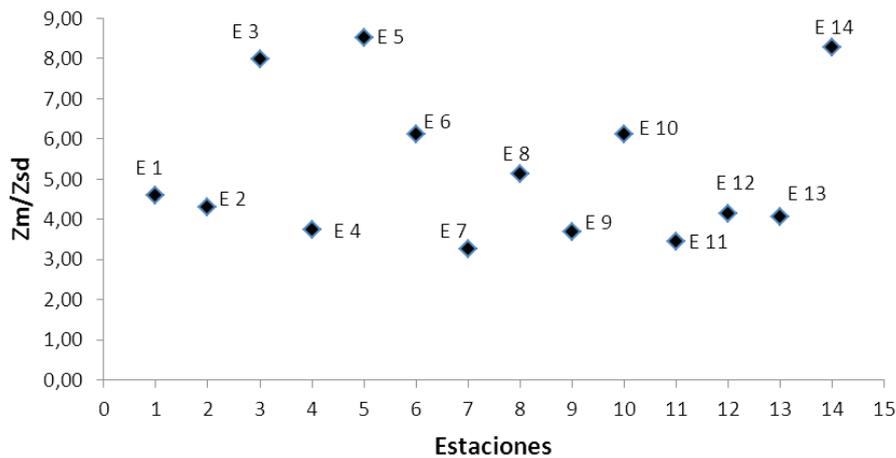


Figura 5 Variación de la relación Z_m/Z_{sd} entre las estaciones de muestreo

Discusión

La figura 6 evidencia que todos los cuerpos de agua muestreados presentan deficiencia de nitrógeno, ya que la relación N/P promedio es menor que 7,2, la cual es considerada como la relación limitante para la biomasa [10]. Hay que considerar que esta limitación probablemente obedece a una relación estequiométrica, más que a una limitación real, ya que los valores medios del NID y del PO_4 son altos.

La ausencia de cambios importantes de la temperatura del agua a nivel espacial y temporal indicaría que el sistema permanece estratificado, lo cual es cierto parcialmente, ya que las evaluaciones nictemerales indican que el cuerpo de agua es de tipo polimíctico [11]. Al efectuar los muestreos durante el día los datos corresponden a la fracción de tiempo que el sistema permanece

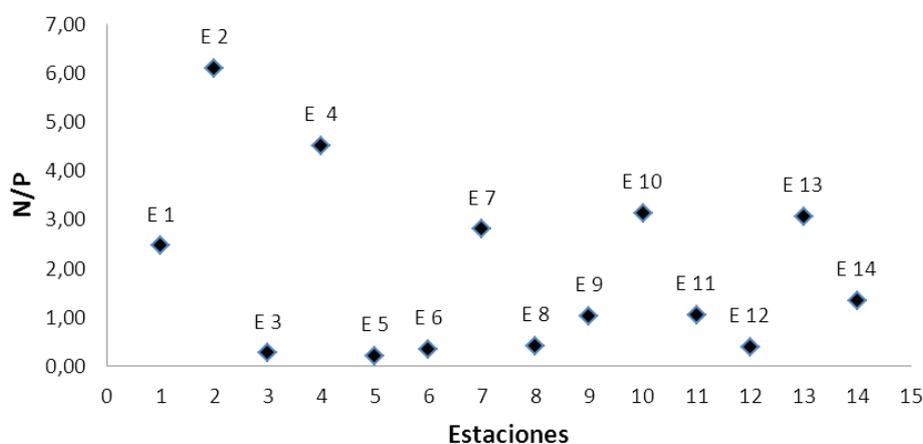


Figura 6 Variación de la relación N/P entre las estaciones de muestreo

estratificado, pero en la noche, por efectos de la convección el cuerpo de agua, cede calor y tiende a mezclarse. Este patrón registra variaciones durante el ciclo hidrológico como lo documentan [12]. Otro aspecto a resaltar son los valores altos de la temperatura del agua, los cuales favorecen la descomposición y mineralización de la materia orgánica. Según [2] en los cuerpos de agua de baja productividad, la mayoría de la materia orgánica se descompone antes de llegar al fondo; por lo tanto, no hay gasto de oxígeno del hipolimnion. Investigadores encontraron que los sedimentos del complejo cenagoso de Ayapel son predominantemente inorgánicos [13], lo que confirma la relación antes planteada.

