



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Facultad de Ciencias Experimentales

Trabajo Fin de Grado

**Aterramiento de embalses:
evolución
morfoosedimentaria de la
transformación de los
pantanos del Alto
Guadalquivir en humedales**

Alumno: José David del Moral Erencia

Junio, 2015



UNIVERSIDAD DE JAÉN
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES
Trabajo Fin de Grado

Aterramiento de embalses: evolución morfosedimentaria de la transformación de los pantanos del Alto Guadalquivir en humedales

A handwritten signature in blue ink, reading 'J. David', enclosed within a blue oval.

JOSÉ DAVID DEL MORAL ERENCIA

Jaén, junio de 2015

ÍNDICE

Resumen	1
Summary	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Problemática del aterramiento	2
1.2. Zona de estudio	3
<i>1.2.1. Cuenca vertiente al embalse</i>	<i>4</i>
<i>1.2.2. Pluviometría</i>	<i>5</i>
<i>1.2.3. Hidrografía</i>	<i>6</i>
<i>1.2.4. Geología</i>	<i>6</i>
<i>1.2.5. Usos del suelo</i>	<i>7</i>
<i>1.2.6. Valor medioambiental</i>	<i>7</i>
2. METODOLOGÍA Y MATERIALES	8
2.1. Análisis de la evolución del aterramiento del embalse de Doña Aldonza	8
2.2. Cálculo de las pérdidas medias anuales de suelo en la cuenca vertiente	10
2.3. Muestreo	12
<i>2.3.1. Toma de muestras</i>	<i>12</i>
<i>2.3.2. Análisis visual del embalse en el estado actual</i>	<i>13</i>
2.4. Cálculo de la densidad real del sedimento	13
2.5. Cálculo de la densidad aparente del sedimento	14
<i>2.5.1. Cálculo de la densidad aparente del sedimento</i>	<i>14</i>

2.5.2. Cálculo de la masa de sedimentos en el embalse	15
2.6. Estimación de la degradación específica de la cuenca	15
2.6.1. Degradación específica de la cuenca vertiente	16
2.6.2. Coeficiente de entrega de sedimentos (CES)	16
3. RESULTADOS	17
3.1. Evolución morfosedimentaria del aterramiento del embalse de Doña Aldonza.	17
3.1.1. Situación pre-embalse (1945)	17
3.1.2. Estado inicial (1956)	18
3.1.3. Primera fase (1956-1977)	19
3.1.4. Segunda fase (1977-1985)	23
3.1.5. Fase final (1985-2010)	24
3.2. Cálculo de las pérdidas medias anuales de suelo en la cuenca vertiente	28
3.3. Densidad real del sedimento	31
3.4. Densidad aparente del sedimento	31
3.5. Estimación de la degradación específica de la cuenca	32
3.5.1. Degradación específica de la cuenca vertiente	32
3.5.2. Coeficiente de entrega de sedimentos (CES)	32
4. DISCUSIÓN	33
5. CONCLUSIONES	37
Agradecimientos	38
6. BIBLIOGRAFÍA	38

Resumen

Los embalses de Doña Aldonza, Pedro Marín y Puente de la Cerrada, situados en el tramo alto del río Guadalquivir, fueron construidos en la década de los años 50 y 60. Desde entonces han experimentado un proceso de aterramiento hasta encontrarse hoy en día colmatados prácticamente en su totalidad. Mediante este trabajo se ha descrito la evolución morfosedimentaria del proceso de aterramiento del embalse de Doña Aldonza, el de mayor capacidad de los tres embalses, mediante ortofotografías aéreas y cálculo de parámetros relacionados con la generación de sedimentos en la cuenca vertiente y posterior transporte al embalse. Con estos datos se ha deducido que el proceso de colmatación del embalse de Doña Aldonza se produjo mayoritariamente entre los años 1960 y 1980, afectando muy negativamente a los fines de explotación por el cual el embalse fue ejecutado.

