

**PÉRDIDA DE CAPACIDAD DE ALMACENAJE EN EMBALSES CUBANOS.
UN EFECTO DE LA SEDIMENTACIÓN
STORAGE CAPACITY LOST IN CUBAN RESERVOIRS. AN EFFECT OF SEDIMENTATION**

Orlando Laiz Averhoff¹ y Ernesto Flores Valdés

Resumen

Cuba es la mayor de las islas del mar Caribe, está conformada como parte de un archipiélago con 1600 cayos y pequeñas islas. Durante el último siglo (XX), entre las décadas 60s y 90s, se construyeron 239 presas, administradas por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH). En la actualidad todos los embalses construidos tienen un promedio de edad equivalente a 30 años, en general ellos se dividen de la forma siguiente: el 33% tienen <20 años, 26% entre 20-30 años y el 41 con 30-100 años. Las aguas de estos embalses se utilizan para diferentes propósitos, de ellos 160 son para riego, 78 se dedican al suministro a la población e industrias y 1 produce energía eléctrica.

Desde el año 2006 la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana (EIPHH) ha preparado una metodología para realizar una serie de estudios de pérdida de capacidad de almacenamiento debido a los procesos de sedimentación, incluyendo el conocimiento del método batimétrico. Se estudiaron varios casos en diferentes provincias cuyo uso fundamental es el suministro a población.

En este estudio se analizaron 5 embalses en tres provincias, Bacuranao y la Zarza (prov. Ciudad de La Habana), Laguna El Pesquero (Munic. Sandino, prov. Pinar del Río), Paso Bonito (prov. Cienfuegos), La Yaya (prov. Guantánamo).

Unido al estudio de pérdida de capacidad de almacenamiento han sido estimados algunos otros datos referidos al proceso de sedimentación tales como: la edad promedio de estos embalses fue de 35 años, la pérdida de capacidad fue 28,6% para Bacuranao con una pérdida anual promedio de 0,817%, la Zarza 18,5 y una pérdida anual promedio de 0,499%. El Pesquero 28,1 con una pérdida anual promedio de 0,721%, Paso Bonito 37,8 y su pérdida anual promedio fue de 1,145% y la Yaya 21,6 y una pérdida anual promedio de 0,654%. La tasa de sedimentación para las cuencas en estos embalses se ha estimado entre 91.660 a 1.030.559 m³año⁻¹.

Palabras clave: Embalses, sedimentación, capacidad de almacenaje.

Abstract

Cuba is the largest island in the Caribbean Sea; it is conformed as an archipelago with 1600 keys and small islands. During last century (XX) between sixty (60s) and ninety (90s) decades, government represented by National Institute of Hydraulic Resources has constructed 239 dams. Actually all these reservoirs have a mean life of 28 years old in the country, they are divided as: 33% have been constructed with <20 years old, 26% with 20-30 years old and 41% with >30-100 years old. These reservoirs (239) are using to different purposes, 160 have been used to irrigation (Agriculture), 78 are dedicated to water supply and 1 is used to produce energy.

Since 2006, Hydraulic Design and Research Havana Enterprise belongs to National Institute of Hydraulic Resources have prepared a methodology to estimate the lost of storage capacity in Cuban reservoirs due to sedimentation process, including the knowledge bathymetric method. The study cases were in different provinces with different types of reservoirs, all of these have been used to water supplies to populations.

The study of Cuban reservoirs was conducted in five of them located in three provinces from Cuba. Bacuranao and La Zarza were constructed in Ciudad de La Habana; El Pesquero was constructed in Pinar del Rio; Paso Bonito in Cienfuegos and La Yaya in Guantanamo. All of these reservoirs are used to water supply to the population in different cities.

Together with lost of storage capacity have been estimated too some others data referred to sedimentation process as: the mean age of these reservoirs was 35 years old, the storage capacity lost was Bacuranao 28,6% with an annual lost of 0,817%, La Zarza 18,5% with an annual lost of 0,499%, El Pesquero 28,1% with an annual lost of 0,721%, Paso Bonito 37,8% with an annual lost of 1,145%, La Yaya 21,6% with an annual lost of 0,654%. The sedimentation rates for these watersheds were estimated between 91.660 to 1.030.559 m³año⁻¹.

Key Words: Reservoir, Sedimentation, Storage Capacity.

INTRODUCCIÓN

Los embalses desempeñan un papel importante para la sociedad, como control de avenidas, suministro de agua, generación de energía hidroeléctrica,

riego, navegación, recreo, acuicultura, etc. Con el paso del tiempo, en muchos embalses, en especial aquellos construidos en ríos que arrastran grandes volúmenes de sedimentos, se ha observado una cierta reducción de su capacidad de almacenamien-

¹ Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana (EIPHH). Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH)
Teléfono: (537) 8660922; (537) 8642208. Telefax: (537) 8644002 laiz@hidraulicos.cu

to debido a la sedimentación. La UNESCO promovió desde inicios de este siglo la Iniciativa Internacional para la Erosión y la Sedimentación (*ISI*) y en la nuestra región fue constituida la *ISI-LAC*, la cual participa con sus conocimientos en la protección de la cuencas y los embalses.

La sedimentación en embalses es un problema científico (además de ambiental y económico) de gran importancia, pues los embalses pueden definirse como grandes trampas de sedimento que retienen la mayor parte de los materiales transportados por el río. La existencia de batimetrías permite estimar el volumen total de sedimentos depositados en el vaso del embalse e incluso su evolución (CSIC 2003).