Otro aspecto que se relaciona con la estabilización de la materia orgánica es la concentración de oxígeno disuelto, la cual nunca presentó anoxia, ya que los tiempos bajos de residencia del sistema favorecen el intercambio permanente de agua con en el cuerpo principal, al trabajo del viento sobre la columna de agua y a la fotosíntesis generada por los microorganismos autótrofos que inyectan oxígeno al cuerpo de agua. Se presenta una reducción en las concentraciones de oxígeno disuelto en algunas ciénagas satélites (Playa blanca, Hoyo los Bagres y Paticos) y caños (Barro y Muñoz), sistemas que

probablemente presentan mayores concentraciones de materiales orgánicos en diferentes estados de descomposición. Los compuestos húmicos generan subsaturación aún en el epilimnio [2]. [14] encontró que las concentraciones de ácidos fúlvicos representaron un porcentaje alto de la materia orgánica en la ciénaga de Ayapel, además que todas las especies químicas de la materia orgánica variaron significativamente con el ciclo hidrológico pero no entre estaciones; lo que podría interpretarse como que las aguas de la ciénaga de Ayapel no presentan gradientes ambientales en cuanto a sustancias orgánicas, pero sí se observa un impacto del pulso de inundación sobre éstas y, por ende, sobre las concentraciones de oxígeno disuelto.

Para [2] después de la temperatura, el oxígeno es el factor más importante que debe ser medido en el agua, el cual tiene valor, si se acompaña de la temperatura, para poder establecer el porcentaje de saturación. El comportamiento del oxígeno en las ciénagas y caños del sistema de Ayapel coincide con lo señalado para otros sistemas de planicies de inundación [15], donde existe el predominio de una condición heterotrófica (producción/respiración <1), con concentraciones de oxígeno por debajo del 100% de saturación inclusive en periodos de

alta actividad autotrófica, por causa de la entrada continua de materia orgánica y la descomposición de detritos alóctonos generados en el ecotono de transición entre los sistemas terrestre y acuático.

La conductividad refleja la mineralización de las aguas (sólidos disueltos), dado que conjuga los cationes sodio, potasio, calcio, magnesio, así como los aniones carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, y cloruros principalmente [16]. Esta variable presentó diferencias espaciales y temporales, exhibió un valor medio de 67,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ el cual se encuentra dentro del rango de valores naturales para los ecosistemas colombianos [2] y de las ciénagas del bajo Magdalena [17], aunque

respecto a las ciénagas del canal del dique, estos valores son bajos [18]. El valor medio de la ciénaga es tres veces inferior al valor medio de las ciénagas de la región (Tabla 7). Es de resaltar que el rango en el sistema cenagoso de Ayapel es muy amplio, ya que se registraron conductividades muy bajas 12,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en E6 (Escobillitas) y valores altos de 261 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en E8 (Muñoz-Gamba), por lo que se puede emplear esta variable física para tratar de clasificar los subsistemas evaluados (Figura 7), en la que se observa como los caños tienden a ubicarse en la parte superior de la grafica y las ciénagas en la parte inferior al emplear como línea imaginaria de división los 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Tabla 7 Principales variables físicas y químicas del sistema inundable de Ayapel

