

Estimación del aporte de la erosión hídrica al azolve del embalse Mampostón

Lic. José Miguel Febles Díaz

Facultad de Geografía, Universidad de la Habana, La Habana, Cuba.

e-mail: jmifebles@gmail.com

Dra. Marina Beatriz Vega Carreño

Departamento de Geociencias, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.

e-mail: mvega@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

Uno de los problemas que afectan a los embalses es su pérdida de capacidad debido a sedimentación en su interior por erosión hídrica de su cuenca tributaria. Se seleccionó el embalse Mampostón en la provincia Mayabeque, Cuba, para estimar las pérdidas de suelo producto de la erosión hídrica de su cuenca tributante, que contribuyen a su azolvamiento. Se aplicó la metodología CORINE para obtener el mapa del Índice de Erosión Actual e identificar los sectores con categorías elevadas donde se trazaron perfiles para cuantificar, con el modelo MMF, el volumen de sedimentos que llega al embalse. Los resultados muestran las laderas Norte y Sur como las más susceptibles a la erosión hídrica con pérdidas de suelo anual de $388,7 \text{ kg/m}^2$ (3887 t/ha), contribuyendo al azolvamiento del embalse en un 0,9% anual.

Palabras clave: azolvamiento embalses, embalse Mampostón, erosión hídrica, metodología CORINE, modelo de erosión de Morgan.

Assessment of soil erosion contribution to Mampostón reservoir sedimentation

ABSTRACT

Reservoir sedimentation is a problem that produces loss of storage capacity in reservoirs. It was selected Mampostón reservoir at Mayabeque province, Cuba, to assess soil losses due to water erosion that produces reservoir sedimentation. It was applied CORINE methodology to obtain actual soil erosion index map and identify the regions of greater categories where profiles were drawn in order to evaluate with Morgan model, the sedimentation that arrives to the reservoir. The results show the north and south hillsides as the most susceptible to water erosion with yearly soil losses of $388,7 \text{ kg/m}^2$ (3887 t/ha) with means 0,9% of reservoir sedimentation per year.

Keywords: reservoir sedimentation, Mampostón reservoir, water erosion, CORINE methodology, Morgan erosion model.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que a menudo afectan a los embalses, es su pérdida de capacidad debido al depósito de sedimento en su interior. A pesar de que como parte del diseño de los embalses se dispone de un volumen para almacenar dichos azolves, muchas veces es rebasado, con la consecuente pérdida de volumen útil del embalse. En otras presas, el volumen reservado para azolves no ha sido sobrepasado en un momento determinado, pero la velocidad con que se pierde hace prever que el embalse perderá capacidad de almacenamiento antes de lo previsto, lo que provocará la disminución de la disponibilidad de agua (Palau 2002).

A nivel internacional, los embalses se están azolvando a una tasa aproximada del uno por ciento al año, lo que implica que para mediados del siglo XXI el almacenamiento mundial de agua sería la mitad del actual (Cotler y González 2010) lo que justifica la necesidad de trabajar en la evaluación del azolvamiento y su control.

La sedimentación de los cuerpos de agua tiene un alto costo ambiental y social. Está asociada con el deterioro de los ríos, el disturbio de los hábitats acuáticos, la disminución de la capacidad de almacenamiento y los costos directos relacionados con la necesidad de dragar las presas (Palau 2002).

El proceso de sedimentación ocurre principalmente por acarreo y transporte de las partículas mediante el flujo de agua, es decir, que está estrechamente ligada al proceso de erosión hídrica de los suelos, que incluye el desprendimiento de partículas y su subsecuente transporte y depósito a lo largo de laderas (Cotler y González 2010). Puede decirse que los embalses funcionan como trampas de sedimentos y varían de acuerdo con el envejecimiento del embalse, deteriorando la cuenca por la incidencia antrópica (Laiz 2009).

En Cuba existe también la problemática de que los embalses estén perdiendo capacidad de almacenaje debido a la sedimentación. Entre los factores que influyen en esta situación están: la geología imperante, las pendientes, el relieve de la cuenca de drenaje, la cobertura vegetal y en especial el uso de la tierra por la agricultura, los asentamientos humanos y la magnitud y frecuencia de las precipitaciones generadas por los huracanes y las depresiones tropicales. A estos factores se le debe adicionar, la erosión hídrica de los suelos (Laiz 2009).

Lograr una efectiva evaluación de los sedimentos que entran en un embalse es sin dudas uno de los aspectos más importante en el estudio del problema del azolvamiento, pero también es una parte difícil de evaluar (González y Rivera 2008).