La colmatación por sedimentos de un embalse y por ende la pérdida de capacidad de almacenaje de agua, es un proceso complejo que depende de multitud de factores, entre los que se reúnen el tamaño y textura de las partículas de sedimento, las variaciones estacionales que existen en el cauce del río que fluye al embalse, la superficie de la cuenca que vierte al embalse, el tamaño, la forma y el manejo que se haga del mismo y por último como aspecto de gran importancia, la disposición de residuales crudos o con tratamientos incompletos (DGMN 2002), también interviene la cobertura vegetal presente en los suelos de la cuenca hidrográfica tributaria.

En la actualidad los cambios climáticos que se están produciendo en el planeta, con periodos de intensas lluvias y de extremas sequías, que provocan una degradación de los suelos, tanto por la desecación de los suelos como por la erosión, que facilitan tanto la pérdida del espesor de los horizontes del mismo como la transportación de los sedimentos a través de la red de drenaje local hasta los ríos que fluyen hacia los embalses, pueden incrementar los niveles de azolves en estos ecosistemas acuáticos, disminuyendo la capacidad de almacenaje y por tanto su vida útil. Lo cual se traduce en que las precipitaciones son siempre el elemento fundamental que facilita el traslado del sedimento (suelos y otras partículas) hacia los ecosistemas acuáticos lénticos.

La UNESCO (1985) editó una contribución al Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Comisión Internacional sobre la Erosión Continental (J. McManus) y del Centro Internacional de Entrenamiento para el Manejo de los Recursos Hídricos (CEFIGRE: J. Evrard), el mismo puede considerarse como un primer paso a nivel internacional para el conocimiento de la influencia de la sedimentación, su importancia y estudio de este proceso en lagos y embalses.

La acción antrópica continúa influyendo en el nivel de contaminación de las aguas, esta situación cobra mayor importancia tanto en países desarrollados como subdesarrollados. La calidad de las aguas está vinculada además, a las sustancias que se disuelven en ella, al transporte de sedimentos y otros ma-

teriales tóxicos. De esta forma el hombre continúa incrementando y afectando el nivel de eutrofización de las aguas llamadas dulces, aunque en los últimos tiempos estas afectaciones ya se observan en los ambientes costeros.

Las preocupaciones ecológicas y ambientales inciden cada día más en el desarrollo sostenible de las sociedades humanas en todo el mundo, las cuales examinan los efectos para la ecología y el medio ambiente, producto de la erosión de los suelos y la sedimentación en ríos y embalses, así como los posibles beneficios de los sedimentos aprovechados como recurso (Xiaoqing 2003).

Churchill (1948), Brune (1953), Borland & Miller (1958) entre otros, estudiaron los procesos de deposición de sedimentos, para el Buró de Reclamación de Estados Unidos (Bureau of Reclamation 1989), así como, examinaron los métodos, tanto empíricos como numéricos, de estimación de esta deposición a largo plazo en los embalses. Abordaron la gestión de los embalses, haciendo hincapié en la posibilidad de preservar su capacidad para su uso en el futuro y realizaron estudios de casos reales mostrando los problemas relacionados con la sedimentación en los embalses.

En el proceso de acumulación de sedimento se presentan una serie de factores causales para su ocurrencia, destacándose, los siguientes:

- Composición litológica de las formaciones geológicas en el área que ocupa la cuenca hidrográfica;
- Características morfológicas de la cuenca superficial tributaria al embalse, tales como, pendiente, densidad de red fluvial, etc.;
- Uso de la tierra;
- Tipo y extensión de la vegetación natural (cobertura vegetal), que la preserva de la erosión.
- Régimen de precipitaciones que inciden en la región;
- Intervención antrópica en la cuenca hidrográfica;
- Nivel trófico del ecosistema acuático;
- Manejo de las aguas embalsadas.

La exactitud de los datos, lograda a partir de mediciones en tiempo real, es esencial para todos los aspectos de la gestión del conocimiento de la sedimentación y su influencia en el resultado final, referido a la pérdida de capacidad en embalses, empleando la modelación matemática y otros medios informáticos que en la actualidad posibilitan una mayor exactitud en los resultados finales.

La estimación de la pérdida de capacidad de almacenaje en embalses cubanos, es el principal objetivo del estudio que ha continuación presentamos.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

El embalse Bacuranao (Fig. 1,a), se localiza en el este de la provincia Ciudad de La Habana, posee una cuenca hidrográfica de 32 km², se describe como de llanura con colinas bajas (con alturas que varían entre 120 a 30 msnm) su construcción finalizó en 1971 y existe una ligera acción antrópica, sus aguas se utilizan para abasto a zonas poblada de la región este de esta provincia. Este ecosistema acuático se encuentra enclavado entre las elevaciones 17,5 a 39,5 msnm. El río Bacuranao principal afluente posee una extensión equivalente a 62,15 km², con una altura máxima (HMAX) de 150 m, una altura media (HMED) de 49,1 m y su pendiente media es 72%, el río tiene una longitud total de 21,7 km.

La geología de la cuenca está constituida prioritariamente por la Formación Vía Blanca ($K_2^{cp-m} vb$) la cual está compuesta por argilitas, aleurolitas y areniscas de composición grauvacas, de color rojizo verdoso y carmelitoso, con intercalaciones finas de margas (IGP 1994). Edad: Cretácico Superior (Campaniano Superior-Maestrichtiano Inferior). Los suelos son arcillosos de color pardo, en general, del tipo genético húmicos carbonáticos, alcanzando fácilmente una erosión laminar en pendientes suaves. Los poblados principales Peñalver, Arango y el Gandul, el resto esta compuesto por pobladores aislados. Lo principal en esta cuenca es una Procesadora de Rocas (Cantera), con sus molinos de piedra, que se encuentra en uno de los afluentes y por donde se detecta el mayor aporte de sedimentos.