<i>Ciénaga</i>	<i>T.w</i> (°C)	<i>D max</i> (m)	<i>Zsd</i> (m)	<i>OD</i> (mg/l)	<i>pH</i>	<i>C.E.</i> ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	<i>N-NO₃</i> (mg/l)	<i>N-NO₂</i> (mg/l)	<i>N-NH₄</i> (mg/l)	<i>FSR</i> (mg/l)	<i>Alcal.</i> (mg/l)	<i>Dureza</i> (mg/l)
Paticos	30,6	5,5	0,54	5,02	6,76	53,63	1,47	0,18	0,11	0,71	147,89	96,33
Escobillitas	30,4	5,7	1,03	5,33	6,57	29,49	1,25	0,04	0,11	0,23		15
Playa Blanca	30,4	5	0,58	2,69	6,48	149,73	0,20	0,09	0,01	0,77	90	70
Ayapel sector C. Pinto	30,0	3	0,62	6,23	6,99	104,67	0,90	0,06	0,17	0,25	60	25
Ayapel frente al pueblo	32,1	6	0,62	7,07	6,79	80,27	0,07	0,1	0,01	0,35	42	20,5
La Miel	32,7	2,7	0,32	7,26	6,86	111,23	0,12	0,5	0,01	0,34	27,06	41
Hoyo los Bagres	31,6	4,8	1,11	5,16	6,52	74,37	0,90	0,03	0,14	0,38		
Escobillas	30,7	4,5	0,80	6,12	6,45	17,30	0,60	0,04	0,01	0,21		
Caño Viloría	31,2	4,3	0,42	6,30	7,16	96,30	0,16	0,2318	0,02	0,42	87	47,5
Caño Muñoz-Gusanera	30,6	2,1	0,46	1,66	6,42	133,50	0,90	0,04	0,20	1,11	100	80
Caño Muñoz-Gamba	29,8	2,6	0,60	3,14	6,24	170,55	0,90	0,08	0,18	1,11		
Caño Barro	30,1	6,2	0,61	5,10	6,73	82,70	0,36	1,07	0,02	0,46	76,1	44
Quebrada Quebradona	32,5	4	0,70	6,86	6,32	53,40	0,02	0,3227	0,16	0,05	30,25	28
Caño Grande	30,1	5	0,41	6,28	6,88	76,52	0,83	0,25	0,08	0,87	28,25	50
MEDIA C. AYAPEL	30,91	4,39	0,63	5,30	6,65	88,12	0,62	0,20	0,08	0,52	68,86	47,03

Siglas: T.w=Temperatura del agua; Dmax=profundidad máxima; Zsd=transparencia; O.D= Oxígeno disuelto; C.E=conductividad eléctrica; Alcal=alcalinidad.

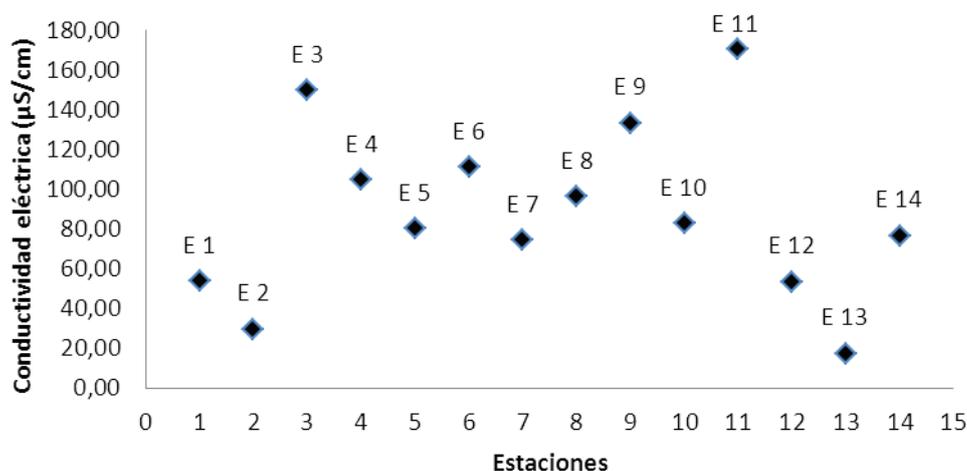


Figura 7 Variación de la conductividad eléctrica entre las estaciones de muestreo

La conductividad eléctrica presentó relación inversa con la profundidad y con la concentración de oxígeno disuelto. En el primer caso, el aumento del nivel de la columna de agua implica un mayor volumen de disolvente, lo que puede disminuir la magnitud de esta variable, en el segundo caso, el aumento de la concentración de OD se registró cuando los niveles de la ciénaga están bajos. Hay que considerar que los planos inundables son una parte integral del sistema que periódicamente se acopla y desacopla del río parental por las zonas de transición acuático terrestres [19].

