

INFLUENCIA DE PROCESOS AUTÓCTONOS Y ALÓCTONOS SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL EMBALSE PASO BONITO, CIENFUEGOS, CUBA

Carmen BETANCOURT¹ y Roberto SUÁREZ²

¹ Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos Calle 17, esq. Ave 46 s/n, Reparto Reina, Código Postal 55100, Cienfuegos, Cuba. carmen@gestion.ceac.cu

² Universidad de Cienfuegos, Carretera a Rodas km 3, Código Postal 59430, Cienfuegos, Cuba

(Recibido septiembre 2009, aceptado agosto 2010)

Palabras claves: embalse, componentes mayoritarios, lavado, roca, variables

RESUMEN

Esta investigación estuvo dirigida a determinar las características y procesos vinculados con la calidad química del agua del embalse Paso Bonito, fuente de abastecimiento de las ciudades Cienfuegos y Santa Clara. Para el análisis de los componentes mayoritarios se dispuso de mediciones mensuales durante el período 1986-2005, determinándose las características del agua y las correlaciones entre las variables. Las fuentes de incorporación fueron evaluadas mediante los diagramas de Gibbs y triangular, así como a través de relaciones iónicas. El agua resultó no salina, dura, con predominio de los iones calcio y bicarbonato. La calidad química del agua estuvo en correspondencia con la geología de la cuenca que alimenta al embalse y determinada por procesos de lavado de la roca, sin registrar diferencias estadísticamente significativas entre los períodos seco y húmedo, ni comportamiento estacional. Se aplicaron las correlaciones entre variables y el análisis de componentes principales para evaluar las relaciones establecidas en un grupo de variables estudiadas durante 2006 y 2007. Esta base de datos incluyó: pH, oxígeno disuelto, potencial redox, temperatura, nutrientes, hierro y manganeso. Los resultados obtenidos mostraron que la calidad del agua se afectó por procesos de contaminación autóctona, vinculados a estratificación y mezcla del embalse, procesos de contaminación alóctonos relacionados fundamentalmente con aporte de contaminante desde la cuenca y cambios térmicos dentro del embalse.

Keywords: reservoir, major ions, weathering, rock, variables.

ABSTRACT

This research was aimed at determining the characteristics and processes relating with the water quality of Paso Bonito reservoir, which constitutes the water supply of Cienfuegos and Santa Clara cities. The major ions were analyzed by means of monthly measures recorded from 1986 to 2005. The water characteristics and the correlation among variables, which were weak and did not allowed applying data reduction, were also determined. The sources of supply were evaluated using ternary and Gibbs diagrams, as well as the ionic relationships. The water was non-saline, hard, with prevalence of calcium and bicarbonate ions. The chemical quality of the water was in correspondence with the basin geology and dominated by rock weathering. It did not

show any significant difference between the dry and humid periods and any seasonal variation. The relationships among a group of variables during 2006 and 2007 were evaluated applying correlations between them as well as principal component analyses. The database included pH, dissolved oxygen, redox potential, temperature, nutrients, iron and manganese. According to the results, the quality of the water was influenced by autochthonous processes, which are related to stratification and mixtures of the reservoir, allochthonous processes related to the pollution in the basin, and thermal changes in the reservoir.

INTRODUCCIÓN

El análisis del agua revela la presencia de gases, elementos minerales y elementos orgánicos en solución o suspensión. Estos elementos tienen un origen natural y antrópico, y definen la calidad del agua, de acuerdo a los diversos usos posibles (doméstico, industrial y agrícola entre otros).

El estudio de los componentes mayoritarios se usa para entender procesos que influyen en la calidad química del agua, como el lavado de las rocas, la evaporación-cristalización y la lluvia (Gibbs 1970, Singh *et al.* 2005, Anshumali y Ramanathan 2007, Xu *et al.* 2008, Kumar *et al.* 2009). La presencia y proporción de los mismos se relaciona con la geología de las cuencas (McNeil 2005, Rajmohan y Elango 2007, Jha *et al.* 2009), y una de las herramientas aplicadas para estos fines son las relaciones iónicas (Fernández y Miretzky 2004, Das *et al.* 2005, Szramek *et al.* 2007, Hren *et al.* 2007, Al-Rawajfeh y Al-Shamaileh 2007, Ryu y Chang 2007, Ryu *et al.* 2008).

Otras variables empleadas en el estudio de la calidad del agua son la temperatura (T), el pH, oxígeno disuelto (OD) y el potencial redox (Eh), principalmente por su vinculación con el fenómeno altamente complejo de liberación de nutrientes, metales y materia orgánica desde los sedimentos de los embalses (Harris 1999). Nutrientes como el nitrógeno y el fósforo se relacionan con procesos de eutrofización de las aguas y metales como el hierro y el manganeso afectan el olor y sabor del agua y dificultan su tratamiento (McClure 2006).

La complejidad de los procesos ambientales no se evidencia totalmente por el estudio de variables aisladas y puede suceder que procesos subyacentes que ocurren dentro de un embalse queden sin explicación, si no se aplica un apropiado análisis estadístico de los datos obtenidos durante la investigación.

El análisis de componentes principales (ACP) permite evaluar las complejas interacciones que se manifiestan entre las variables químico-físicas y sus impactos sobre la calidad del agua. Por lo tanto, es

una técnica muy usada para el estudio de la calidad del agua (Giussani *et al.* 2006, Henderson 2006, Atobatele y Ugwumba 2008, Marques *et al.* 2008, Mujumdar 2008) que permite la reducción de variables sin perder mucha información contenida en las originales (Hannah *et al.* 2000).

El embalse Paso Bonito es fuente de abastecimiento de la ciudad de Cienfuegos y una parte de la ciudad de Santa Clara y en la cuenca que alimenta el embalse se ubican fuentes contaminantes (cría de ganado vacuno y porcino) que aportan nutrientes y materia orgánica, además también se localiza una antigua mina de pirita que fue explotada mediante galerías en la primera mitad del siglo pasado (Allende 1927).