Summary

Reservoirs Doña Aldonza, Pedro Marin and Puente de la Cerrada, located in the upper reaches of the Guadalquivir river, were built in the decade of the 50s and 60s. Since then they have undergone a process of silting up now found almost entirely silted. Through this work described the morphological evolution of sedimentary process of silting of the reservoir of Doña Aldonza, with the largest capacity of the three reservoirs, using aerial orthophotos and calculation of parameters related to the generation of sediment in the reservoir basin and subsequent transport to the reservoir. With this data has been deduced that the process of silting of the reservoir of Doña Aldonza occurred mostly between 1960 and 1980, negatively affecting negatively affecting the targets of exploitation that led to the construction of the reservoir.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Problemática del aterramiento

El aterramiento de embalses es un proceso producido por la sedimentación continuada de las partículas que transporta una masa de agua al entrar en contacto con la masa de agua embalsada. La velocidad de la masa de agua entrante al embalse se reduce drásticamente perdiendo la capacidad para transportar sedimentos, depositando inmediatamente los sedimentos más gruesos y distribuyendo los sedimentos de tamaño intermedio por el vaso del embalse en función de las corrientes del mismo.(Cobo et al., 2008).

Los efectos directos de esta problemática se ha descrito a nivel global con una reducción del 1% anual en la capacidad de almacenamiento de agua en los embalses (Lajczak 1994; Einsele and Hinderer 1997), siendo peores los efectos en áreas mediterráneas caracterizadas por la alternancia de sequías frecuentes y episodios de lluvias torrenciales que incrementan el aporte de sedimentos a los embalses (García García et al., 2009).

Como efectos indirectos derivados del aterramiento de embalses se pueden reseñar la reducción del abastecimiento de agua a las actividades agrícolas, industriales y para uso doméstico. Así como el coste de las actuaciones que se llevan a cabo para minimizar dicha problemática y evitar la inutilización final de la presa, tales como dragado por succión o actuaciones mecánicas (Rafael Cobo et al., 2008) cuyo coste afecta tanto a la rentabilidad inicial de la obra como a la explotación de la misma (Palau Ybars et al., 2002).

En España se ha estudiado la pérdida de la capacidad de acumulación de agua por aterramiento en 109 embalses, cuya superficie de las cuencas vertientes es el 45% del área del país. En 98 de ellos se ha demostrado que tienen una pérdida anual inferior al 1%, estando 12 embalses entre 1-5% de pérdida anual de acumulación de agua por lo que se habrían perdido a fecha 2002 4.335 hm³ sobre un total de 51.653 hm³ (Avendaño et al., 2002).

Las estimaciones futuras reflejan que hacia el año 2025 se habrán perdido 6.384 hm³ sobre 51.653 hm³ (Cobo et al., 2008) por lo que se progresivamente se irá disminuyendo la capacidad de acumulación de agua de nuestras presas agravando los efectos comentados anteriormente y aumentando el coste para minimizar dichos efectos.

1.2. Zona de estudio

La zona de estudio se encuentra en el curso alto de río Guadalquivir, dentro de la provincia de Jaén (Andalucía, España). Comprende un conjunto de embalses alineados de este a oeste (Puente de la Cerrada, Doña Aldonza y Pedro Marín) en el curso del río Guadalquivir cuya finalidad es la obtención de energía hidroeléctrica y el abastecimiento de agua (según el inventario de presas y embalses andaluces).