Para tener información de la disponibilidad real de agua en una presa es necesario el seguimiento de la evolución de los sedimentos en el mismo. Esto puede realizarse por diferentes métodos:

1. Métodos directos: consisten en la medición de sedimentos sobre la corriente a la entrada del embalse o medición directa en el embalse mediante levantamientos batimétricos.
2. Métodos empíricos: se aplican mediante fórmulas empíricas desarrolladas por diferentes investigadores fundamentalmente en los Estados Unidos de América (González y Rivera 2008). Mediante estos métodos no se realiza simulación del proceso erosivo.

3. Aforo del transporte de sedimento en la corriente de entrada .
4. Predicción de azolves, con cualquier método para evaluar la erosión de los suelos.

En Cuba durante los años 1967 – 1991 se construyeron 15 embalses que carecieron de control de azolvamiento. A partir del 2006 la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de la Habana realizó levantamientos batimétricos en esos embalses distribuidos a lo largo de toda Cuba. Los resultados están recogidos en Laiz (2009), con una descripción de las características de diseño de cada embalse y la situación del azolvamiento.

Teniendo en cuenta los problemas que ocasiona el azolvamiento de un embalse y que en Cuba sólo se ha utilizado la batimetría para evaluarlo, se decidió evaluar el azolvamiento al embalse Mampostón que ha perdido desde su construcción en el año 1978 un 22,8% de su capacidad de almacenamiento.

En este trabajo se evaluó el azolvamiento del embalse, mediante la aplicación de un método más económico y reconocido en la literatura especializada, que consiste en evaluar la erosión de los suelos en su cuenca tributaria. Para ello se aplicaron dos métodos, inicialmente, uno cualitativo con el que se cartografió la erosión potencial y actual de los suelos y a partir de la información aportada por este se aplicó a continuación un método cuantitativo. De esta manera la investigación tuvo como objetivo estimar las pérdidas de suelo en los sectores más susceptibles a la erosión hídrica, en la cuenca tributaria del embalse, que contribuyen al azolvamiento de la misma.

CONDICIONES NATURALES

Ubicación de la cuenca

El embalse Mampostón se localiza en la llanura Habana-Matanzas, en la parte sur de las estribaciones de las Escaleras de Jaruco (figura 1), colinda con el Valle del Perú y las mayores alturas están en los 284 msnm. Fue construido con propósitos de riego y posteriormente también ha sido utilizado por la acuicultura extensiva.

Fue concluido en 1978, en el tercio medio de la cuenca del arroyo La Luz, aunque existen varios cursos de agua estacionales, o sea, solo conducen el agua en la época de lluvia. El cierre del embalse se localiza en las coordenadas 347,30 Norte y 389,60 Este. La cuenca hidrográfica es relativamente pequeña con 49,8 km².

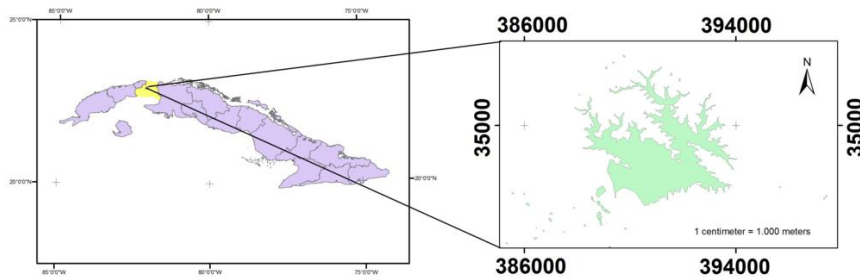


Figura 1. Ubicación del embalse Mampostón

Clima

La región presenta un clima que caracteriza al conjunto del país, el cual puede ser considerado como tropical de humedad alternante, con un período largo lluvioso y uno menos húmedo (cuatro meses). Se estima que la cantidad de precipitaciones que anualmente caen en la provincia de la Habana oscila entre 1 200 y 1 600 mm.

Características geólogo – geomorfológicas

El embalse se encuentra enclavado entre pequeñas elevaciones que oscilan entre 34,2 y 285 m y forman una llanura acumulativa baja con sistemas de terrazas planas. La geología está caracterizada principalmente por la presencia de rocas carbonatadas y siliciclásticas de edad Cretácico – Mioceno.

Suelos

Los suelos más difundidos en la región, son predominantemente los Agrupamientos Ferralíticos, correspondiendo el 37% al tipo Rojo y subtipos asociados y a los Pardos con Carbonatos el 33%.

METODOLOGÍAS EMPLEADAS

Para obtener el mapa del Índice de Erosión Actual, e identificar en el mismo los sectores con categorías elevadas de este índice en la cuenca tributaria del embalse se aplicó la metodología CORINE (1992).