Sus aguas se estudiaron durante los años 2006 y 2007. En estas investigaciones se verificaron procesos de mezcla en el invierno y durante lluvias intensas, con un patrón de distribución de OD de tipo clinógrado, Eh negativos y altos valores de Fe y Mn durante la estratificación térmica (Betancourt *et al.* 2009a).

En este mismo período se estudiaron los ciclos anuales de nitrógeno y fósforo (Betancourt *et al.* 2009b) y Mn (Betancourt *et al.* 2010). El nitrógeno resultó el nutriente limitante, con un valor bajo de la relación nitrógeno inorgánico total: fósforo total ($N_T:P_T$), mientras que el 52 % de las mediciones de fósforo clasificaron al embalse como eutrófico.

El 87 % de los valores de nitrógeno de nitrito ($N-NO_2$), así como las concentraciones de nitrógeno amoniacal ($N-NH_4$), durante el mes de octubre indicaron contaminación del agua según la Norma Cubana usada (NC 1986), este comportamiento se explicó con las malas prácticas identificadas en el manejo de la cuenca y del embalse según los resultados del diagnóstico.

En el estudio del ciclo del Mn se registraron concentraciones elevadas en la columna de agua para el Fe y el Mn, fundamentalmente en el fondo (Betancourt *et al.* 2010), característico de embalses eutróficos.

El uso de estas aguas para el consumo humano hace necesario el conocimiento de los procesos que

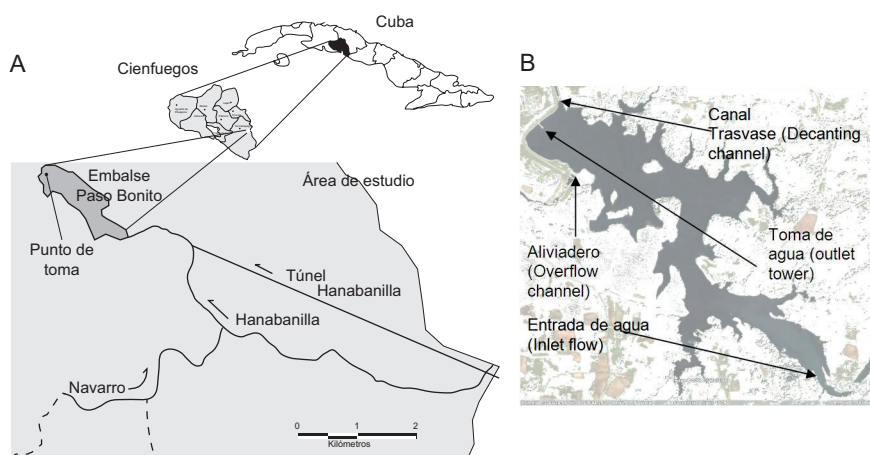


Fig. 1. Área de estudio. A: Embalse Paso Bonito y las principales corrientes de alimentación y B: Foto satelital del embalse con la localización de entradas y salidas

ocurren en la cuenca de alimentación y en el embalse con repercusión en la calidad del agua para poder hacer una correcta gestión del recurso. El objetivo de este trabajo está encaminado a:

1. Determinar las características fisicoquímicas del agua embalsada.
2. Identificar los procesos que ocurren en la cuenca de alimentación y en el embalse con incidencia en la calidad fisicoquímica del agua embalsada.

Los resultados obtenidos permiten identificar por primera vez, procesos que ocurren en la cuenca de alimentación y en el embalse, con repercusión sobre la calidad del agua. También se describen sus características físicas y químicas, aportando herramientas para una correcta gestión del recurso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El embalse Paso Bonito se ubica al sureste de la provincia de Cienfuegos, región centro-sur de Cuba (**Fig. 1**). En este acuatorio se acumulan las aguas procedentes del río Hanabanilla (al cual se le incorpora el arroyo Navarro con abundantes sedimentos), y las aguas procedentes de una hidroeléctrica que se alimenta del embalse Hanabanilla a través de un túnel. Esta entrada de agua constituye el mayor aporte al embalse según Betancourt *et al.* (2009b). La capacidad de almacenamiento del embalse Hanabanilla ($V = 292 \text{ hm}^3$) es 36.5 veces superior a la de Paso bonito ($V = 8 \text{ hm}^3$) por lo que la entrada en mayor proporción del agua de este embalse mitiga el efecto de dilución que

se produce cuando ocurren precipitaciones en la zona.

Su cuenca yace sobre mármoles grises azulosos, esquistos carbonatados y graníticos, esquistos cuarzós moscovíticos con capas aisladas de mármol y rocas magmáticas y se localiza en una zona de montaña y premontaña, lo cual facilita la erosión y el transporte de contaminantes.

En el **cuadro I** se muestran algunas características morfológicas de la cuenca y del embalse. Esta información corresponde a los datos del proyecto constructivo del embalse y procede de la Delegación de Recursos Hidráulicos en Cienfuegos.

CUADRO I. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DEL EMBALSE Y LA CUENCA

Características*	
Área de la cuenca (km^2)	65
Altitud media de la cuenca (m)	187
Altitud del embalse (m)	86.3
Volumen (hm^3)	8
Área (km^2)	1.25
Cota del canal trasvase (msnm)	79.75
Cota punto de toma (msnm)	76.5
Diferencia de altura entre el canal trasvase y el punto de toma (m)	3.25
Longitud del río principal (km)	16.5
Profundidad máxima (m)	19.5
Profundidad media (m)	6.5
Línea de costa (km)	9.56

*Datos tomados del archivo de la Delegación de Recursos Hidráulicos en Cienfuegos

Muestreo y ensayos

La información sobre los componentes mayoritarios procede de la Red de Calidad de las Aguas

de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Cienfuegos y contiene muestras de agua del punto de toma del embalse durante el período 1986-2005, con una periodicidad mensual ($n = 240$). Las variables estudiadas son: conductividad eléctrica (CE), dureza total (D_T) y los iones mayores: HCO_3^- (HCO_3), Cl^- (Cl), SO_4^{2-} (SO_4), Ca^{2+} (Ca), Mg^{2+} (Mg) y $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ (Na+K).