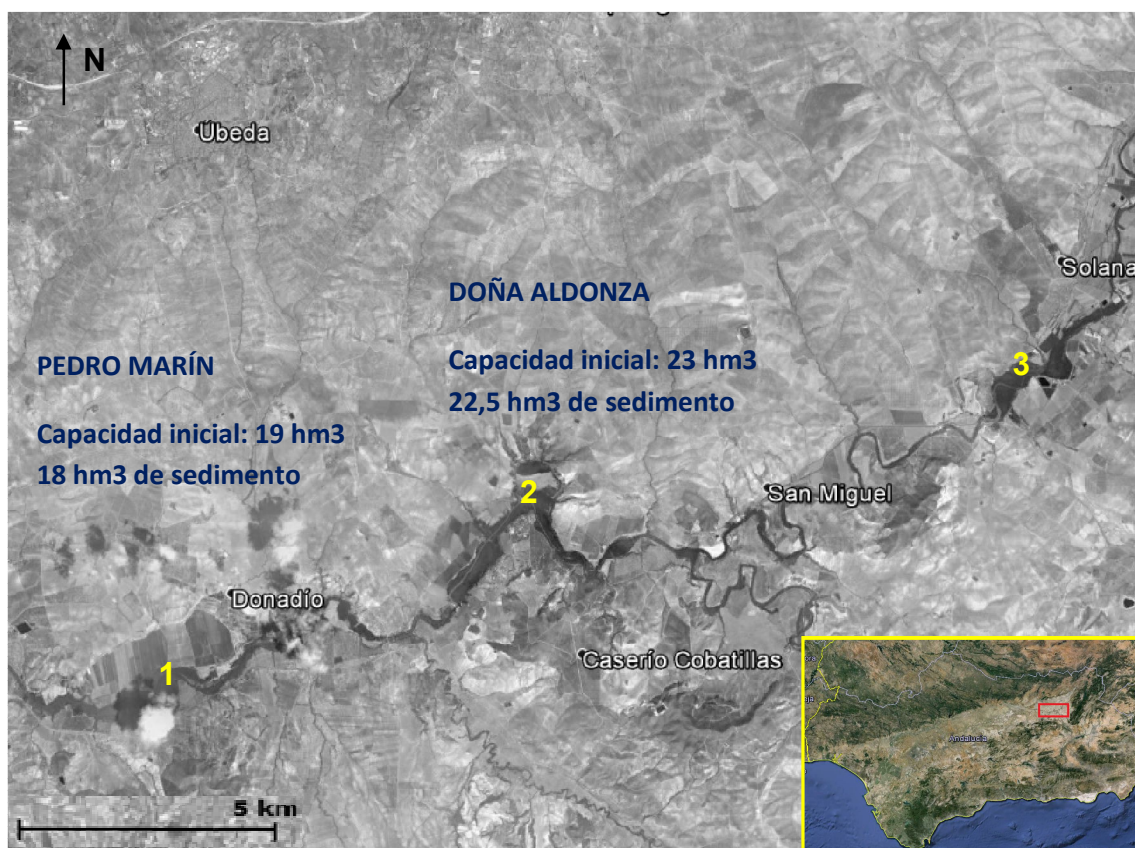


Figura 1. Mapa de la zona de estudio y su situación respecto a la comunidad autónoma Andaluza. 1) Embalse de Pedro Marín, 2) Embalse de Doña Aldonza, 3)

Embalse de Puente de la Cerrada (Fuente: Google Earth). Sobre la imagen volumen aterrado a fecha 2002 (Avendaño et al., 2002).

El inicio de la explotación de los embalses se remonta a los años 50 y 60 (1955 Doña Aldonza, 1955 Pedro Marín, 1963 Puente de la Cerrada.). Los embalses son de una capacidad baja, concretamente menor de 25 hm³, siendo el de Doña Aldonza el mayor con una capacidad de 23 hm³ y el menor el de Puente de la Cerrada con 8 hm³ (datos del Inventario de presas y embalses andaluces)

A partir del inicio de su explotación han sufrido un importante proceso de aterramiento encontrándose en su actualidad rellenos de sedimentos en la totalidad de su superficie. A fecha 2002 Pedro Marín habría sufrido la pérdida del 94,2% de su capacidad de almacenamiento de agua y Doña Aldonza el 97,6% no habiendo datos para el embalse de Puente de la Cerrada. Ambos embalses habían presentado una tasa anual media de pérdida de capacidad de almacenamiento de agua desde el inicio de la explotación mayor al 4%, siendo 4,09% para Pedro Marín y 4,43% para Doña Aldonza. (Avendaño et al., 2002).

El estudio se focaliza en el análisis del proceso y evolución del aterramiento en el embalse de Doña Aldonza debido a que presenta la mayor pérdida de capacidad de almacenamiento de agua y mayor velocidad de aterramiento desde el inicio de su explotación pese a ser el que más capacidad posee de los tres situados en la zona de estudio, además presenta una ubicación estratégica al ser el primer embalse situado posterior a la unión del río Guadalquivir con el río Guadiana Menor, uno de sus principales afluentes.

1.2.1. Cuenca vertiente al embalse

La cuenca vertiente al embalse de Doña Aldonza anterior al 1985 comprendía parte de la cabecera del Guadalquivir y de la cuenca del Guadiana Menor, teniendo una superficie de 12.477 km² (datos del Inventario de presas y embalses andaluces) en la que abarcaba sistemas montañosos y altiplanos importantes como Sierra de Cazorla, Sierra de Baza y las hoyas de Guadix y Baza.

A partir de 1985 con la construcción del embalse de Negratín se redujo la superficie de la cuenca vertiente al embalse de Doña Aldonza a 8.600 km² (datos del Inventario de presas y embalses andaluces) afectando mayoritariamente a la cuenca del Guadiana Menor, quedando áreas excluidas de la cuenca vertiente como la Sierra de Baza, que se integraban en la cuenca vertiente del embalse del Negratín.