Investigadores encontraron en la ciénaga de San Silvestre que las mayores concentraciones de sólidos se presentaron en las zonas de mayor turbulencia [20]. Otro aspecto es el hecho que los SST y los SDT no presentan diferencias a nivel espacial en el sistema, pero sí a nivel temporal, aunque la prueba de correlación múltiple no indica que las otras variables evaluadas presenten relaciones sobre estas variables.

El pH presentó correlación baja con la profundidad. En un estudio similar con mayor número de puntos de muestreo, [16] encontraron correlación entre el pH, la alcalinidad, la conductividad y los sólidos disueltos, los cuales son indicadores del grado de mineralización de las aguas. [20] atribuyen los valores bajos de pH

a los aportes de CO_2 provenientes de los procesos de respiración y descomposición de la materia orgánica, asociados a las bajas alcalinidades.

La transparencia del agua presentó un valor medio de 0,6 m con una tendencia a disminuir en aguas bajas y a incrementarse en aguas altas. Esta relación ha sido reconocida en otros sistemas asociados a pulsos de inundación-sequía en la zona amazónica colombiana [21, 22]. Se encontró que el patrón de variación de la transparencia estuvo asociado a la pluviosidad, lo que concuerda con lo planteado por [23] para sistemas acuáticos brasileros. Adicionalmente, esta variable presentó relación positiva con el nivel de cada estación de muestreo y una relación inversa con la concentración de nutrientes (N-NO_3 , N-NO_2 , N-NH_4 , FSR). Lo cual se puede explicar en el primer caso debido al aumento de la precipitación y del nivel de la ciénaga que genera un aumento de la zona fótica y respecto a los nutrientes, en el sentido que al darse esta ampliación de la zona iluminada se da un mayor consumo de los nutrientes por parte de los organismos autótrofos.

Otro aspecto a resaltar es la ausencia de relación entre la transparencia y la concentración de pigmentos fotosintéticos, lo que podría considerarse como indicador de un nivel de estado trófico bajo del sistema. Investigadores afirman

que cuando el material sestónico es de naturaleza fitoplanctónica, la transparencia se relaciona negativamente con la cantidad de nutrientes lo que se constituye en un indicador de estado trófico de los cuerpos de agua [24]. Por otra parte, si la reducción de la transparencia y por tanto de la penetración lumínica es debida a sólidos en suspensión de tipo inorgánico, la productividad fitoplanctónica podría encontrarse limitada. Podría pensarse que esta segunda característica

es la que sucede en el sistema cenagoso de Ayapel, ya que se presenta una transparencia promedio baja, relación negativa entre ésta y las concentraciones de los nutrientes, además que se encontró que el aumento en la transparencia está relacionado con un aumento en la relación N/P, es decir, una reducción de la concentración de fósforo, por lo que la transparencia podría ser un buen indicador trófico del sistema de Ayapel (figura 8).