Para el estudio de las variables: T ($^{\circ}\text{C}$), pH (unidades), OD (mg/L), Eh (mV), se hicieron nueve muestras a partir de septiembre de 2006 hasta noviembre de 2007. Las muestras se tomaron primeramente en la superficie y a continuación metro a metro hasta el fondo en un perfil ubicado en el punto de toma del embalse.

El NO_2^- (NO_2), NO_3^- (NO_3), PO_4^{3-} (PO_4), P_T , Fe y Mn, se estudiaron en el mismo período anterior pero las muestras se tomaron en los niveles superficie (0 m), medio (5 m) y fondo (10 m) en la columna de agua del punto de toma del embalse, con una botella Niskin de cinco litros de capacidad. Las muestras de agua no se filtraron para hacer los ensayos.

Las concentraciones de N- NH_4 se determinaron por formación de indofenol azul; el N- NO_2 por diazotación con sulfanilamida; el N- NO_3 por reducción con hidracina; el P- PO_4 se cuantificó por formación de un complejo azul con molibdato de amonio y el P_T por reducción con ácido ascórbico. Las concentraciones de Mn se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica en flama, y el Fe por el método de la ortofenantrolina.

Todos los ensayos se hicieron en el laboratorio del Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, según las especificaciones de APHA (1998).

Análisis estadístico

Para el tratamiento estadístico se aplicó el Statistical Package for Social Sciences (SPSS), versión 15. La existencia de diferencias significativas entre el período húmedo (mayo-octubre) y seco (noviembre-abril) en relación con los componentes mayoritarios, se comprobó mediante la prueba no paramétrica Mann-Whitney para dos muestras independientes, con un nivel de significación de 0.05. Se usó la matriz de correlación de Spearman para las variables que no se distribuyeron normalmente y la matriz de Pearson para las variables con distribución normal. En el estudio de la estacionalidad de los datos se empleó el recurso de los diagramas de secuencia, el correlograma y el periodograma. Para extraer la máxima información ambiental y simplificar la interpretación de los datos se aplicó un análisis factorial por el método de ACP a las variables estudiadas durante los años 2006 y 2007.

RESULTADOS

Composición del agua, comportamiento de los iones mayores, D_T y CE y fuentes de incorporación.

En el **cuadro II** se muestran los estadísticos descriptivos: mínimo, media, máximo y desviación estándar (DE). Los valores medios de la D_T correspondieron a un agua dura de acuerdo a la clasificación de Durfor y Becker (1964).

CUADRO II. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA, DUREZA TOTAL Y LOS IONES MAYORES DEL EMBALSE PASO BONITO

	n	Mínimo	Máximo	Media	DE
CE (micromhos/cm)	240	160	358	257	35.7
HCO_3 (mg/L)	240	70	266	139	20.1
Cl (mg/L)	240	6	25	12	2.5
SO_4 (mg/L)	238	1	22	7	2.7
Ca (mg/L)	240	13	59	39	7.6
Mg (mg/L)	240	1	19	6	2.8
Na+K (mg/L)	240	3	15	7	1.9
D_T (mg/L)	240	65	230	125	20.2

DE: Desviación estándar

El agua resultó no salina, según la media obtenida para la CE y los criterios de clasificación de Seruya y Pollinger (1983). La composición de los iones mayores expresada en mg/L quedó de la siguiente forma: $\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$ y $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$, y el agua clasificó como bicarbonatada cálcica. No se encontraron diferencias significativas en los valores de los componentes mayoritarios del período seco y lluvioso.

El Ca+Mg expresado en meq/L, siempre fue superior al HCO_3 con un valor medio de la diferencia ligeramente inferior en el período lluvioso (0.11 meq/L) en relación al período seco (0.26 meq/L). El déficit de HCO_3 respecto al Ca y Mg, expresa que esta agua además de la dureza temporal posee dureza permanente.

Los componentes mayoritarios están poco correlacionados (**Cuadro III**), sólo 10 relaciones son estadísticamente significativas al nivel 0.01, a pesar del tamaño de la muestra ($n = 240$). Las variables más relacionadas son el Ca y la CE, mientras que el Na+K y el SO_4 , no se correlacionan con ninguna otra variable.

La débil correlación entre los componentes mayoritarios no permitió reducir los datos por la aplicación del ACP. El valor de la medida de adecuación muestral Kaiser-Meyer-Olkin fue inferior a 0.5 y las comunales fueron bajas para la mayoría de las variables.

CUADRO III. MATRIZ DE CORRELACIÓN DE PEARSON PARA LOS IONES MAYORES, LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y LA DUREZA TOTAL

	CE	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na+K	D _T
	(μmhos/cm)				(mg/L)			
CE	1							
HCO ₃	0.205	1						
Cl	0.204	0.034	1					
SO ₄	-0.076	-0.080	0.147	1				
Ca	0.521	0.240	0.176	-0.122	1			
Mg	0.088	0.027	0.036	0.163	-0.215	1		
Na+K	0.066	-0.019	0.074	0.092	-0.103	-0.051	1	
D _T	0.509	0.087	0.216	-0.032	0.663	0.222	-0.146	1

Las correlaciones estadísticamente significativas al nivel 0.01 (bilateral) aparecen en letra negra
n = 240

La aplicación de los diagramas de secuencia, el correlograma y el periodograma a los componentes mayoritarios no mostró comportamiento estacional significativo para estas variables en la etapa estudiada.

Para conocer los procesos químicos vinculados con la calidad del agua del embalse los resultados obtenidos se graficaron en el diagrama de Gibbs (1970). Según este autor existen tres mecanismos naturales que explican la composición química de las aguas: la precipitación atmosférica la solubilización de las rocas y la evaporación-cristalización, que pueden identificarse al graficar las sales solubles totales (SST) vs las razones Na:(Na+Ca) y Cl:(Cl+HCO₃).