Los mapas del índice de erosión de suelos según la metodología CORINE son el resultado del análisis de datos espacialmente distribuidos de la cobertura edáfica, del relieve, de las precipitaciones y del uso del suelo, en el ambiente de un Sistema de Información Geográfica (SIG), para establecer las categorías de erosión.

Para obtener cada uno de los mapas se realiza la modelación cartográfica en el SIG y se reclasifican los mapas de acuerdo con las clases establecidas por la metodología. El modelo comprende la evaluación de cuatro índices de diagnóstico que se combinan como se muestra en la figura 2 y se expresan a continuación.

- Índice de erodabilidad, definido sobre la base de la textura, profundidad y pedregosidad del suelo.
- Índice de erosividad, calculado a partir del índice modificado de Fournier y el Índice de Aridez de Bagnouls - Gausson.
- Índice topográfico definido en términos del valor de la pendiente del terreno.
- Índice de protección del suelo.

Debido a que la región investigada se caracteriza por una alta pluviometría, se desestimó el cálculo del Índice de Aridez.

A partir del mapa de suelos (Paneque et. al. 1991) se cartografiaron los parámetros que caracterizan al Índice de erodabilidad. Se utilizó la información de 11 pluviómetros de la provincia Mayabeque para calcular el Índice Modificado de Fournier, con los datos de

precipitaciones mensuales en cada una y se obtuvo el mapa del Índice de erosividad. El Índice topográfico se obtuvo a partir del modelo digital de elevación (MDE) elaborado con las hojas cartográficas digitales 3785-I-c; 785-I-d; 3885-III-; 3784-I-a; 3784-I-b; 3844-IV-a; 3784-I-c; 3784-I-d; 3884-IV-c. Del mismo se generó el mapa de pendientes. La protección del suelo se evaluó con el mapa de vegetación.

En los sectores identificados en la cuenca tributaria del embalse, con categorías elevadas en el mapa del Índice de Erosión Actual, se trazaron perfiles para poder aplicar en ellos, el modelo MMF (Morgan 2001) y cuantificar las pérdidas de suelo que contribuyen al azolve del embalse.

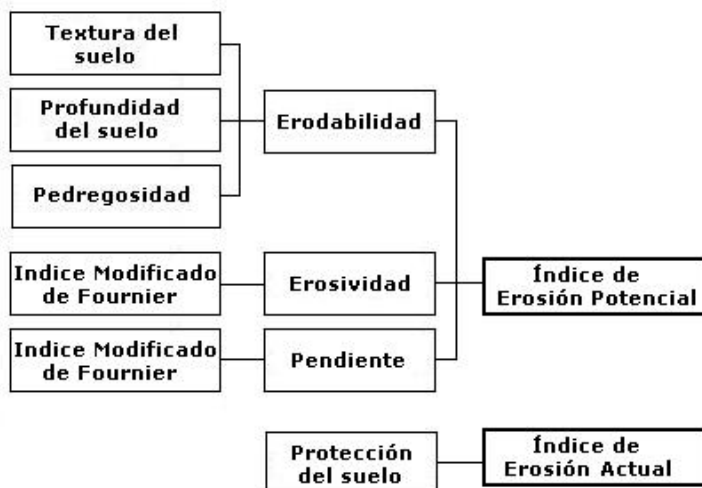


Figura 2. Metodología CORINE (1992)

El modelo MMF posee las facilidades de un enfoque empírico, pero expresa mejor las características del proceso erosivo dividido en dos fases: una hídrica y otra de sedimentos. La figura 3 muestra el diagrama de flujo general del modelo.

En la fase hídrica, la erosión del suelo es el resultado de la desagregación de las partículas debido a la erosión por impacto y el transporte de las mismas por el flujo superficial. En la fase de sedimentos se evalúa la tasa de suelo disperso por salpicadura (F) y la capacidad de transporte del flujo superficial (G).

La energía cinética de la lluvia es el principal factor que influye en el valor de F y la pendiente del terreno es el parámetro fundamental para evaluar G. La predicción final de la pérdida de suelo se realiza comparando los valores obtenidos para la capacidad de transporte del flujo superficial (G) y para la remoción por salpicadura (F). El más bajo de ellos se toma como la tasa de pérdida anual de suelo.

La metodología CORINE y el Modelo MMF han sido empleados con resultados satisfactorios en la provincia Mayabeque para evaluar la erosión de los suelos en regiones cársicas (Vega et al. 2011), (Vega et al. 2013).