El embalse **La Zarza** (Fig. 1,b), su cierre se efectuó en 1971, se localiza en el municipio Habana del Este, sus aguas se utilizan para el abasto a las poblaciones de Alamar y otros poblados cercanos. Se encuentra enclavado entre las elevaciones 26 a 55 msnm. Este embalse se encuentra en la cuenca del río Guanabo, que a partir de su curso medio superior toma el nombre de arroyo Matadero, el cual se convierte en el afluente principal. El área de la cuenca hidrográfica abarca 31,1 km² encontrándose pobremente antropizada. Se clasifica como de llanura con colinas bajas (alturas máximas de 100 msnm).

Su geología está compuesta por varias formaciones (Chirino [$K_1^a-K_2^{cm} ch$]; La Trampa [$K_2^{cm-t} It$]; Peñalver [$K_2^m pñ$]; Vía Blanca [$K_2^{cp-m} vb$]) y el complejo Ultramáfico [$J_3-K_1 \sigma$], (IGP 1994). Las formaciones provienen fundamentalmente del Cretácico y están compuestas por tobas medias y básicas, conglomerados, gravelitas y argilitas, limolitas, calcarenitas con un complejo no diferenciado con predominio de tectonitas: harzburguitas serpentinizadas y menos frecuente ortopiroxenitas e iherzolitas. Suelos arcillosos pardos del tipo húmicos carbonáticos, con una cobertura vegetal en las elevaciones relativamente densa, los cultivos en la zona son escasos al igual que la población la cual es muy dispersa.

La laguna **El Pesquero** (Fig. 1c), localizada en el municipio Sandino, forma parte del complejo del río Cuyaguaje, prov. Pinar del Río, siendo la misma la mayor de un conjunto de lagunas que se encuentran en esta zona hidrográfica, las cuales están conectadas mediante canales a niveles. Este ecosistema acuático se encuentra enclavado entre las elevaciones 0 a 7,5 msnm. Esta laguna fue cerrada mediante una presa o muro en 1968 y posee una cuenca hidrográfica equivalente a 55,7 km², puede considerarse como un lago aunque ha sufrido alteración producto del cierre. La acción antrópica también es ligera en la cuenca.

La geología está compuesta principalmente por la formación Guane (N_2-Q, gne) se caracteriza por una litología del tipo de arenas síliceas, arcillas arenosas, gravas (angulosas y subangulosas) débilmente cementadas por arcillas. Presentan sus depósitos una estratificación indefinida lenticular y más raramente cruzada. En su parte alta contiene concreciones ferruginosas. Está cubierta discordantemente por sedimentos del Cuaternario ($Q_{3-4} am$) representados por depósitos aluviales-marinos constituidos por arenas finas arcillosas y arcillas arenosas con gravas de cuarzo y pedernales, es en estos últimos donde se enclava la laguna El Pesquero. Sus suelos son cultivados con plantaciones cítrcolas, la población fundamental en la zona son instalaciones educacionales utilizadas para la formación médica de la Escuela Latinoamericana de Medicina (ELAM) y sus aguas se utilizan para abasto a estas escuelas.

En este ecosistema acuático como característica se observó un desarrollo de la vegetación acuática representada por plantas emergentes tales como la *Typha dominguensis*, localizada hacia la zona ribereña de la laguna. En esta zona y hasta los 2 m también se localiza *Limnocharis flava*. A partir de este nivel y en este caso distribuida hasta la mayor profundidad alcanzada (4,8 m), se detectó *Potamogeton sp.*, la cual se enraíza fuertemente en el fondo de la laguna. También se detectó otra planta sumergida que no se enraíza el *Ceratophyllum sp.* de poca abundancia.

El embalse Paso Bonito (Fig. 1,d), localizado en la parte alta del municipio Cumanayagua, provincia Cienfuegos, sus aguas se utilizan para el abasto a las ciudades Cienfuegos y Villa Clara. Este embalse se encuentra en latitudes bajas y fue terminada su construcción en 1974. Este ecosistema acuático se encuentra enclavado entre las elevaciones 65 a 86,3 msnm. Está conectado al macizo montañoso de Guamuhaya y es considerado un embalse pre-montañoso, la influencia antrópica es ligera pero la geología de su cuenca hidrográfica (65,9 km²) es agresiva por el gran aporte de sedimentos en periodos lluviosos.

El principal afluente es el río Hanabanilla con una subcuenca tributaria, el arroyo Navarro. Su geología muy característica compuesta por las rocas más antiguas del archipiélago, del tipo ígneo de composición

mineralógica variadas con edades desde el Jurásico Superior (J_3) al Cretácico Inferior (K_1), tales como el complejo Mabujina, compuesto por anfibolitas de grano grueso derivado de gabros (J_3-K_1 *agr*; J_3-K_1 *ac*; J_3-K_1 *ae*; J_3-K_1 *hb*). Además, se localizan las formaciones Boquerones (J_3 *bq*) compuesta por mármoles esquistosos y esquistos calcíticos, ricos en grafito y mica blanca; Los Cedros (K_1 *lcd*) compuesta por mármoles foliados; La Herradura ($J_1-J_3^{ox}$ *hr*) compuesta por esquistos metaterrígenos cuarcíferos y cuarzo; La Sabina (K *lsb*) compuesta por cuarcitas metasilícicas con intercalaciones de esquistos metapelíticos lustrosos y el grupo San Juan (J_3 *sj*) compuesto por mármoles esquistosos de color negro o gris azulado oscuro, generalmente con grafito disperso o concentrado. Los aportes fundamentales de esta geología se resumen en valores elevados de Fe y Mn muy cercanos a los valores permisibles para el consumo humano.