En la **figura 2** se graficaron los valores de las SST vs las razones catiónicas y aniónicas para las aguas del embalse Paso Bonito, y todos los puntos se ubican

en la zona identificada por la ocurrencia de procesos de solubilización de las rocas.

Autores como Baca y Threlkeld (2000) prefieren el diagrama triangular para explicar los mecanismos naturales que intervienen en la composición química de las aguas, por incluir un número mayor de iones. Puntos próximos a los vértices correspondientes al Ca y al HCO₃ indican que la calidad química de las aguas se vincula con procesos de meteorización de la roca.

Los resultados alcanzados al emplear esta herramienta son similares a los obtenidos con el modelo de Gibbs (1970), al ubicarse la mayor cantidad de observaciones próximas a los vértices que corresponden a los iones Ca y HCO₃ y al lavado de la roca (**Fig. 3**).

La **figura 4** muestra la relación entre el HCO₃ y la suma de Ca y Mg. Para valores bajos de HCO₃ hay una relación cercana a 1:1 entre las variables, sin embargo a partir de un valor ligeramente superior a los 2 meq/L, los aumentos de Ca y Mg no se corresponden con un aumento de HCO₃. Este comportamiento se señala en la figura con una línea discontinua.

El predominio de los valores de Ca+Mg por encima de la línea 1:1, significa que es más frecuente encontrar Ca y Mg vinculados a otros aniones diferentes al HCO₃, que el HCO₃ asociado a cationes diferentes al Ca y Mg.

El Ca+Mg mostraron una fuerte relación lineal con el total de cationes (TC) que se pone de manifiesto en el elevado valor de la R² (0.957) (**Fig. 5**). Los valores elevados de la media para la razón (Ca+Mg):(Na+K) (8.77) evidencian su alta contribución al total de cationes.

La razón (Na+K):TC alcanzó un valor medio menor (0.11) y de forma similar a la razón (Ca+Mg):(Na+K) no registra diferencias estadísticamente significativas (p<0.05) entre el período húmedo y seco.

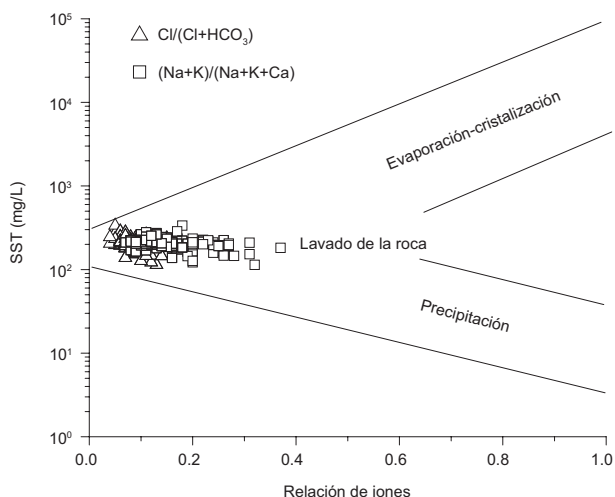


Fig. 2. Representación gráfica de la dependencia entre las sales solubles totales y las relaciones iónicas del agua: SST vs Cl:(Cl+HCO₃) y SST vs (Na+K):(Na+K+Ca)

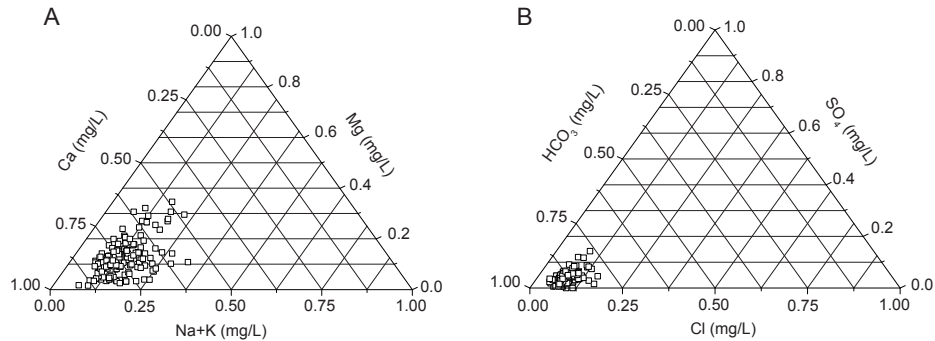


Fig. 3. Composición relativa de aniones y cationes (diagrama triangular) del agua embalsada. Los cationes son representados en A y los aniones en B.