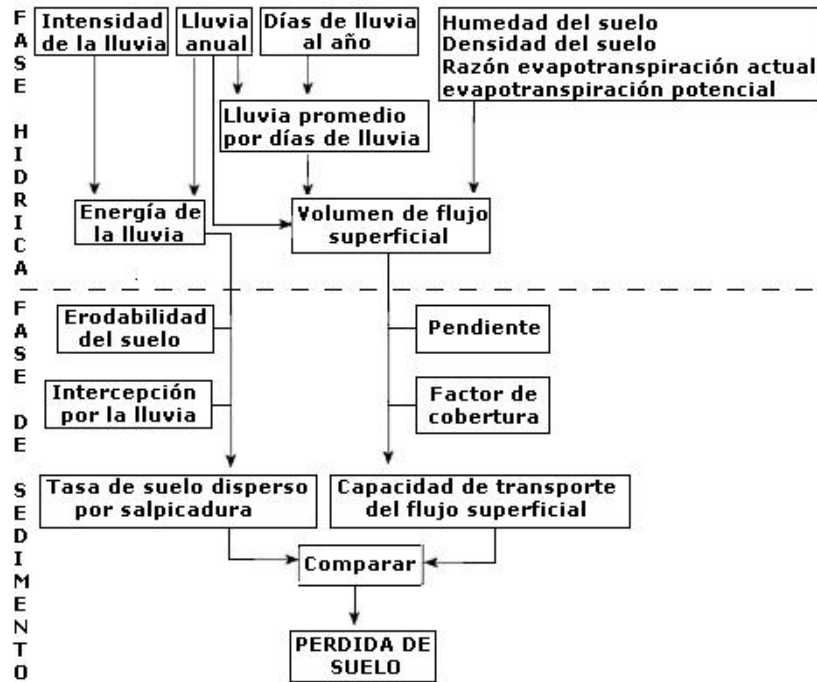


Figura 3. Diagrama de flujo del modelo MMF (Morgan 2001)

MAPA DEL ÍNDICE DE EROSIÓN POTENCIAL DE LA CUENCA MAMPOSTÓN

La integración de los mapas de Índices de Erodabilidad, Erosividad y Topográfico en el SIG permitió obtener los valores de erosión potencial para la región, los cuales fueron clasificados de acuerdo con la tabla 1 para obtener el Índice de Erosión Potencial (figura 4).

Tabla 1. Clasificación del Índice de Erosión Potencial (IEP)

Valores	Descripción	IEP
0 - 5	Bajo	1
8 - 10	Moderado	2
11 - 40	Alto	3

MAPA DEL ÍNDICE DE EROSIÓN ACTUAL DE LA CUENCA MAMPOSTÓN

El mapa del Índice de Erosión Potencial integrado con el mapa del Índice de Protección aportaron los valores de erosión actual para la región, los cuales fueron clasificados de acuerdo con la tabla 2 para obtener el mapa del Índice de Erosión Actual (figura 5).

Tabla 2. Clasificación del Índice de Erosión Actual

Valores	Descripción	Clases del IEA
1 - 2	Bajo	1
3 - 4	Moderado	2
5 - 6	Alto	3

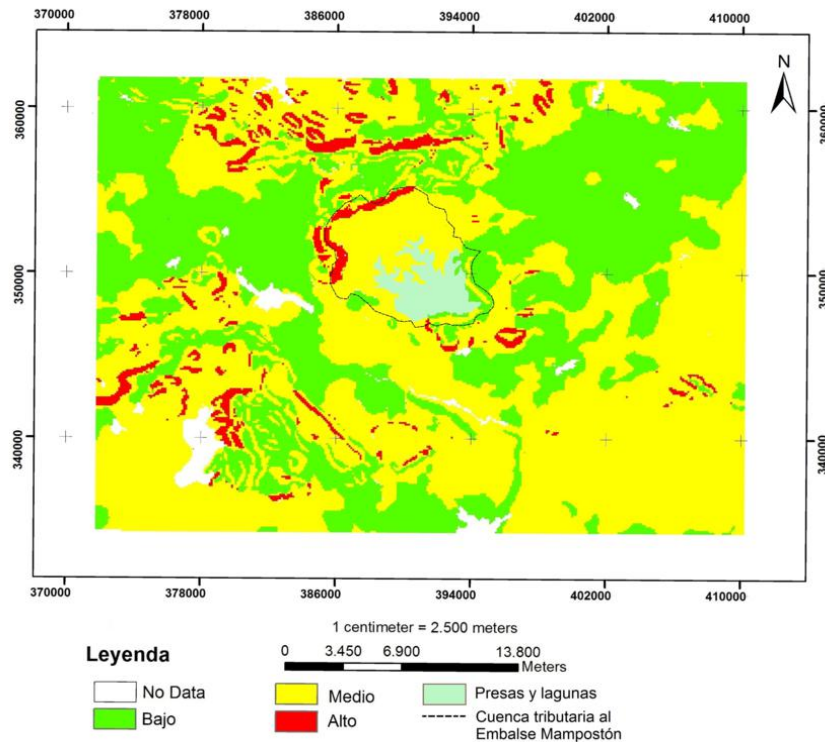


Figura 4. Mapa del Índice de Erosión Potencial

La interpretación de este mapa permitió identificar los sectores con categorías elevadas del Índice de Erosión Actual. En el sector noroeste del embalse tiene categorías de alta a baja mientras que en el sector sureste el índice está categorizado de alto a medio.