Los suelos predominantes son loam arcilloso, con una fase poco profunda, sustentado sobre rocas ígneas ultra-básicas de la serie Güaimaro y arcillosos de la serie Najasa con una fase poco profunda y rocosa y por último suelos del tipo escabroso sustentado sobre capas de meteorización granodioríticas

En el embalse **La Yaya** (Fig. 1,e), su cierre se localiza en la provincia Guantánamo. La presa fue concluida en 1975 en el tercio medio superior de la cuenca del río Guantánamo entre la Sierra La Canasta, al noreste, y las estribaciones de la Gran Piedra, al sureste. Este ecosistema acuático se encuentra enclavado entre las elevaciones 38,5 a 85,7 msnm. Describiendo el relieve, llanuras fluviales y terrazas erosivas altas, colinosas, características de una morfología de pre-montañas bajas. El área de la cuenca hidrográfica abarca 555,0 km² y se encuentra medianamente antropizada, aunque su geología influye grandemente en los niveles de sedimentos que se aportan.

La geología de la cuenca está compuesta por varias formaciones: Camarones [P_2^3 *cm*], constituida por conglomerados polimícticos de cantos subredondeados y redondeados y areniscas polimícticas de grano grueso; San Luis [$P_2^2-P_2^3$ *sl*] con areniscas polimícticas, limolitas, margas, arcillas, calizas arcillosas, calizas bio-detriticas, calizas arenosas y conglomerados polimícticos; Puerto Boniato [P_2^2 *pb*] posee alternancia de calizas órgano-detriticas aporcelanadas, algáceas y margas, con intercalaciones de sílice negro-parduzco; y Charco Redondo [P_2^2 *chr*] con presencia de calizas compactas organo-detriticas, fosilíferas, de color variable, (IGP 1994). La edad de estas rocas se encuentra entre el Eoceno medio y el superior.

Los suelos predominantes son pardos con y sin carbonatos, fuertemente laterizados de edad Cuaternario (Q_1-Q_2). La cobertura boscosa corresponde con una vegetación secundaria con árboles entre 8-10 m de altura. Sus aguas se utilizan para riego (cultivos

varios, cítricos y frutales, pastos y forrajes, caña de azúcar y abasto a poblaciones).

METODOLOGÍA EMPLEADA

Para calcular el volumen de agua así como la pérdida de capacidad y la estimación de los volúmenes de sedimentos, se realizó el análisis geomorfológico en las zonas de inundación de cada embalse, permitiendo de esta forma generar las curvas de elevación originales de cada uno de ellos. Se llevaron a cabo las mediciones de profundidad (batimetría) utilizando una ecosonda de navegación tipo Seafarer International, modelo 5, analógica. En un mapa cartográfico digitalizado en Autocad se diseñaron las mallas y transectos a recorrer en cada embalse, comprobando posteriormente estos en el terreno de trabajo. Se utilizó un GPS para obtener la posición de cada transecto y las mediciones efectuadas en cada uno de ellos, medidos en cada acuatorio. Los datos obtenidos tanto en la determinación geomorfológico como en las mediciones batimétricas fueron analizados utilizando los sistemas informáticos Autocad-2007, Surfer 8,02 y el método de interpolación Kriging con malla uniforme de 1 m, este método también fue empleado por Hansen et al. (2007) en México. Se obtuvieron los modelos digitales y matemáticos, para lo cual fueron utilizados diferentes medios informáticos (Autocad-2007; Surfer-8,02; la familia Microsoft Office-2003; Curva-Expert), que permitieron la descripción de las relaciones fundamentales de volúmenes y áreas de cada nivel del embalse.

RESULTADOS OBTENIDOS

El INRH controla en la actualidad 239 embalses, de estas presas la mayoría fueron construidas casi en su totalidad durante el siglo **XX**, la mas antigua es la presa Chalons, terminada en 1906, contando con más de 100 años de explotación. Antes del 1959 se construyeron algo más de 10 embalses en todo el territorio nacional, del total de embalses 26 tienen mas de 30 años, 4 con mas de 40 años, 6 con mas de 50 años, 2 con mas de 70 años y 1 con mas de 80 años, las restantes (199) cuentan con menos de 30 pero mas de 25 años de explotación. (Tabla 2; INRH 2005).

En este estudio sobre pérdida de capacidad fueron analizados un grupo de embalses construidos durante las décadas final de los 60s y principio de los 70s los que tienen un promedio de 35 años de construidos, en la tabla a continuación se muestran los años de uso desde su construcción hasta el pasado 2007.

Bacuranao	El Pesquero	Paso Bonito	La Zarza	La Yaya	Pro-medio
36	39	33	36	32	35

Los estudios geomorfológicos fueron necesarios para establecer las áreas de drenaje del vaso de los embalses y de las cuencas hidrográficas de los mismos así como la reconstrucción de la red de drenaje interior de cada acuatorio. En la medida que se obtuvieron los modelos digitales (MD) de los embalses se comprobaron el nivel de precisión de la información geomorfológica elaborada y las curvas de elevación, alcanzando el mismo entre el 95-96%.