1.2.2. Pluviometría

Se ha tomado de referencia la estación meteorológica más cercana al embalse de Doña Aldonza, situada en el embalse de Pedro Marín (Indicativo 5159I) con período de datos entre 1960 y 1996.

La zona de estudio presenta clima mediterráneo, caracterizado por la irregularidad anual de precipitaciones, alternando períodos de sequía con períodos de altas precipitaciones. La media pluviométrica de los datos disponibles se sitúa en 410mm, encontrándose los dos años más húmedos de la serie dentro de la década de los 60 (**Figura 2**).

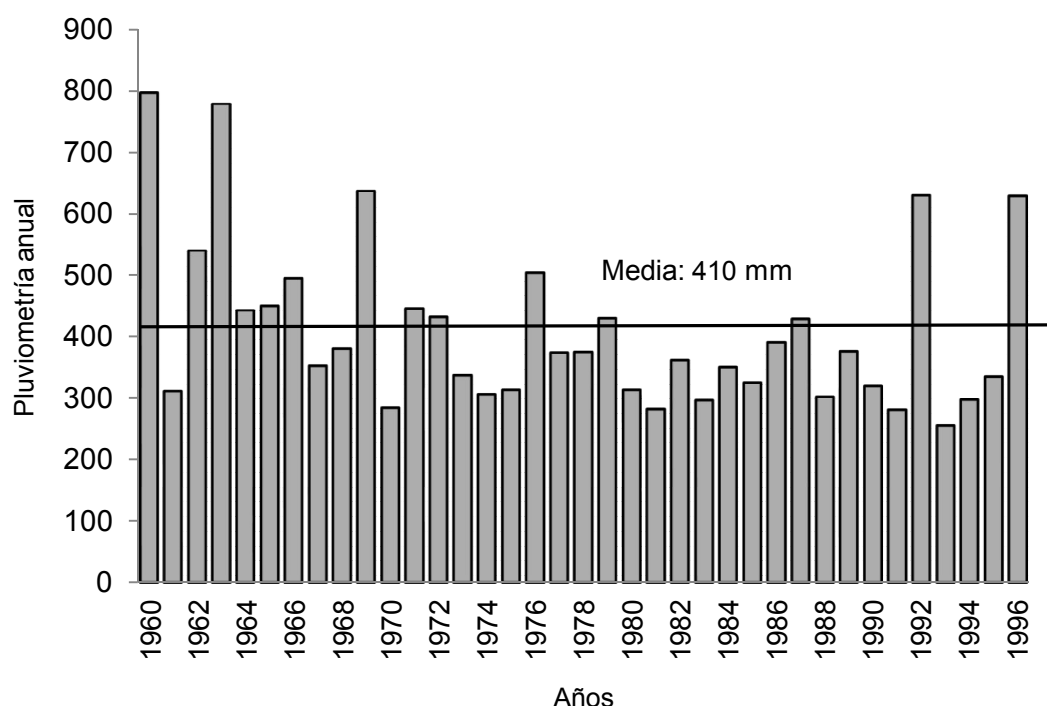


Figura 2. Pluviometría de la estación 5159I (Pedro Marín) durante los años 1960 y 1996 así como la media en dicho período (Datos obtenidos de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir).

1.2.3. Hidrografía

El embalse de Doña Aldonza recibe aportes hídricos fundamentalmente del río Guadiana Menor y del Río Guadalquivir. El caudal medio anual de aportación de agua a la entrada del embalse se sitúa en 25 m³/s (según el Mapa Hidrogeológico elaborado por el Instituto Geológico y Minero de España).

Dentro del vaso del embalse se recibe aportación de agua de dos arroyos transversales, el Arroyo de las Chozas y el Arroyo de la Minilla (**Figura 3**).