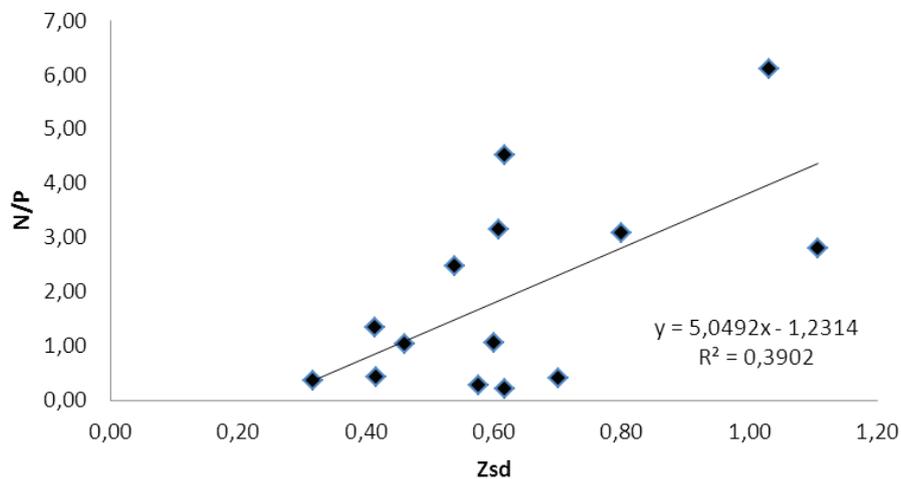


Figura 8 Variación de la relación N/P y la transparencia Secchi

En contraste, a nivel temporal todas las formas de nutrientes evaluadas presentan diferencias estadísticas lo que indica la importancia del efecto del pulso de inundación-sequía a través del ciclo hidrológico. El cambio en la concentración de nutrientes estuvo relacionado con la concentración de oxígeno disuelto, con las variaciones en el nivel del sistema y con la precipitación. También hay que tener en cuenta que los cuerpos de aguas negras contienen mayores cantidades de nitrógeno total (alrededor de 750 µg/l), debido a la presencia de ácidos orgánicos especialmente los fúlvicos que en su estructura poseen importantes cantidades de nitrógeno en los grupos funcionales amonio-nitrógeno [25, 26], ya que [14] encontró en la ciénaga de Ayapel que los ácidos fúlvicos

representan un porcentaje alto del total de las sustancias húmicas encontradas y constituyen las especies químicas más importantes en el sistema cenagoso de Ayapel.

Con la disminución de la columna de agua en época de estiaje, se evidenció un aumento de las concentraciones de nitrógeno, las cuales se ven favorecidas por la resuspensión de material del fondo de la ciénaga. Esta tendencia fue registrada en la misma ciénaga por [27].

La concentración de FSR es más sensible a la variación espacial, ya que el ciclo de este nutriente está muy asociado a los sedimentos y a la composición del suelo de cada microcuenca. Otro aspecto a tener en cuenta son los cortos

circuitos hidráulicos en los que la circulación baja del agua tiende a disminuir la concentración de oxígeno, lo que favorece la liberación de fosfatos. Como en los demás ciclos biogeoquímicos, en el ciclo del fósforo las bacterias juegan un papel muy importante, pues son las responsables de la descomposición de la materia orgánica. En este proceso ocurre liberación de fosfato hacia el medio en forma inorgánica en ambientes anóxicos [23].

El FSR presentó relación positiva con la transparencia, la profundidad y la concentración de OD. Se ha registrado que al aumentar el nivel de las aguas, la concentración de fósforo se incrementa debido a la liberación de fosfatos por la reducción del hierro. El aumento de la solubilidad puede deberse al incremento de fosfatos de calcio cuando disminuye el pH, a la reducción de fosfato férrico a ferroso o al aumento de la solubilidad de los fosfatos de hierro y aluminio al incrementarse el pH [26, 28].

Al comparar las condiciones fisicoquímicas de las ciénagas y caños del sistema cenagoso evaluadas (tabla 7) respecto a información de otros sistemas cenagosos colombianos (tabla 8), la cual se elaboró a partir de los trabajos de [1,2, 8, 11, 13, 15-18, 24, 26, 27, 29], se puede observar que el sistema de Ayapel presenta mayores valores promedio de la temperatura del agua, profundidad máxima, transparencia, nitritos, FSR, SDT, sulfatos y menor valor medio de la concentración de oxígeno disuelto y el porcentaje de saturación, pH, conductividad, nitrógeno amoniacal, nitratos, STD y alcalinidad.

Pese al tiempo de retención hidráulico bajo, se evidenció que se presentan comportamientos diferentes entre los sistemas lóticos y lenticos, lo cual pudo deberse a la morfometría del sistema de planos inundables, la cual favorece la formación de gradientes espaciales y verticales.