Las lecturas de elevación obtenidas durante las mediciones batimétricas se correspondieron con la elevación de aguas normales (NAN) en casi to-

dos excepto en La Zarza, para la que fue necesario hacer además estudios geológicos y geofísicos para completar la información analizada por métodos batimétricos.

Las mediciones batimétricas para la determinación de las profundidades se hicieron por perfil transversal al embalse según Ramírez y de León (1981) fueron utilizadas en los modelos digitales para estimar los cálculos de volúmenes existentes debido al nivel de sedimentación en cada uno de los embalses, de la forma siguiente:

Embalses	Perfiles o Transectos	Lecturas de Profundidad (*)	Km Recorridos en cada Embalse
Bacuranao	52	15-50	15,2
La Zarza	30	50-60	7,620
El Pesquero	15	35-60	15,276
Paso Bonito	42	40-55	7,198
La Yaya	40	55-100	31,867

(*) = El rango mostrado depende de la distancia recorrida en cada perfil o transecto.

Terminada esta etapa se obtuvieron las ecuaciones que permiten estimar el cálculo del volumen mediante integrales definidas, corroborando los modelos 3D generados a partir de las técnicas geomorfológicas.

Los modelos matemáticos resultantes fueron modelos matemáticos polinomiales de diferentes grados con coeficientes de determinación equivalente entre $R^2 \Rightarrow 1,0$ y $0,9$. Estos modelos se muestran a continuación:

Embalse Bacuranao (Ciudad de La Habana)		
PROYECTO		
$A = -0,1327(h) + 0,4795(h)^2 + 2,2573(h)^3 - 2,9677(h)^4 + 1,5802(h)^5 - 0,2995(h)^6$		
BATIMETRÍA		
$A = -0,0932(h) + 1,4199(h)^2 - 1,321(h)^3 + 0,084(h)^4 + 1,3305(h)^5 - 0,5676(h)^6$		
Coefficiente Determinación	Proyecto $\Rightarrow R^2 = 0,9999$	Batimetría $\Rightarrow R^2 = 0,9996$

Embalse La Zarza (Ciudad de La Habana)		
PROYECTO		
$A = 0,2796(h) - 2,9663(h)^2 + 16,1423(h)^3 - 25,8537(h)^4 + 18,9662(h)^5 - 5,1113(h)^6$		
BATIMETRÍA		
$A = 1,0302(h) - 14,074(h)^2 + 83,028(h)^3 - 176,16(h)^4 + 165,86(h)^5 - 57,025(h)^6$		
Coefficiente Determinación	Proyecto $\Rightarrow R^2 = 0,9999$	Batimetría $\Rightarrow R^2 = 1,0$

Laguna El Pesquero (Pinar del Río)		
PROYECTO		
$A = 2,9807(h) - 3,427(h)^2 + 2,4477(h)^3 - 0,7043(h)^4 + 0,0895(h)^5 - 0,0042(h)^6$		
BATIMETRÍA		
$A = 3,7354(h) - 2,0675(h)^2 + 1,2895(h)^3 - 0,2038(h)^4$		
Coefficiente Determinación	Proyecto $\Rightarrow R^2 = 0,9999$	Batimetría $\Rightarrow R^2 = 0,9909$

Embalse Paso Bonito (Cienfuegos)		
PROYECTO		
$A = -0,2527(h) + 0,7889(h)^2 - 5,0086(h)^3 + 16,7850(h)^4 - 17,9158(h)^5 + 6,3850(h)^6$		
BATIMETRÍA		
$A = 1,019(h) - 4,9111(h)^2 + 9,998(h)^3 + 1,1604(h)^4 - 5,4645(h)^5$		
Coefficiente Determinación	Proyecto $\Rightarrow R^2 = 0,99989$	Batimetría $\Rightarrow R^2 = 1,0$

Embalse La Yaya (Guantánamo)		
PROYECTO		
$A = 2,792(h) - 7,6249(h)^2 + 16,23(h)^3 - 14,201(h)^4 + 8,6787(h)^5 - 2,1791(h)^6$		
BATIMETRÍA		
$A = -0,4707(h) + 0,7697(h)^2 + 3,806(h)^3 - 3,3401(h)^4 + 1,0907(h)^5 - 0,1228(h)^6$		
Coefficiente Determinación	Proyecto $\Rightarrow R^2 = 0,9999$	Batimetría $\Rightarrow R^2 = 0,9991$

En la tabla 3 se muestran las áreas y volúmenes determinadas para el proyecto de cada embalse, y utilizando los modelos matemáticos descritos anteriormente, se calcularon los volúmenes ajustados y los volúmenes de agua actuales, mostrando las diferencias entre los volúmenes estimados por proyecto y los calculados por cada modelo.

Los modelos digitales obtenidos en el proceso geomorfológico fueron posteriormente comparados con los modelos digitales obtenidos del procesamiento de los datos batimétricos hallando de esta forma los volúmenes actuales estimados mediante la integración definida de los modelos de área vs altura. Definiendo además, la elevación del fondo en cada embalse.

Se obtuvieron las nuevas curvas de elevación para cada acuatorio (Fig. 2) y a partir de ellas fueron calculados los modelos matemáticos batimétricos, determinando que en cada caso estudiado había una reducción del área en cada elevación producto de la sedimentación.