Figura 3. Red hidrográfica vertiente al vaso de embalse de Doña Aldonza. Punto 1: Río Guadalquivir, punto 2: Arroyo de la Minilla, punto 3: Arroyo de las Chozas. (Fuente: IDEAndalucía)

1.2.4. Geología

El embalse de Doña Aldonza se asienta sobre las terrazas cuaternarias media y baja del río Guadalquivir, salvo la zona más septentrional que se encuentra sobre arcillas y margas. Las gravas de estas terrazas fluviales cuaternarias fueron explotadas por una gravera próxima al embalse estudiado. El sustrato sobre el que se disponen las terrazas cuaternarias está formado por unidades de estructura tectónica compleja (Roldán-García et al., 1992). Estas unidades deformadas, plegadas y afectadas por fallas, están compuestas por litologías variadas donde dominan las arcillas, margas, calcarenitas y areniscas calcáreas que conforman el basamento de la Cuenca Miocena del Guadalquivir. Estas unidades ocupan el fondo del valle del Guadalquivir extendiéndose hacia el sur por la ladera meridional hasta el frente de la Cordillera Bética representado en esta transversal norte-sur por las sierras prebéticas de Bedmar y Jódar de naturaleza calizo-dolomítica. Al norte del embalse, la ladera septentrional del valle del Guadalquivir está compuesta por una secuencia alternante de margas y calcarenitas que representan el relleno sedimentario de origen marino de la Cuenca miocena del Guadalquivir. Estos paquetes de margas y calcarenitas se disponen subhorizontales coronando la secuencia un paquete calcarenítico que configura el resalte de la loma de Úbeda y Baeza, sobre el que se asientan estas localidades.

1.2.5. Usos del suelo

En el área circundante al Embalse de Doña Aldonza predomina un uso agrícola fundamentalmente dedicado al cultivo del olivar y en menor parte del cereal.

Hasta los años 80 existía una gravera para la extracción de áridos situada, como se ha comentado anteriormente, en la parte exterior de la orilla este del embalse de Doña Aldonza cuya actividad a día de hoy es inexistente.

1.2.6. Valor medioambiental

La superficie que ocupa el pantano de Doña Aldonza, junto al embalse de Pedro Marín y el embalse de Puente de la Cerrada, se encuentra declarada como paraje natural (Paraje Natural Alto Guadalquivir) (Ley 2/1989, del 18 de

julio) en base a las características pantanosas que presenta y que permiten realizar la función de refugio de la biodiversidad dentro de un entorno fuertemente antropizado. Doña Aldonza también pertenece a la red europea NATURA 2000 ya que está catalogado como Lugar de Importancia Comunitaria (LIC Alto Guadalquivir) y Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA Alto Guadalquivir).

Recientemente ha sido declarado como Zona de Especial Conservación (ZEC Alto Guadalquivir).

2. METODOLOGÍA Y MATERIALES

2.1. Análisis de la evolución del aterramiento del embalse

El análisis de la evolución del aterramiento del embalse se realizó para caracterizar la evolución morfosedimentaria durante el transcurso del proceso de aterramiento del embalse de Doña Aldonza. Para ello se usaron ortofotografías aéreas correspondientes a la serie A del vuelo Americano (marzo 1945), serie B del vuelo Americano (julio 1956), vuelo Interministerial (1977), vuelo Nacional (marzo 1985), Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (años 1999, 2004 y 2007) y la imagen base del software Google Earth (octubre 2010).

El formato de las fotografías era en mayor parte digital obtenidas de la fototeca digital del Instituto Geográfico Nacional (1945 y 1985), del servicio de ortofotos de la Junta de Andalucía (1999, 2004 y 2007) y del software Google Earth (2010) aunque en el caso de las ortofotografías de los años 1956 y 1977 se trabajó en formato físico con ellas.

La imagen del año 1945 no se incluyó en el análisis de la evolución del aterramiento debido a que es anterior a la construcción de embalse, por lo que se utilizó para reconocer la situación pre-embalse de la zona de estudio

Análisis en formato físico

El análisis en formato físico se realizó mediante un estereoscopio de espejos (**Figura 4**) sobre las ortofotografías de los años 1956 y 1977, de modo que se reconocía en tres dimensiones la orografía de la zona de estudio y los cuerpos sedimentarios someros sobre la lámina de agua del embalse.

Posteriormente sobre las ortofotografías se colocó papel de acetato de formato A4 unidas a ellas mediante clips, y con rotuladores indelebles de diferente color se marcaron sobre el papel y con ayuda del estereoscopio los contornos de la zona efectiva de acumulación de agua del embalse en la fecha (con rotulador azul), de la zona aterrada en comparación a los límites originales del embalse (con rotulador amarillo) y de la zona sumergida con menor profundidad (con rotulador verde). Esta última se representó debido ya que estaba en transición entre la zona efectiva de acumulación de agua y la zona aterrada. Además se representaron los cauces cuyo drenaje iba directamente al embalse. Finalmente las imágenes obtenidas fueron digitalizadas a formato de imagen PNG.