Esta interpretación indica que esos sectores son los que aportan un mayor volumen de suelo erosionado a la sedimentación en el embalse lo cual sirvió de base para ubicar los perfiles (figura 6) en los cuales se aplicó el modelo MMF para cuantificar el volumen de suelo removido.

En la figura 7 se presenta a modo de ejemplo, la topografía del perfil 3 al norte del embalse. De igual forma en la figura 8 aparece la topografía del perfil 3 al sur del embalse.

ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE SUELOS EN LAS LADERAS NOROESTE Y SURESTE DEL EMBALSE MAMPOSTÓN

Estimación de la tasa de erosión por impacto (F)

Para ello se evaluó F de acuerdo con el modelo MMF lo que requirió del cálculo previo de algunos parámetros y otros se estimaron a partir de las tablas de valores propuestas por los autores del modelo. En la tabla 3 se presentan los valores utilizados.

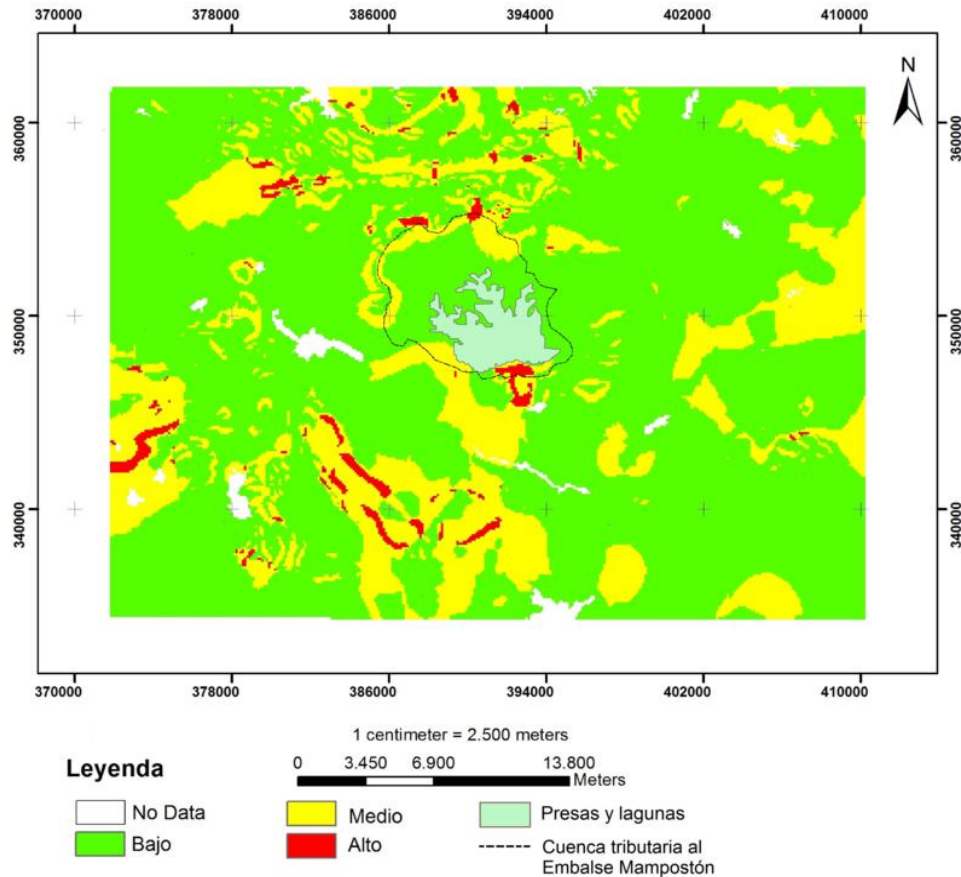


Figura 5. Mapa del Índice de Erosión Actual

Estimación de la capacidad de transporte por el flujo superficial (G)

Para ello se evaluó G según el modelo MMF. De igual manera que en el caso de la evaluación de F (erosión por impacto), algunos parámetros fueron calculados, especialmente la pendiente S y otros estimados de las tablas propuestas para el modelo. En la tabla 4 se presentan los valores obtenidos para la pendiente en cada uno de los perfiles.