Existen muchos métodos para el estudio del proceso de sedimentación en ríos, lagos y embalses, estos se han basado en muchos trabajos realizados principalmente durante el pasado siglo **XX** (U.S.ACE 1989), de estos nombraremos los seis mas relevantes en nuestro modesto parecer **a)- Método del Índice de Avenida, b)- Método del Perfil del Delta, c)- Método del Incremento del Área, d)- Método Empírico de Reducción del Área, e)- Método de Duración de la Elevación del Reservorio y f)- Método de la Eficiencia de la Trampa de Sedimento.** La teoría en la pérdida de capacidad de los embalses producto de los procesos de sedimentación se basa en la consideración de la morfometría del embalse o lago y en la determinación de la tasa de sedimentación anual, consideración que alcanza una mayor exactitud según Borland & Miller (1958) debido a los cambios

de elevación del lecho de los embalses o lagos. En diferentes artículos publicados por el Buró de Reclamación de los Estados Unidos, pioneros entre otros de estos estudios, se describe el desarrollo del Método de Reducción del Área y su modificación (Lara 1962), asumiendo que la curva del elevación-área recientemente generada después de la sedimentación, es paralela a la curva original, la cual es válida para la mayoría de los embalses que se construyen en el mundo, por lo que el método de reducción del área es considerado satisfactorio para determinar la pérdida de capacidad de almacenamiento (Borland & Miller 1958,1960; Lara 1962).

Al respecto, existen muchos cuestionamientos producto de la época en que fue realizado el estudio y muchos investigadores, han comparado sus métodos con los aplicados por esta organización y sus investigadores como fue el caso de Annandale (1984), el cual utilizó el método de Incremento de las áreas y el método descrito por Brune (1953) y, en sus conclusiones describe que el primero puede ser efectivo para algunas regiones del mundo pero en su caso, Sur África, el método que resultó fue el que se basa en los estudios de Brune (1953).

En el caso de la metodología aplicada en Cuba de acuerdo con las condiciones económicas imperantes, decidimos aplicar el método de Reducción del Área, contrastándolo en todo momento con el método Empírico de Reducción del Área realizado por Borland y Miller (1958,1960) y corregido por Lara (1962).

Con base en el método original y las adaptaciones que fueron necesarias realizar, ya que como bien se expresa en USACE (1989), *...los métodos desarrollados no son igualmente buenos para todos los proyectos...*, por lo tanto con esta divisa fue que decidimos desarrollar esta combinación de métodos con el objetivo de lograr los resultados requeridos.

Tabla 1. Parámetros morfométricos de los embalses Cubanos.

Descripción	Unidad	Bacuranao	El Pesquero	Paso Bonito	La Zarza	La Yaya
Coordenadas N	-	365,20	183,40	256,27	362,50	164,40
Coordenadas E	-	374,10	260,00	587,38	382,10	654,30
Volumen NAM (*)	hm3	27	43,81	8,63	22,80	210,00
Área NAM	km2	3,8	11,84	1,28	2,82	15,4
Elevación NAM	msnm	38,65	7,00	85,00	52,50	82,70
Volumen NAN (♣)	hm3	15,71	27,61	8,0	17,2	160,00
Área NAN	km2	2,79	9,76	1,23	2,39	13,3
Elevación NAN	msnm	35,37	5,5	84,5	50,4	79,10
Volumen NM (♦)	hm3	0,49	-	1,63	0,69	14,00
Área NM	km2	0,3	-	0,403	0,247	2,11
Elevación NM	msnm	24	-	76,5	35	58,50
Volumen Útil	hm3	15,22	27,61	6,4	16,51	146,00
Elevación Cauce	msnm	17,5	0	65	26	38,50
Elevación Presa	msnm	39,5	7,5	86,3	55,0	85,70
Profundidad Máxima	m	17,87	7	19,5	24,4	40,60
Profundidad Media	m	5,6	2,8	6,5	7,20	12,03
Profundidad Relativa	%	0,93	0,16	1,55	1,40	0,99
Área de la Cuenca	km2	32	55,7	65,9	31,1	555
Longitud de la Costa	km	22,36	70,6	9,56	17,67	-
Año Captación	Año	1971	1968	1974	1971	1975
Río Afluente	-	Bacuranao	Cuyaguajeje	Hanabanilla Navarro	Río Guana-bo	Río Guan-tánamo

(*) **NAM** → [Elevación de Aguas Máximas]; (♣) **NAN** → [Elevación de Aguas Normales]; (♦) **NM** → [Elevación de Aguas Muertas].

Tabla 2. Resumen nacional de embalses con sus años de explotación (INRH 2005)

Provincias	Embalses	Promedio Años	Cantidad de Embalses					
			>30	>40	>50	>70	>80	>100
Pinar del Río	30	24	9					
La Habana	17	28	5	1				
Ciudad de la Habana	15	28	5					
Matanzas	8	22	2					
Villa Clara	12	35	5	1 Hanabanilla	1		1 Gramal	
Cienfuegos	6	23	1					
Sancti Spiritus	9	27	4					
Ciego de Ávila	6	17	-					

Provincias	Embalses	Promedio Años	Cantidad de Embalses					
			>30	>40	>50	>70	>80	>100
Camagüey	53	30	22	1	4	1 Pontezu- elo		
Las Tunas	23	24	8					
Holguín	18	23	4		1 Caco- yugüín			
Granma	11	23	3					
Santiago de Cuba	11	32	2			1 Charco Mono		1 Chalons
Guantánamo	6	23	2					
Isla de la Juventud	14	34	11	1				
	239	26	83	4	6	2	1	1

NAM = Nivel de aguas máximas; NAN = Nivel de aguas normales (uso); NM = Nivel muerto; Cauce = Nivel del cauce

Tabla 3. Elevaciones, volúmenes y áreas proyectadas y batimétricas en embalses Cubanos.