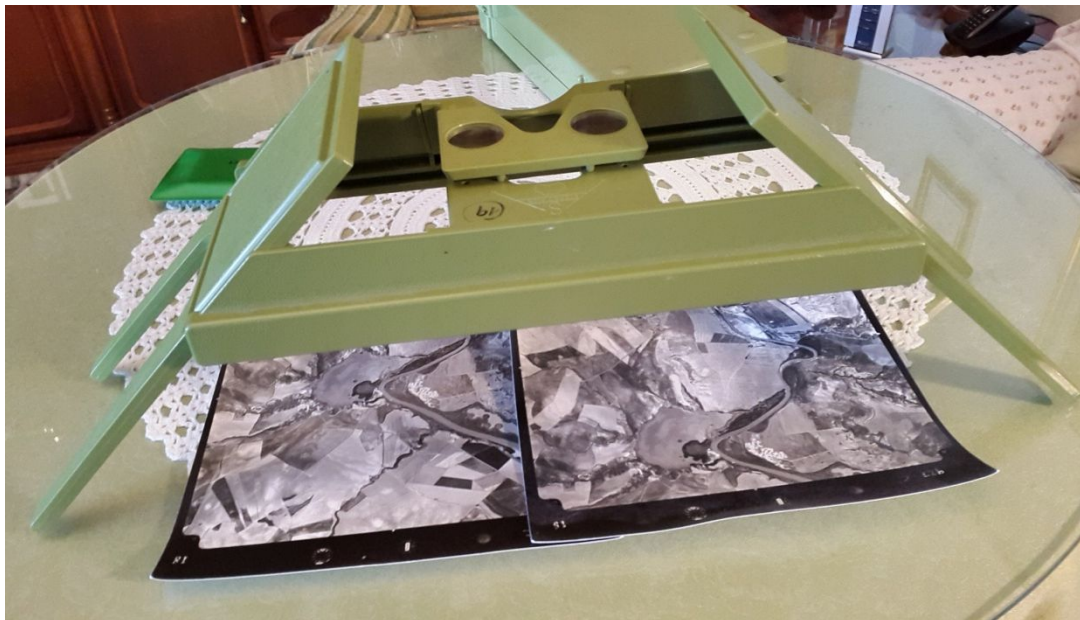


Figura 4. Estereoscopio de espejos.

Análisis en formato digital

Se trabajó en formato digital sobre las ortofotografías aéreas de los años 1985, 1999, 2004, 2007 y 2010. Una vez obtenidas se importaron al formato adecuado para visualizarlas con el software Google Earth donde se procedía a su georreferenciación. Una vez georreferenciadas se guardaban en el formato de imagen PNG.

El análisis de las ortofotografías en formato digital se realizó mediante el software de diseño de imagen CorelDRAW X4. Sobre el software se cargaron las imágenes aéreas en formato PNG y se efectuó una corrección brillo/contraste a las imágenes con el fin de mejorar la definición de la imagen y dar mayor fiabilidad al propio análisis.

Posteriormente con las herramientas de dibujo que posee el software se dibujaron los contornos de de la zona efectiva de acumulación de agua del embalse en la fecha (contorno en color azul), de la zona aterrada en comparación a los límites originales del embalse (contorno en amarillo fuerte) y de la zona sumergida con menor profundidad (contorno en color verde). Para dar mayor claridad a las imágenes representadas digitalmente se eliminó la imagen base de satélite dejando solo los contornos dibujados a los que se les añadió una trama de relleno para realzar su visualización.

Finalmente comparando cada imagen de satélite y los contornos realizados anteriormente se reconstruyó la secuencia de la evolución de la colmatación del embalse de Doña Aldonza para cada fecha de cada imagen exceptuando las imágenes correspondientes a los años 1999, 2004 y 2007 que se desecharon debido al escaso cambio que presentaban respecto a la ortofotografía del año 1985.

2.2. Cálculo de las pérdidas medias anuales de suelo en la cuenca vertiente

El cálculo de las pérdidas anuales medias en la cuenca vertiente al pantano de Doña Aldonza se realizó en base a la ecuación RUSLE (Revised Universal Soil

Loss Equation) para estimar la entrada de sedimento al embalse en base a la generación de sedimento en la cuenca vertiente

Se tomó como datos de partida los del Inventario Nacional de Erosión de los Suelos elaborado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente para las provincias de Jaén y Granada. En él aparecen las pérdidas de suelo ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) ordenadas por términos municipales resultado de la ecuación RUSLE. Para la superficie de la cuenca correspondiente a las provincias de Almería y Murcia se utilizaron los datos de los municipios anexos debido a la baja contribución de estas provincias en la superficie de la cuenca (<1%).