Al comparar los valores de F y G se tomaron los de estas últimas como la estimación de las pérdidas de suelos, por ser los menores valores entre los dos parámetros. A partir de los mismos se realizó una interpretación del mecanismo de transporte de los sedimentos los que provocan el azolvamiento del embalse, tomando como base las pérdidas estimadas para cada perfil.

Es de destacar que la erosión es menos marcada en la ladera Sur donde supuestamente debería ser superior la escorrentía producto de una inclinación mayor de la pendiente determinada a partir del MDE. Esto se puede explicar por las características físico - mecánicas de los suelos Húmicos Carbonáticos, ya que presentan un contenido de materia orgánica del 7% (Febles et. al. 2010).

Las pérdidas de suelos estimadas en los cuatro perfiles de la ladera Norte y Sur se multiplicaron por la superficie total de los suelos en cuestión, dando la masa total de erosión en toneladas. A esta masa se le hizo la conversión a unidades volumétricas, mediante el empleo de las densidades de las sustancias.

Se utilizó la densidad del suelo seco. A estos volúmenes se les calculó el tanto por ciento que representa respecto al volumen del nivel de aguas normales de la presa en un año (tabla 5).

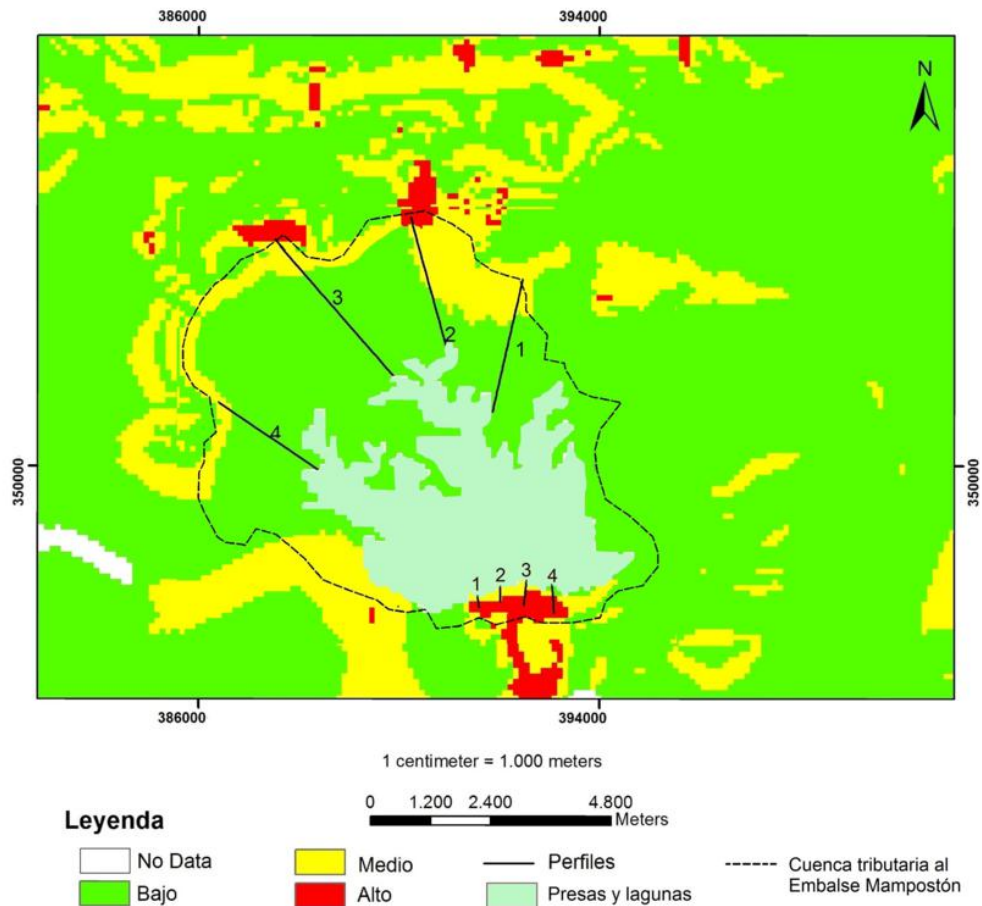


Figura 6. Ubicación de los perfiles

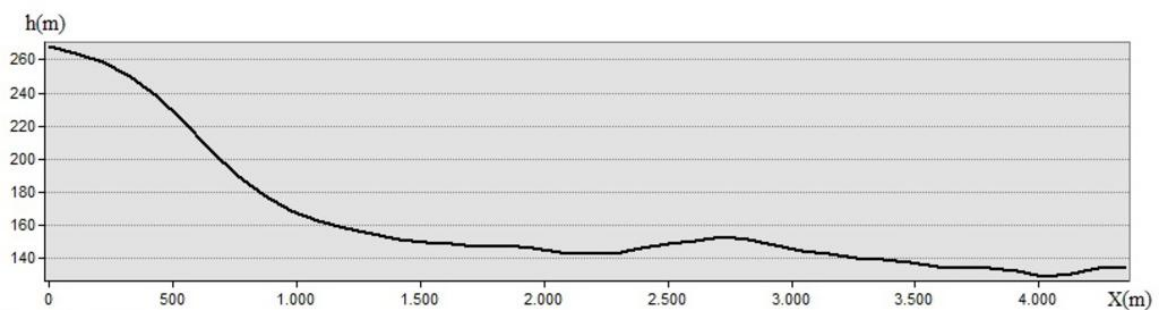


Figura 7. Perfil topográfico 3 al norte del embalse

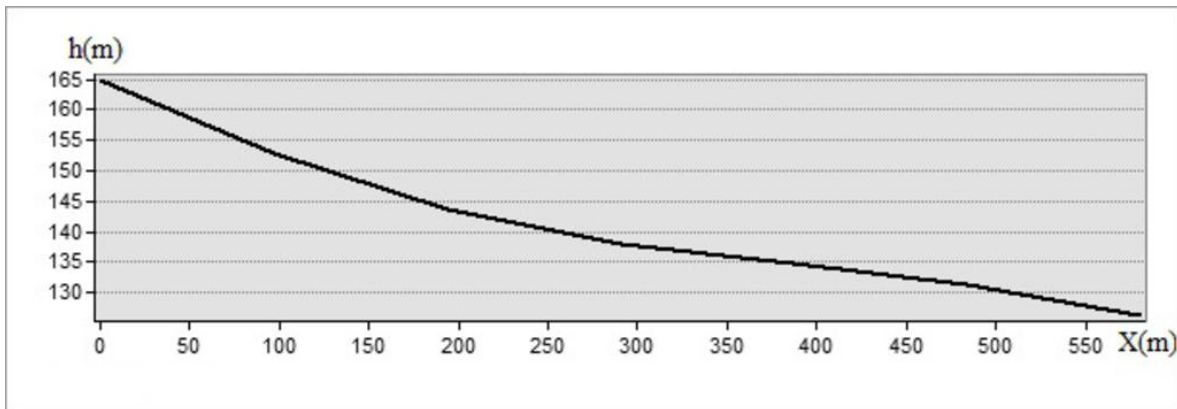


Figura 8. Perfil topográfico 3 al sur del embalse

Tabla 3. Estimación de la tasa de erosión por impacto (F)

Parámetros	Ladera Noroeste	Ladera Sureste	Procedencia de los parámetros
	Tipo de Suelos		