Tabla 8 Principales variables físicas y químicas de algunas ciénagas colombianas

Ciénaga	T.w (°C)	D _{max} (m)	Zsd (m)	OD (mg/l)	pH	C.E. (µS/cm)	N-NO3 (mg/l)	N-NO2 (mg/l)	N-NH4 (mg/l)	FSR (mg/l)	Alcal. (mg/l)	Dureza (mg/l)
Jotaudó (Chocó)	24,0		1,12	2,2	4,9	9					95	
San Silvestre (Santander)	32,9	1,8	0,28	6,5	6,05	44,8	0,36	0,01	0,23	0,02	9,35	12,5
Grande de Santa Marta (Magdalena)	30,6	12	0,3		8,4		0,006	0,0053	0,084	0,76	11,2	
Pajarales (Magdalena)	31	1,1	0,23	5,3	8,1					0,9		
Colombia (Antioquia)	30,0	3,4	0,12	4,43	6,06	33	0,87		< 5	0,07		34,1
Eneal (Sucre)	30,0	2		3,9	8,02	1000	1,04	0,028	0,019	0,17		
Arcial (Córdoba)	33,3	3,25	1,4	5,8	6,25	22			0,07	0,025	11,5	9
Cintura (Córdoba)	31,8	2,5	0,65	4,9	6,5	72			0,18	0,026	19	23
Porro (Córdoba)	29,3	2,4	0,45	4,1	6,7	100			0,27	0,027	42,5	47
Bañó (Córdoba)	30,1	1,2	0,63	8	7,8	620			0,43	0,04	135	235
Charco Pescao (Córdoba)	31,6	1,1	0,25	12,3	9,2	913			0,4	0,038	910,5	289
Pantano Bonito (Córdoba)	30,7	1,8	0,6	2,1	6,9	605			0,55	0,27	97	121
Chucurri (Santander)	30,0	3	0,31	9,98	8,72	40,1	1,93	0,044	0,59	0,11		
Paredes (Santander)	31,0	4	0,65	6,46	6,72	14,1	1,6	0,019	0,52	0,25		
Llanito (Santander)	29,7	2,5	0,46	5,29	6,9	149,6	1,4	0,039	0,48	1,78		
MEDIA CIÉNAGAS	30,36	3,00	0,53	5,84	7,08	278,66	1,03	0,02	0,32	0,32	147,89	96,33

Siglas: T.w=Temperatura del agua; Dmax=profundidad máxima; Zsd=transparencia; O.D= Oxígeno disuelto; C.E=conductividad eléctrica; Alcal=alcalinidad.

Conclusiones

Al observar los promedios históricos del nivel de la ciénaga, se encontró que esta variable presentó valores superiores al promedio histórico de los últimos 25 años, lo que pudo deberse al incremento de la escorrentía, las precipitaciones sobre la cuenca y los aportes de los tributarios. Estas variables son influenciadas por las condiciones climáticas, lo que permite deducir que el cambio climático y a las obras civiles realizadas en la zona de la depresión Momposina pueden ser responsables del incremento de los niveles actuales del sistema cenagoso [29].

Es de resaltar que los valores de conductividad son 3,2 veces mayores en el promedio nacional que en el sistema cenagoso de Ayapel, con una concentración de nitrógeno amoniacal y de sulfatos de 4 y 10,8 veces mayor respectivamente. El sistema cenagoso de Ayapel presenta mayor profundidad de la columna de agua, de la zona fótica, concentración de FSR, STD y concentración de sulfatos, y una menor concentración y saturación de oxígeno disuelto, pH, conductividad eléctrica y concentración de nitratos, ST y alcalinidad, lo que puede ser reflejado en una condición mesotrófica predominante en el sistema [30].

Al comparar los diversos tipos de ambientes evaluados, se puede concluir que hay variables que afectan de manera similar ambos tipos de ecosistemas, tales como la profundidad, la precipitación y los nutrientes. En contraste, en las ciénagas la concentración de oxígeno disuelto y en los caños la conductividad eléctrica, son las variables que coadyuvan a la dinámica particular de cada sistema.

El momento hidrológico en el que se realiza el muestreo es el factor principal en el comportamiento de las condiciones fisicoquímicas del sistema de planos inundables de Ayapel. Incluso, se encontró que para una misma fase del pulso en ciclos sucesivos, se registran diferencias en la dinámica del sistema.