Posteriormente se dibujó con el software de diseño gráfico CorelDRAW X4 la superficie de cuenca vertiente al embalse de Doña Aldonza anterior a 1985 sobre un mapa base donde se mostraba la red hidrográfica y el relieve de la demarcación hidrográfica del Guadalquivir.

El mapa resultado se georreferenció mediante el software Google Earth y se importó a la aplicación web GoolZoom donde se calculó la superficie que ocupaba la cuenca dentro de cada término municipal. Dividiendo la superficie de la cuenca dentro del término municipal y la superficie de cada término municipal se obtuvo el porcentaje de participación de la cuenca en cada término municipal.

Finalmente se multiplicaron los valores de pérdidas anuales de suelo de cada término municipal por el porcentaje de participación de la cuenca sobre ellos. Dichos resultados se integraron y se obtuvo el valor de pérdida anual media de suelo de toda la cuenca vertiente.

Con el valor de pérdida anual media de suelo de la cuenca vertiente se calculó el coeficiente de transferencia (%) de dicho sedimento al embalse, ya que el sedimento generado en la cuenca vertiente (mediante el cálculo de la RUSLE) no se transporta al embalse en su totalidad.

2.3. Muestreo

2.3.1 Toma de muestras

Se tomaron tres muestras de sedimento con un cilindro Kopecky (**Figura 5**) en tres localizaciones representativas del embalse. La primera muestra se tomó a la izquierda de la presa, la segunda muestra se tomó en la antigua conexión entre el sistema fluvial y el sistema lacustre y la tercera muestra se recogió en la desembocadura del arroyo de la Minilla, en la zona más septentrional del embalse (**Figura 6**).



Figura 5. Cilindro Kopecky para la recogida de muestras (Lázaro Sánchez et al., 2010)



Figura 6. Localización de los puntos de muestreo (Fuente: Google Earth).

2.3.2. Análisis visual del embalse en el estado actual

El análisis visual del estado actual del embalse se realizó para reconocer estructuras sedimentarias implicadas en el proceso de relleno de sedimento de la presa, contrastar datos obtenidos en el análisis de la evolución del aterramiento del embalse y para estimar la posible evolución sedimentaria en el embalse en los próximos años.

Se realizó un reconocimiento de las zonas del embalse con más importancia en el proceso en base al análisis de la evolución del aterramiento y se capturó mediante una cámara fotográfica las estructuras con mas significación en el proceso.

2.4. Cálculo de la densidad real del sedimento.

La densidad real (D_r) de un suelo o un sedimento es la relación que existe entre la masa de las partículas sólidas y el volumen ocupado por las mismas; es decir, se excluye el volumen ocupado por los poros que hay entre las partículas.

$$D_r = \frac{M_s}{V_s} \quad (1)$$

M_s = masa de los sólidos

V_s = volumen de los sólidos

Para su determinación se usó las muestras de sedimento recolectadas en el embalse de doña Aldonza y se realizó del siguiente modo:

Con un matraz aforado, limpio y seco, se pesó con su tapón en la balanza de precisión obteniéndose el valor P_1 .

Se añadieron al matraz aforado 10,003 g de suelo seco al aire, el cual previamente se pasó por un tamiz de 2 mm de luz de malla. El matraz se tapó con su tapón y se pesó obteniéndose el valor P_2 .

Se añadió agua destilada hasta poco más de la mitad del matraz, arrastrando en el proceso aquellas partículas adheridas al cuello del matraz. A continuación se introdujo el matraz en un baño maría hirviendo durante unos minutos con el fin de expulsar el aire ocluido entre las partículas. Se dejó enfriar a temperatura ambiente para luego añadir agua destilada hervida y fría hasta el enrase. Una vez tapado y seco el exterior del matraz se pesó en la balanza de precisión, obteniéndose el valor P_3 .

Se vació y limpió el matraz, y posteriormente se llenó de agua destilada hervida y fría hasta el enrase. Se tapó y se pesó el matraz, obteniéndose P_4 . Se anotó la temperatura del agua contenida en el matraz para obtener la densidad del agua líquida D_w .