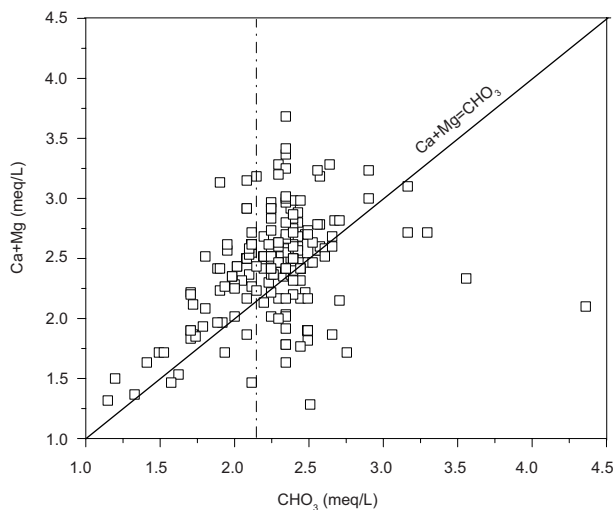


Fig. 4. Relación entre el contenido de HCO₃ y Ca+Mg en el embalse

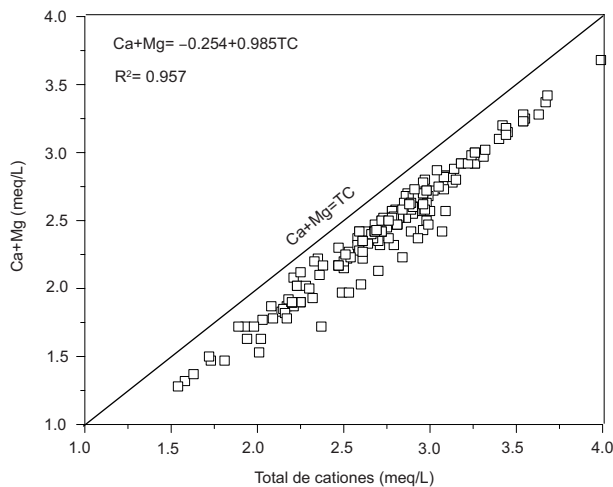


Fig. 5. Relación entre el contenido de Ca+Mg y el TC

La razón Na:Ca = 0.16, obtenida en esta investigación, reveló el lavado de rocas de carbonatos o

silicatos de Ca y Mg. Esta razón, expresa la relación entre la calcita y la halita u otras fuentes de Na y se encuentra en el intervalo de 0.1-0.4 cuando las aguas discurren por carbonatos o silicatos de Ca y Mg (Fagundo 1996).

Relaciones entre las variables estudiadas durante el 2006 y 2007

Estas variables tuvieron una distribución normal por lo que fue posible aplicar la correlación de Pearson. Los parámetros correlacionados significativamente ($p < 0.01$) son el OD, Eh, pH, NH₄, Fe y Mn, mientras que el NO₃, P_T, y la T no se correlacionan con ninguna otra variable (**Cuadro IV**). El valor más alto de r (0.837) corresponde a la relación entre el NH₄ y el pH.

Para estudiar el sistema de relaciones entre estas variables de forma conjunta se aplicó un ACP. En este análisis se excluyeron las variables NO₃ y P_T por registrar una baja correlación con cada uno de los factores extraídos y baja communalidad respectivamente.

Después de eliminar estas dos variables se eligieron tres factores, cuya selección se hizo de acuerdo al número de autovalores mayores que la unidad, y según los criterios que garantizan que la elección del método es adecuada. Las correlaciones de cada variable con el factor extraído son altas (**Cuadro V**); la medida de adecuación muestral (KMO) es superior a 0.50 (0.53); la prueba de esfericidad de Bartlett es inferior a 0.05 (0.00); el determinante está muy próximo a cero (1.61E-5) y las communalidades son superiores a 0.710.

La varianza total es de 85 % y los tres primeros factores extraídos explican el 49.5, 20.8 y 14.7 % respectivamente. El primer factor agrupa las variables OD, pH, Eh, NH₄, Fe y Mn; el segundo al PO₄ y el NO₂ y el tercero incluye solamente a la temperatura.

CUADRO IV. MATRIZ DE CORRELACIÓN DE PEARSON PARA LAS VARIABLES ESTUDIADAS DURANTE EL 2006 Y 2007

	T	OD	Eh	pH	NO ₃	NO ₂	NH ₄	PO ₄	P _T	Fe	Mn
	(°C)	(mg/L)	(mV)					(mg/L)			
T °C	1										
OD	0.027	1									
Eh	-0.079	0.667	1								
pH	-0.123	0.722	0.461	1							
NO ₃	-0.168	-0.194	0.056	-0.168	1						
NO ₂	0.071	-0.121	0.047	-0.370	0.236	1					
NH ₄	0.045	-0.613	-0.712	-0.837	-0.052	0.167	1				
PO ₄	-0.082	-0.061	-0.005	-0.071	0.010	0.747	0.053	1			
P _T	-0.323	-0.330	0.031	0.027	0.077	0.183	-0.084	0.348	1		
Fe	-0.266	-0.578	-0.745	-0.389	0.330	-0.050	0.424	-0.102	0.119	1	
Mn	-0.319	-0.583	-0.764	-0.503	0.247	0.358	0.599	0.326	0.203	0.815	1

Las correlaciones estadísticamente significativas al nivel 0.01 aparecen en letra negra

CUADRO V. MATRIZ DE COMPONENTES

	Componente		
	1	2	3
OD (mg/L)	-0.826	0.099	-0.135
Eh (mV)	-0.884	0.208	0.077
pH	-0.813	0.027	-0.509
NO ₂ (mg/L)	0.304	0.882	0.266
NH ₄ (mg/L)	0.888	-0.207	0.243
PO ₄ (mg/L)	0.140	0.946	-0.081
Fe (mg/L)	0.787	-0.197	-0.356
Mn (mg/L)	0.868	0.229	-0.309
T (°C)	-0.235	-0.117	0.826

DISCUSIÓN

Fuentes de incorporación de los iones mayores y procesos vinculados con la calidad del agua

Las similitudes observadas en los valores de los componentes mayoritarios entre los períodos seco y lluvioso pudieron tener relación con la entrada al embalse de altas proporciones de agua procedente del embalse Hanabanilla. Esta agua, aunque tiene una composición química similar (Sánchez 2000) y procede de la misma cuenca, es hipolimnética, por tanto la influencia sobre la concentración de las referidas variables es menor.

El aumento de los valores de las concentraciones de Ca y Mg sin registrar un aumento proporcional en las concentraciones de HCO₃ (Fig. 4), está relacionado con la presencia en la cuenca de otras fuentes de Ca y Mg diferentes a los carbonatos como son los silicatos. Según Meybeck (1987), el Na y K se originan fundamentalmente del lavado de evaporitas y silicatos, mientras que el Ca y Mg provienen del lavado de carbonatos, evaporitas y silicatos.

La abundante presencia en la cuenca de minerales ricos en Ca y Mg como las rocas carbonatadas y los silicatos puede ser causa de los valores elevados de la razón (Ca+Mg):(Na+K), e indica que el lavado de las rocas es la principal fuente en el aporte de los componentes mayoritarios al agua. Proceso que también es evidente al graficar las SST vs relaciones iónicas en el modelo de Gibbs (1970) y los valores de los iones mayores en el diagrama triangular.