El grado de conectividad aumenta en aguas altas, lo que incrementa la uniformidad las condiciones

fisicoquímicas y limita las condiciones propias de los sistemas, mientras que los cuerpos más aislados alcanzan a generar un mayor grado de independencia del cuerpo principal. Esta individualización de las condiciones fisicoquímicas se hace más evidente en la fase de aguas bajas.

Agradecimientos

Al grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental GAIA de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia y al Programa de Investigación de la gestión integral del agua en Colombia – GRECIA por el apoyo económico y logístico, a Corpoayapel y a los evaluadores anónimos del manuscrito. La presente publicación hace parte de la tesis doctoral del primer autor.

Referencias

1. A. Ducharmé. *Informe técnico de biología pesquera (Limnología)*. Inderena-FAO. Bogotá, Colombia. 1975. pp. 1-42.
2. G. Roldán, J. Ramírez. *Fundamentos de limnología neotropical*. 2ª ed. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 2008. pp. 268.
3. W. Junk, P. Bayley, R. Sparks. "The flood pulse concept in river -floodplain systems. Dodge, D.P. Proceedings of the international large river symposium". *Can. Sper. Publ. Fish. Aquat. Sci.* Vol. 106. 1989. pp. 110-127.
4. L. Rodrigues, D. Bicudo, V. Moschini. "O papel do perifiton em áreas alagáveis e nos diagnósticos ambientais". *Ecologia e Manejo de Macrófitas Aquáticas* S. Thomaz, L. Bini, eds. 1ª ed. Ed. Eduem. Maringá, Brasil. 2003. pp. 211-229.
5. E. Drago. "The physical limnology of the river-lake systems of the Paraná River floodplain". *Sustaining the ecological integrity of large floodplain rivers*. International Conference, Dep. of Interior. Nat. Biol. Survey. Univ. of Wisconsin. Madison, US. 1994. pp. 83-122.
6. J. Neiff. *Planicies de inundación en macrobahías hidrográficas internacionales: criterios de manejo compartido*. Actas I Seminario de Aguas Continentais no Mercosul. Da Motta Marques (Editor). Porto Alegre, Brasil. 1994. pp. 367-374.