	Pardo con Carbonato	Húmico Carbonático	
E energía cinética de la lluvia	38725,9897 J/m ²	38725,9897 J/m ²	calculada para una intensidad de lluvia erosiva en zonas tropicales de 25 mm/h
K erodabilidad	0.02	0.02	estimado para la textura arcillosa que caracteriza al suelo
A factor de interceptación por la lluvia	25	25	estimado para una ocupación del suelo por diferentes tipos de bosque, , arboledas, maniguas y matorrales; plantaciones latifolias, plantaciones latifolias jóvenes
F	11,095 kg/m ² 110,95 t/ha	11,095 kg/m ² 110,95 t/ha	

El valor de azolvamiento anual obtenido es aproximadamente de 0,9% (tabla 5) que resulta de la aplicación del modelo MMF en los sectores más susceptibles a la erosión hídrica que aportan la mayor cantidad de sedimentos a la presa.

Este es un valor estimado y no representa el total de sedimento que llega a la presa, pues solo corresponde a la cantidad de sedimentos provenientes de las áreas más susceptibles.

En comparación con el valor obtenido de un 1,3%, por batimetría según Laiz (2009) el valor de azolvamiento obtenido de 0,9 % en la presente investigación, por la aplicación del modelo MMF, en los sectores de mayor susceptibilidad a la erosión se puede concluir que las áreas más susceptibles aportan aproximadamente el 70% de los sedimentos que llegan a la presa.

Tabla 4. Valores de la pendiente para el cálculo de G

Parámetro	Ladera Noroeste	Ladera Sureste	
S pendiente	0,03625999	0,06759738	Perfil 1
	0,03692277	0,05095899	Perfil 2
	0,02694462	0,07960741	Perfil 3
	0,03542277	0,08101656	Perfil 4
G	8,79 kg/m ²	1,46 kg/m ²	Perfil 1
	8,95 kg/m ²	1,10 kg/m ²	Perfil 2
	6,53 kg/m ²	1,71 kg/m ²	Perfil 3
	8,59 kg/m ²	1,74 kg/m ²	Perfil 4