Embalses	Niveles	Elevación msnm	Proyecto		Batimetria	
			Volumen hm ³	Área km ²	Volumen hm ³	Área km ²
Bacuranao	NAM	38,65	27	3,8	22,08	3,8
	NAN	35,37	15,71	2,791	11,22	2,791
	NM	24	0,49	0,297	0,14	0,1208
	Cauce	18	0	0	0	0
La Zarza	NAM	52,5	22,8	2,82	19,524	2,817
	NAN	50,4	17,2	2,39	14,022	2,39
	NM	35	0,688	0,247	0,099	0,053
	Cauce	26	0,003	0,008	0	0
El Pesquero	NAM	7	43,8	11,84	35,7	11,84
	NAN	5,5	27,7	9,76	19,91	9,76
	NM	-	-	-	-	-
	Cauce	0	0	0	0	0
Paso Bonito	NAM	85	8,625	1,284	5,596	1,284
	NAN	84,5	8	1,227	4,975	1,227
	NM	76,5	1,63	0,403	0,505	0,149
	Cauce	65	0	0	0	0
La Yaya	NAM	82,7	210	15,4	175,99	15,4
	NAN	79,1	160	13,3	125,49	13,3
	NM	58,5	14	2,11	2,51	1,149
	Cauce	38,5	0	0	0	0

Tabla 4 Cuenca hidrográfica (km²) y Pérdida de capacidad (hm³; %) para los volúmenes totales

Parámetros	Bacuranao	La Zarza	El Pesquero	Paso Bonito	La Yaya
Cuenca hidrográfica (km ²)	32,0	31,1	55,7	65,9	555,0
Pérdida total de capacidad (hm ³)	4,49	3,18	7,79	3,02	34,01
Pérdida total de capacidad (%)	28,6	18,5	28,1	37,8	21,6
Pérdida anual de capacidad (%)	0,817	0,499	0,721	1,145	0,654

Tabla 5. Esguerrimiento medio anual hm³, gasto estimado (m³seg⁻¹), módulos de esguerrimiento líquido (L seg⁻¹km⁻²) y sólido (T km⁻²año⁻¹), tasa anual de sedimentación (m³año⁻¹), sólidos en suspensión (g m⁻³) y la vida útil esperada (años).

Parámetros	Unidades	Bacuranao	La Zarza	El Pesquero	Paso Bonito	La Yaya
Esguerrimiento medio anual	hm ³	6,85	7,44	12,2	37,6	126,63
Gasto	m ³ seg ⁻¹	0,208	0,236	0,387	1,192	5,803
Módulo de esguerrimiento líquido	L seg ⁻¹ km ⁻²	6,79	7,59	6,95	18,09	7,23
Modelo de esguerrimiento sólido	T km ⁻² año ⁻¹	18,50	27,60	20,29	147,38	98,47
Tasa anual de sedimentación	m ³ año ⁻¹	128.293	85.894	199.838	91.660	1.030.559
Sólido en suspensión	g m ⁻³	86,4	115,4	258,3	92,7	432,1
Vida útil esperada	años	86-87	99-100	53-54	162-163	120-122

La pérdida de capacidad obtenida en los embalses objeto de estudio se muestran a continuación en la Tabla 4:

Para finalizar el análisis de estos resultados en la Tabla 5 mostramos cálculos de diferentes parámetros a partir de modelos matemáticos empíricos que fueron definidos en periodos de tiempo anteriores por investigadores cubanos (Terterov 1970; Batista 1976; Ramírez y de León 1981; Projorienko et al. 1985).

Los niveles de sedimentos observados por año dependen fundamentalmente de las precipitaciones, la geología y del comportamiento antrópico en la cuenca hidrográfica de los embalses estudiados y estos últimos influyen cuando el uso de los suelos y su cobertura vegetal en la cuenca se encuentra con poco control, situación que al menos en estos acuatorios no presenta afectación crítica. Sin embargo, la geología puede tener una mayor influencia como es el caso del embalse Paso Bonito, el cual además de presentar la mayor pérdida de capacidad total (hm³, %) y anual (%) relativo a su capacidad de almacenaje y a la extensión de su cuenca hidrográfica, lo cual requiere de un análisis profundo para una solución de futuro, por situarse estos embalses entre aquellos que permiten el consumo de agua por una población equivalente a 100.000 habitantes.

La tasa anual de sedimentación promedio obtenida en los embalses estudiados (Tabla 4) no es superior a la obtenida para los embalses en Puerto Rico y esta, expresada en % anual es Loco (1,306), Loiza

(0,951); Dos Bocas (0,857); Guayabal (0,545); Toa Vaca (0,233); Matrullas (0,254); El Guineo (0,250); sin embargo, para los embalses Cubanos (0,767). Como se observa éstos poseen una tasa de sedimentación en el rango promedio de estos 7 embalses en Puerto Rico de 0,628% (Soler-López 2007, 2005, 2004, 2003a, 2003b, 2003c, 2001b).