7. J. Neiff. *El régimen de pulsos en ríos y grandes humedales de Sudamérica en: Tópicos sobre humedales subtropicales y templados de Sudamérica*. Málvarez, A (editor). Ed. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe – ORCYT. Montevideo, Uruguay. 1999. pp. 99-149.
8. R. Aguirre, J. Palacio, M. Flórez, A. Wills, O. Caicedo, L. Jiménez, N. Villegas, H. Vargas, C. Palacio, M. Toro, J. Vélez. *Análisis de la relación río-ciénaga y su efecto sobre la producción pesquera en el sistema cenagoso de Ayapel, Colombia*. Universidad de Antioquia-Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 2005. pp. 419.
9. M. Flórez. "Paleoecología de la ciénaga de Ayapel". *Análisis de la relación río-ciénaga y su efecto sobre la producción pesquera en el sistema cenagoso de Ayapel, Colombia*. N. Aguirre (ed.). Universidad de Antioquia-Universidad Nacional. Medellín, Colombia. 2005. pp. 419.
10. S. Chapra. *Surface water quality modeling*. 1ª ed. Ed. Mc Graw Hill. New York, USA. 1997. pp. 844.
11. Y. Montoya, N. Aguirre. "Cambios nictemerales de variables físicas y químicas en la ciénaga de Paticos, complejo cenagoso de Ayapel, Colombia". *Revista de Biología Tropical*. Vol. 57. 2009. pp. 635-646.
12. CIA-CVS. *Estudio de impacto ambiental por minería en la ciénaga de Ayapel*. Vol III. Informe proyecto centro de estudios ambientales. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 1990. pp. 31.
13. C. Rua, J. Palacio. *Comportamiento espacial y temporal de las concentraciones de cadmio, cromo, mercurio y plomo en los sedimentos de la ciénaga de Ayapel - Córdoba, Noroccidente Colombiano*. Investigación de Maestría. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 2009. pp. 90
14. S. Peña. *Comportamiento del carbono orgánico en la ciénaga Ayapel, Colombia*. Trabajo de investigación de maestría. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 2008. pp. 134.
15. J. Álvarez. "Caracterización limnológica de los complejos cenagosos de Arcial-Porro-Cintura (Río San Jorge) y de Baño-Charco Pescado-Pantano Bonito (Río Sinú)". Rangel-ChO, (editor). *Diagnóstico ambiental y plan de manejo humedales de los ríos San Jorge y Sinú*. Ed. Universidad Nacional. Bogotá, Colombia. 2007. pp. 476-509.
16. A. Ramírez, G. Viña. *Limnología Colombiana*. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá, Colombia. 1998. pp. 293.
17. P. Arias. "Las ciénagas en Colombia". *Revista Divulgación Pesquera Inderena*. Vol. 22. 1985. pp. 39-70.
18. C. Cubillos. *Estudio e investigaciones de las obras de restauración ambiental y de navegación del canal del Dique*. Documento técnico. Universidad Nacional-Cormagdalena. Bogotá, Colombia. 2007. pp. 106.
19. W. Junk, K. Wantzen. "The flood pulse concept: new aspects, approaches and applications". Petr T (eds.). *Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries, Volume II. Sustaining livelihoods and biodiversity in the new millennium*. 1ª ed. Ed. Welcomme RL. Phnom Penh, Cambodia. 2003. pp. 117-140.
20. E. Pava, J. Carrasquilla, W. López. "Caracterización de la comunidad fitoplanctónica de un plano de inundación del río Sogamoso en la cuenca media del río Magdalena (Ciénaga de San Silvestre, Colombia)". *Revista Intrópica*. Vol. 3. 2006. pp. 43-57.
21. V. Amaya. *Composición y estructura del fitoperifiton en el Lago Tarapoto (Amazonas-Colombia) durante dos periodos hidrológicos*. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 1999. pp. 94.
22. C. Andramunio. *Estudio de la comunidad fitoperifítica asociada a sustratos naturales durante un periodo hidrológico en el lago Tarapoto (Amazonia Colombiana)*. Tesis de pregrado. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá, Colombia. 2006. pp. 139.
23. F. Esteves. *Fundamentos de limnología*. 2ª ed. Ed. Interciencia. Rio de Janeiro, Brasil. 1998. pp. 409.
24. J. Álvarez. "Caracterización limnológica de los complejos cenagosos de Arcial-Porro-Cintura (Río San Jorge) y de Baño-Charco Pescado-Pantano Bonito (Río Sinú)". Rangel-ChO, (editor). *Diagnóstico ambiental y plan de manejo humedales de los ríos San Jorge y Sinú*. Ed. Universidad Nacional. Bogotá, Colombia. 2007. pp. 476-509.
25. U. Santos, M. Ribeiro. A hidroquímica do rio Solimões-Amazonas. *Acta amazônica*. 1988. pp. 145-172.
26. S. Asprilla, J. Ramírez, G. Roldán. "Caracterización limnológica preliminar de la ciénaga de Jotaudó (Chocó, Colombia)". *Actualidades Biológicas*. Vol. 20. 1998. pp. 87-107.

27. C. Benjumea, N. Aguirre. "*Distribución espacio temporal del nitrógeno y fósforo, y su relación con las condiciones ambientales en el sistema cenagoso de Ayapel*. Córdoba, Colombia". Tesis de maestría. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. pp. 157.
28. N. Garavito. "Cambios fisicoquímicos en suelos inundados I". *Arroz*. Vol. 24. 1976. pp. 32-35.
29. A. Jaramillo. *El Cambio climático y la respuesta en las variaciones sedimentarias en las ciénagas del sur del Cesar*. En: JCh. Donato (Coord.). 1^{er} workshop internacional ecología, biodiversidad y manejo de ríos andinos: cambio climático, agua y sostenibilidad-CLAS -. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2013. pp. 103.
30. Y. Montoya. *Efecto del pulso de inundación en la dinámica algal epifítica en un sistema de lagos de planicie de inundación tropicales (Ciénaga de Ayapel-Colombia)*. Tesis de doctorado. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 2011. pp. 600.