Gao *et al.* (2009), consideran que el lavado químico de las rocas se resume mediante las ecuaciones siguientes:

$$[Ca]_{\text{Agua}} = [Ca]_{\text{Carbonato}}^{SO_2 + CO_2 + FeS_2} + [Ca]_{\text{Silicato}}^{SO_2 + CO_2 + FeS_2} + [Ca]_{\text{Yeso}} \quad (1)$$

$$[Mg]_{\text{Agua}} = [Mg]_{\text{Carbonato}}^{SO_2 + CO_2 + FeS_2} + [Mg]_{\text{Silicato}}^{SO_2 + CO_2 + FeS_2} \quad (2)$$

$$[K]_{\text{Agua}} = [K]_{\text{Silicato}}^{CO_2 + SO_2 + FeS_2} + [K]_{\text{Fertilizantes}} \quad (3)$$

$$[Na]_{\text{Agua}} = [Na]_{\text{Silicato}}^{CO_2 + SO_2 + FeS_2} + [Na]_{\text{Agua de mar lavado de la roca}} \quad (4)$$

$$[Na]_{\text{Agua}} = [Na]_{\text{Silicato}}^{CO_2 + SO_2 + FeS_2} + [Na]_{\text{Agua de mar lavado de la roca}} \quad (4)$$

Los corchetes indican concentraciones molares de los diferentes cationes en las corrientes superficiales. Los superíndices están relacionados con la contribución al lavado de las rocas; CO₂ y SO₂ representan

los aportes de los ácidos carbónico y sulfúrico respectivamente, por precipitación atmosférica; el FeS_2 es el aporte del ácido sulfúrico procedente del lavado de la pirita. Cuando no se escribe superíndice denota la disolución de minerales sin la intervención de los ácidos mencionados, y los subíndices representan las fuentes de cada ión.

La participación del ácido sulfúrico procedente de los yacimientos piritosos en el lavado de silicatos y carbonatos se señala en todas las ecuaciones planteadas por Gao *et al.* (2009). Para el Na y K, no se incluye el lavado de las rocas carbonatadas (ecuaciones 3 y 4), presentes en una gran extensión en la cuenca del embalse, criterio que puede explicar las altas concentraciones de Ca encontradas en el agua, teniendo en cuenta que en la cuenca de alimentación se localiza una antigua mina de pirita.

La intensificación del lavado de las rocas por el ácido sulfúrico procedente de yacimientos piritosos se ha reportado por otros investigadores (Lerman y Wu 2006, Ryu *et al.* 2007).

La baja correlación observada entre los componentes mayoritarios es probable que guarde relación con la geología de la cuenca que alimenta al embalse. La correlación más baja del SO_4 pudiera estar asociada a que los aportes más significativos de este anión procedan de los yacimientos piritosos presentes en la cuenca, lo cual relaciona al SO_4 con el Fe, no con los cationes determinados en los componentes mayoritarios.

Relaciones entre las variables estudiadas durante el 2006 y 2007

La materia orgánica, degradada parcialmente en la columna de agua del embalse, se acumula en los sedimentos y contribuye a la demanda de oxígeno que estos producen (Higashino y Stefan 2005, Matthews y Effler 2006, Beutel *et al.* 2007). Cuando la demanda de oxígeno es mayor que el OD, la oxidación de la materia orgánica se verifica por especies químicas aceptoras de electrones y ocurre un descenso en el Eh (Madigan *et al.* 2003).

Entre las especies mencionadas se encuentran las nitrogenadas y los óxidos de Fe y Mn, que pasan al agua en sus formas reducidas al aceptar electrones de la materia orgánica (Hem 1985). Estos criterios, unido a la disminución de pH que se produce por la liberación de CO_2 durante la oxidación de la materia orgánica, que a su vez favorece la liberación de Fe, Mn y NH_4 , explican la correlación encontrada entre las variables pH, OD, Eh, Mn, Fe y NH_4 .

Estas variables quedaron agrupadas en el primer componente extraído en el ACP y explica procesos de contaminación autóctona que afectan de forma

negativa la calidad del agua embalsada. Los valores más bajos de pH, OD y Eh se registraron durante los procesos de estratificación del embalse (Betancourt *et al.* 2009a), cuando se liberaron desde los sedimentos las mayores concentraciones de NH_4 (Betancourt *et al.* 2009b) y de Fe y Mn (Betancourt *et al.* 2010). Durante los procesos de mezcla se registraron los valores más altos de pH, Eh y OD con los valores más bajos de NH_4 , Fe y Mn.

Los procesos de estratificación y mezcla del embalse se muestran en la **figura 6**.

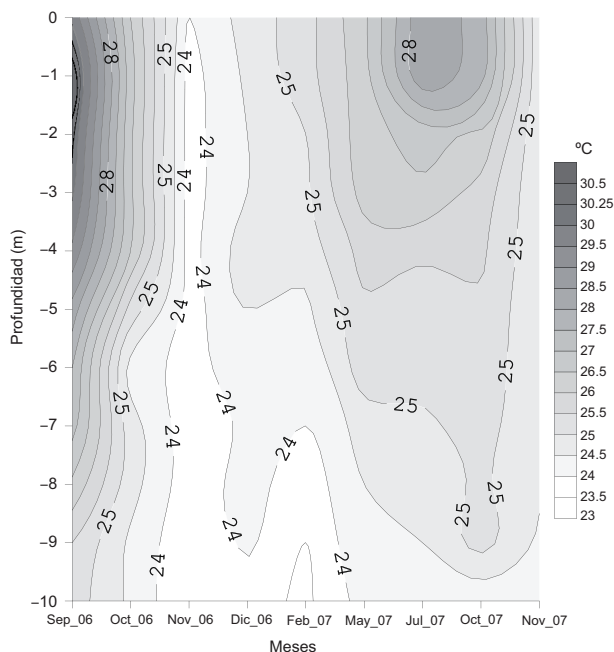


Fig. 6. Ciclo térmico en el embalse Paso Bonito

El segundo factor extraído agrupa al NO_2 y PO_4 y se relaciona con procesos de contaminación alóctona que afectan de forma negativa la calidad del agua embalsada. Según (Betancourt *et al.* 2009b), los valores elevados de estos nutrientes coinciden con muestreos antecedidos por abundantes precipitaciones que arrastraron al embalse residuos procedentes de fuentes contaminantes de origen agropecuario.