Tabla 5. Valores de azolvamiento obtenidos

G	Toneladas al año	Metros cúbicos al año para un suelo seco	Por ciento de azolve de la presa al año para un suelo seco	Totales del porcentaje de azolvamiento anual para un suelo seco	Por ciento de azolvamiento total anual para un suelo seco	
Ladera Norte	439610,754	351952,37	0,22883769	0,85547287	0,88602916	
	447612,77	358358,784	0,23300311			
	326582,278	261461,772	0,17000115			
	429608,234	343944,352	0,22363092			
Ladera Sur	14254,418	11412,0871	0,00742008	0,03054431		
	10739,63	8598,14778	0,00559047			
	16695,243	13366,2115	0,00869064			
	16988,142	13600,7065	0,00884311			

Los porcentos de azolve bajos obtenidos (tabla 5) son debidos a que el embalse se ubica en un sector del relieve donde predomina el transporte, ya que está situada en el tercio medio de la cuenca del arroyo La Luz, con una topografía en el que la longitud de pequeñas pendientes provoca que los volúmenes de sedimentos disminuyan por superficie, y la inclinación moderadas de las mismas en conjunto con la cobertura limitan la energía cinética del agua, lo que brinda un escenario ideal para los bajos volúmenes de sedimentación.

CONCLUSIONES

- La metodología empleada permitió realizar una evaluación cualitativa de la erosión hídrica de los suelos en el entorno del embalse, y permitió estimar el volumen de sedimentos que llegan a la misma.
- Los sectores con mayor susceptibilidad a la erosión hídrica se encuentran en la ladera Norte producto de la longitud de su pendiente y en la ladera Sur producto de su declive.
- Las pérdidas de suelo en las regiones más susceptible a la erosión hídrica en la subcuenca Mampostón, es aproximadamente de $388,7 \text{ kg/m}^2$ (3887 t/ha) al año con lo que contribuyen al azolvamiento del embalse en un 0,9 % anual.
- Los sectores en el entorno del embalse Mampostón que aportan mayor cantidad de sedimentos, representan aproximadamente el 70% del total que llega al embalse.
- Es posible emplear la estimación del azolve de un embalse utilizando métodos que cuantifican la erosión de los suelos su entorno.
- Es posible realizar investigaciones similares en diferentes embalses del país para actualizar los datos de azolvamientos y alargarles la vida útil con volúmenes de agua de calidad.

REFERENCIAS

- CORINE** (1992). "Soil erosion risk and important land resources. An assesment to evaluate and map the distribution of land quality and soil erosion risk". Office of the European Communities. EUR 13233, Luxemburgo, extraído de: <http://reports.eea.eu.int/COR0-s> en mayo 2015.
- Cotler J. y González D. I.** (2010). "Sedimentación potencial de presas en las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorizacion". SEMARNAT, Ciudad México, México, extraído de: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/639> en marzo 2015.
- Febles J. M., Vega M. y Vargas H.** (2010). "Indicadores edáficos para evaluar la erosión de los suelos en áreas pilotos de la provincia La Habana, Cuba". Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, España, extraído de <http://www.usc.es> en marzo 2015.
- González O. y Rivera J. J.** (2008). "Generalización de la fórmula modificada de Gottschalk para la república mexicana", XX Congreso Nacional de Hidráulica, Toluca, México.

Laíz O. (2009). "Estudio capacidad de almacenaje en embalses cubanos". Informe Técnico. Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana, La Habana, Cuba.

Morgan R. P. (2001). "A simple approach to soil loss prediction. a revised Morgan–Morgan–Finney model", *Catena* 44:305 – 322, Elsevier, Netherlands.

Palau A. (2002). "La sedimentación en embalses. Medidas preventivas y correctoras", *Actas del I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente*, tomo 1, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España.

Paneque J., Fuentes E., Mesa A. y Echemendía, A. (1991). "El Mapa Nacional de Suelos Escala 1:25 000", Instituto de Suelos, Ministerio de la Agricultura, La Habana, Cuba.

Vega M. B., Febles J. M., Tolón A. and Lastra X. (2011). "Potential soil erosion assessment through the CORINE methodology in cattle districts of the Mayabeque province, Cuba", *Cuban Journal of Agricultural Science*, 45(4): 423-428, ISSN 0034-7485, Instituto de Ciencia Animal, Ministerio de Educación Superior, La Habana, Cuba.

Vega M. B., Febles J. M., Amaral-Sobrinho N. M. B., Tolón A. and Lastra X. (2013). "Application of the MMF model for soil erosion evaluation in the karstic slopes of the agricultural district Nazareno", *Cuban Journal of Agricultural Science*, 47 (1): 67-73, ISSN 0034-7485, Instituto de Ciencia Animal, Ministerio de Educación Superior, La Habana, Cuba.