CONCLUSIONES

1. Los embalses cubanos están perdiendo y han perdido capacidad de almacenaje debido a los procesos de erosión, transporte de sedimentos y sedimentación, algunos de los factores que provocan la misma incluye fundamentalmente: el cambio climático con una magnitud y frecuencia inusual de las precipitaciones, sobre todo aquellas generadas por las tormentas tropicales y los huracanes, el uso de la tierra, la cobertura vegetal y la protección de las cuencas hidrográficas.
2. La pérdida de capacidad medida en los embalses estudiados, permite estimar un promedio anual del 0,767% (promedio=35-años), lo cual puede compararse con otros países del área caribeña, como es el caso de Puerto Rico 0,742% (promedio=53-años) y República Dominicana 1,416% (promedio=16-años). Aunque Cuba ha sido afectada por al menos 23 fenómenos tropicales entre 1980-2008.

3. Este estudio puede convertirse en un llamado de atención para las autoridades competentes cubanas, ya que es necesario continuar aplicando medidas para la protección de las cuencas así como establecer un manejo más eficiente de los embalses con el objetivo de disminuir las tasas de sedimentación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Annandale, G.W. 1984. Predicting the distribution of deposited sediment in southern African reservoirs. Challenges in African Hydrology and Water Resources (Proceedings of the Harare Symposium, July 1984). IAHS Publ. No. 144.
- Batista, J.L. 1976. Escurrimiento Sólido. *Voluntad Hidráulica* Año XIII 37/1976: 62-66
- Borland, W.M. and Miller, C.R. 1958. Distribution of sediment in large reservoirs, *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 84(2).
- Borland, W.M. and C.R. Miller, 1960: Distribution of sediment in large reservoirs. *Transactions, ASCE*, Volume 125.
- Brune, G.M., 1953: Trap efficiency of reservoirs. *Transactions, American Geophysical Union*, Volume 34, Number 3:408-415.
- Bureau of Reclamation, 1989: Design of Small Dams. Third edition, Bureau of Reclamation, United States.
- Churchill, M. A. 1948. Discussion of "Analysis and Use of Reservoir Sedimentation Data," by L. C. Gottschalk, pp 139-140, *Proceedings of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference*, Denver, Colo.
- CSIC 2003. Los efectos del Cambio Global sobre la dinámica de procesos hidrológicos, y geomorfológicos. *Sedimentación en embalses*. <http://www.ipe.csic.es/>
- DGMN 2002. Plan Andaluz de Control de la Desertificación. 19 pp.
- Hansen, A.M., M. van Afferden y F. Torres-Bejarano. 2007. Saneamiento del vaso Cencali, Villahermosa, Tabasco. I. Contaminación y reúso de sedimentos. *Ingeniería Hidráulica en México*, XXII (4): 87-102.
- Lara, J. M. 1962. Revision of the Procedure to Compute Sediment Distribution in Large Reservoirs. US Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Projorienko, S.I., Veliz Cañolo, J. y Pérez Monteagudo, O. 1985. Estudio del escurrimiento de sólidos en suspensión y métodos de cálculo para los ríos de Cuba. *Voluntad Hidráulica* Año XXII 67/1985:10-23.
- Ramirez, J. y de León, G. 1981. Estudios Batimétricos en los embalses. Recomendaciones. *Inst. Hidro-economía, MICONS*. 24 pp.
- Soler-López, L. 2001b. Sedimentation Survey of Lago Loco, Puerto Rico, March-2000
Water Resources Investigations Report 2001-4187. USGS, EUA. 26 pp.
- Soler-López, L. 2003a. Sedimentation Survey of Lago El Guineo, Puerto Rico, October-2001
Water Resources Investigations Report 2003-4093. USGS, EUA. 28 pp.
- Soler-López, L. 2003b. Sedimentation Survey of Lago de Matrullas, Puerto Rico, December-2001
Water Resources Investigations Report 2003-4102. USGS, EUA. 31 pp.
- Soler-López, L. 2003c. Sedimentation History of Lago Guayabal, Puerto Rico, 1913-2001
Water Resources Investigations Report 2003-4198. USGS, EUA. 35 pp.
- Soler-López, L. 2004. Sedimentation Survey of Lago Toa Vaca, Puerto Rico, June-July 2002. *Scientific Investigations Report 2004-5035. USGS, EUA*. 39 pp.
- Soler-López, L. 2005. Sedimentation Survey of Lago Loiza, Puerto Rico, January 2004
Water Resources Investigations Report 2005-5239. USGS, EUA. 34 pp.
- Soler-López, L. 2007. Sedimentation History of Lago Dos Bocas, Puerto Rico, 1942-2005
Scientific Investigations Report 2007-5053. USGS, EUA. 44 pp.
- Terterov, A. 1970. Sedimentos en suspensión de los ríos de Cuba. (mecanografiado) Grupo Hidráulico Nacional.
- UNESCO 1985. Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs. A contribution to the International Hydrological Programme, IHP-II Project A. 2.6.1 Panel Stevan Bruk, Rapporteur. Yugoslav National Committee for the Hydrological Programme. Department of the Jaroslav Černi Institute for the Development of Water Resources. 224 pp.
- (U.S.ACE) U.S. Army Corps of Engineers. 1989. Engineering and Design. sedimentation investigations of rivers and reservoirs. *Engineer Manual 1110-2-4000*. 177 pp.
- Xiaoqing, Yang. 2003. Manual on Sediment Management and Measurement. World Meteorological Organization (WMO-948) Operational Hydrology Report No. 47. Secretariat of the World Meteorological Organization - Geneva - Switzerland.