La temperatura quedó como única variable en el tercer factor y se relaciona con los cambios térmicos en el embalse. A pesar de que este factor contiene una sola variable, explica el 14.71 % de la varianza total y revela la importancia de esta variable en la calidad del agua embalsada.

El hecho de que el primer factor represente el 49.47 % de la varianza total de los datos indica que los procesos de contaminación autóctona son los más relacionados con la afectación a la calidad del agua del embalse.

El ACP excluyó a las variables P_T y NO_3 , debido quizás a que su ocurrencia en el agua puede estar afectada por otras variables o procesos no considerados en la investigación.

CONCLUSIONES

El agua embalsada es no salina, dura y bicarbonatada cálcica, con una débil correlación entre los componentes mayoritarios analizados que no hizo posible la aplicación del ACP. No se registró estacionalidad en estas variables, lo cual significa que no se afectaron por los cambios estacionales ocurridos durante la etapa en estudio.

El proceso predominante que explicó la composición química de las aguas, específicamente relacionado con los componentes mayoritarios, fue el lavado de la roca, tanto al aplicar el modelo de Gibbs, el diagrama triangular, como las relaciones iónicas.

Los valores de los iones mayores del agua guardaron una estrecha relación con la geología de la cuenca, resultado que se evidenció en todas las relaciones iónicas aplicadas. La suma de Ca y Mg registró valores superiores al HCO_3 y revela la existencia en la cuenca de silicatos de Ca y Mg.

Una alta contribución de Ca y Mg al TC, indica la presencia en la cuenca de minerales con una predominancia en su composición de estos cationes. Los yacimientos piritosos presentes a su vez favorecen el lavado de minerales ricos en Ca. La razón Na:Ca registró valores característicos de aguas que discurren por carbonatos o silicatos de Ca y Mg.

La aplicación del ACP a las otras variables fisicoquímicas estudiadas, mostró que la calidad del agua embalsada está afectada por procesos de contaminación autóctona, relacionado con la mezcla y estratificación del embalse y que se manifiesta a través de las variables pH, OD, Eh, NH_4 , Fe y Mn y otro proceso de contaminación alóctona, relacionado con el aporte de fosfato y nitrito desde la cuenca.

La temperatura resultó una variable a considerar en la calidad del agua al explicar el 14.71 % de la varianza total de los datos, quedando sola en la tercera componente, lo que significa que la calidad del agua se vincula con los cambios térmicos en el embalse.

AGRADECIMIENTOS

Damos gracias a Fanny Jorge Lazo y Ledys Alfonso Padrón por sus colaboraciones en la traducción al

inglés y a Henry Herrera Marrero, por el aporte de ideas para mejorar el estilo del documento.

REFERENCIAS

- Allende R. (1927). Yacimientos minerales de la República de Cuba. Boletín de Minas No: 11. 47 pp.
- Al-Rawajfeh A. y Al-Shamaileh E.M. (2007). Assessment of tap water resources quality and its potential of scale formation and corrosivity in Tafila Province, South Jordan. *Desalination*. 206, 322-332.
- Anshumali y Ramanathan A.L. (2007). Seasonal variation in the major ion chemistry of Pandoh Lake, Mandi District, Himachal Pradesh, India. *Appl. Geochem.* 22, 1736-1747.
- APHA (American Public Health Association) 1998. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20th ed. Washington, DC.
- Atobatele O.E. y Ugwumba O.A. (2008). Seasonal variation in the physicochemistry of a small tropical reservoir (Aiba Reservoir, Iwo, Osun, Nigeria). *African J. Biotechnol.* 7, 1962-1971.
- Baca R.M. y Threlkeld S.T. (2000). Inland dissolved salt chemistry: statistical evaluation of bivariate and ternary diagram models for surface and subsurface waters. *J. Limnol.* 59, 156-166.
- Betancourt C., Suárez R. y Toledo L. (2009a). Patrones de distribución temporal de algunas variables físicas y químicas en el embalse Paso Bonito, Cienfuegos, Cuba. *Limnetica*. 28, 23-34.
- Betancourt C., Suárez R. y Toledo L. (2009b). Ciclo anual del nitrógeno y el fósforo en el embalse Paso Bonito, Cienfuegos, Cuba. *Limnetica*. 28, 79-90.
- Betancourt C., Beutel M.W., Jorge F., Suárez R. y Gebremariam S. (2010). Manganese sources and cycling in a tropical eutrophic water supply reservoir, Paso Bonito Reservoir, Cuba. *Lake and Reserv. Manag.* 26, 1-10.
- Beutel M.W., Hannoun I., Pasek J. y Kavanagh K.B. (2007). Evaluation of hypolimnetic oxygen demand in a large eutrophic raw water reservoir, San Vicente Reservoir, Calif. *J. Environ. Eng.* 133, 130-138.
- Das A., Krishnaswami S., Sarin M.M. y Pande K. (2005). Chemical weathering in the Krishna Basin and Western Ghats of the Deccan Traps, India: Rates of basalt weathering and their controls. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 69, 2067-2084.
- Durfor C.N. y Becker E. (1964). *Public water supplies of the 100 largest cities in the United States, 1962*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1812. 364 p.
- Fagundo J.R., Valdés J.J. y Rodríguez J.E. (1996). Química del agua kárstica. En: *Hidroquímica del Karst*. (J.R.

- Facundo, Ed.). Ed. OSUNA, Universidad de Granada, Vol. 1, pp. 13-212.
- Fernández A. y Miretzky P. (2004). Ionic relations: a tool for studying hydrogeochemical processes in Pampean shallow lakes (Buenos Aires, Argentina). *Quarter. Int.* 114, 113-121.
- Gibbs R.J. (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*. 170, 1088-1090.
- Gao Q., Tao Z., Huang X., Nan L., Yu K. y Wang Z. (2009). Chemical weathering and CO₂ consumption in the Xijiang River basin, South China. *Geomorphology*. 106, 324-332.
- Giussani B., Dossi C., Monticelli D., Pozzi A. y Recchia S. (2006). A chemometric approach to the investigation of major and minor ion chemistry in lake Como (Lombardia, Northern Italy). *Ann. Chim.* 96.
- Hannah D.M., Smith B.P.G., Gurnell A.M. y McGregor G.R. (2000). An approach to hydrograph classification. *Hydrol. Process.* 14, 317-338.
- Harris G.P. (1999). Comparison of the biogeochemistry of lakes and estuaries: ecosystem processes, functional groups, hysteresis effects and interactions between macro and microbiology. *J. Marine Freshwater Res.* 50, 791-811.
- Hem J.D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*, third ed. USGS Water Supply Paper 2254. US Govt. Printing Office, Washington, DC, 263 pp.
- Henderson B. (2006). Exploring between site differences in water quality trends: a functional data analysis approach. *Environmetrics*. 17, 65-80.
- Higashino M. y Stefan H.G. (2005). Sedimentary microbial oxygen demand for laminar flow over a sediment bed of finite length. *Wat. Res.* 39, 3153-3166.
- Hren M.T., Chamberlain C.P., Hilley G.E., Blisniuk P.M. y Bookhagen B. (2007). Major ion chemistry of the Yarlung Tsangpo-Brahmaputra river: Chemical weathering, erosion, and CO₂ consumption in the southern Tibetan plateau and eastern syntaxis of the Himalaya. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 71, 2907-2935.
- Jha P.K., Tiwari J., Singh U.K., Kumar M. y Subramanian V. (2009). Chemical weathering and associated CO₂ consumption in the Godavari river basin, India. *Chem. Geol.* 264, 364-374.
- Kumar P., Tiwari J., Kumar U., Kumar M. y Subramanian V. (2009). Chemical weathering and associated CO₂ consumption in the Godavari river basin, India. *Chem. Geol.* 264, 364-374.
- Lerman A. y Wu L. (2006). CO₂ and sulfuric acid controls of weathering and river water composition. *J. Geochem. Explor.* 88, 427-430.
- Madigan M.T., Martinko J.M. y Parker J. (2003). *Brock Biology of Microorganisms*, 10th ed. Pearson Education Inc., New Jersey, EUA. 576 p.
- Marques E.D., Sella S.M., de Mello W.Z., Lacerda L.D. y Silva-Filho E.V. (2008). Hydrogeochemistry of Sand Pit Lakes at Sepetiba Basin, Rio de Janeiro, Southeastern Brazil. *Water Air Soil Poll.* 189, 21-36.
- Matthews D.A. y Effler S.W. (2006). Assessment of long-term trends in the oxygen resources of a recovering urban lake, Onondaga Lake, New York. *Lake and Reserv. Manag.* 22, 19-32.
- McClure A. (2006). Targeting iron and manganese in drinking water. *Water Wastes Digest.* 46, 28-30.
- McNeil V., Cox M. y Preda M. (2005). Assessment of chemical water types and their spatial variation using multi-stage cluster analysis, Queensland, Australia. *J. Hydrol.* 310, 181-200.
- Meybeck M. (1987). Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *Am. J. Sci.* 287, 401-428.
- Mujumdar P.P. (2008). Implications of climate change for sustainable water resources management in India. *Phys. Chem. Earth.* 33, 354-358.
- NC (NORMA CUBANA). 1986. Fuentes de abastecimiento de agua. Higiene Comunal. Calidad y protección Sanitaria. Oficina Nacional de Normalización. República de Cuba. Marzo de 1987.
- Rajmohan N. y Elango L. (2007). Hydrogeochemistry and its relation to groundwater level fluctuation in the Palar and Cheyyar river basins, southern India. *Hydrol. Process.* 20, 2415-2427.
- Ryu J.S., Lee K.S. y Chang H.W. (2007). Hydrogeochemical and isotopic investigations of the Han River basin, South Korea. *J. Hydrol.* 345, 50-60.
- Ryu J.S., Lee K., Chang H.W. y Shin H.S. (2008). Chemical weathering of carbonates and silicates in the Han River basin, South Korea. *Chem. Geol.* 247, 66-80.
- Sánchez R. (2000). Estudio del embalse Hanabanilla. Informe Científico Técnico. Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos de Villa Clara, Cuba 72 pp.
- Serruya C., Pollinger U. (1983). *Lakes of the warm belt*. Cambridge University Press, Cambridge, 569 pp.
- Singh S.K., Sarin M.M. y France-Lanord C. (2005). Chemical erosion in the eastern Himalaya: Major ion composition of the Brahmaputra and $\delta^{13}\text{C}$ of dissolved inorganic carbon *Geochim. Cosmochim. Acta*. 69, 3573-3588.
- Szramek K., McIntosh J.C., Williams E.L., Kanduc T., Ogrinc N. y Walter L.M. (2007). Relative weathering intensity of calcite versus dolomite in carbonate-bearing temperate zone watersheds: Carbonate geochemistry and fluxes from catchments within the St. Lawrence and Danube river basins, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 8, Q04002, doi:10.1029/2006GC001337. [en línea] <http://www.agu.org/pubs/crossref/14/07/09>.

Xu H., Hou Z., An Z., Liu X. y Dong J. (2008). Major ion chemistry of waters in Lake Qinghai catchments, NE Qinghai-Tibet plateau, China. *Quarter. Int.* (En prensa).