La densidad real ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) de cada una de las muestras se obtuvo en base a:

$$D_r = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \cdot D_w \quad (2)$$

Con los datos de la densidad real de cada una de las muestras se obtuvo la densidad real media del sedimento del embalse.

2.5. Cálculo de la densidad aparente del sedimento

2.5.1. Cálculo de la densidad aparente del sedimento

La densidad aparente (D_a) de un sedimento es la relación entre la masa del sólido y el volumen total ocupado por las partículas del sedimento más el espacio poroso. La masa se determina pesando la muestra desecada a 105 °C durante un día, y el volumen total se deduce del volumen de la muestra que se haya tomado en el campo.

La utilización de cilindros de acero permite extraer muestras de sedimento sin disturbar y de volumen conocido, por lo que la densidad aparente puede ser

calculada en base a la relación peso seco de la muestra sobre volumen del cilindro.

Una vez extraídas las muestras con los cilindros Kopecky y cubiertas con las tapas para evitar pérdidas de material, se colocaron en estufa a 105-110 °C hasta que tuvieran peso constante (aproximadamente 24 hs). Luego se registró el peso del sedimento + cilindro (valor A) y la tara del cilindro (valor B).

El volumen del cilindro (cm^3), se calculó en base al radio (r) y la altura (h) (medidas internas), por la siguiente fórmula:

$$V = \pi r^2 \cdot h \quad (3)$$

La densidad aparente ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) se determinó del siguiente modo::

$$Da = \frac{A-B}{V} \quad (4)$$

2.5.2. Cálculo de la masa de sedimentos en el embalse.

Con los datos obtenidos de densidad aparente ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) una vez expresados en la unidad adecuada ($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-3}$) se calculó la masa de sedimentos (Mse, en Mg) presente en el embalse de Doña Aldonza mediante:

$$M_{se} = D_a \cdot V_e \quad (5)$$

D_a = densidad aparente del sedimento ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

V_e = volumen del embalse (Hm^3)

La masa de sedimentos presente en el embalse permitió estimar la degradación específica de la cuenca vertiente como vemos en el siguiente punto.

2.6. Estimación de la degradación específica de la cuenca vertiente al embalse.

Se usaron dos métodos para evaluar la degradación específica de la cuenca: La degradación específica de la cuenca vertiente (DE) y el método del coeficiente de entrega de sedimentos (CES).

2.6.1. Degradación específica de la cuenca vertiente

El cálculo de degradación específica de la cuenca vertiente (DE) permite obtener un valor real medio de aporte de sedimentos al embalse de Doña Aldonza en términos absolutos (en $\text{Mg} \cdot \text{Km}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$). Se obtuvo a partir de la siguiente expresión (Avendaño, et al., 1993):

$$DE = \frac{SAE}{Tf \cdot (Ac - Ae)} \quad (6)$$

SAE = masa de sedimentos depositados en el embalse (Mg) (punto 2.5.2)

Tf = tiempo de funcionamiento del embalse (años)

Ac = superficie de la cuenca de drenaje (Km^2)

Ae = superficie del embalse (Km^2)

Se halló como superficie de la cuenca de drenaje "Ac" la media de las superficies anterior y posterior a la construcción del embalse del Negratín (10.539 Km^2) ya que dicha obra produjo una disminución de la superficie de cuenca de drenaje al pantano de Doña Aldonza de 12.477 km^2 a 8.600 km^2 en 1985, como hemos comentado anteriormente. Al ser equitativa la distribución temporal en ambas superficies de cuenca (30 años cada una) para los 60 años desde la construcción y funcionamiento del embalse no hay que hacer ninguna operación más sobre la media. El tiempo de funcionamiento del embalse "Tf" y su superficie "Ae" se obtuvo del Inventario de las presas y embalses andaluces.

2.6.2. Coeficiente de entrega de sedimentos (CES).

La estimación de la degradación específica mediante este método asume que el aporte de sedimentos al embalse viene dado por una proporción del total erosionado en el área fuente, determinado anteriormente por la ecuación

revisada universal de la pérdida de suelos (RUSLE). El CES (%) viene dado por (Glymp et al, 1954):

$$CES = \frac{AS}{TE} \quad (7)$$

AS = Aporte de sedimentos al embalse ($Mg \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) (dado por DA, punto 2.6.1)

TE = Total de sedimentos erosionados en el área fuente ($Mg \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) (punto 2.2)

3. RESULTADOS

3.1. Evolución morfosedimentaria del aterramiento del embalse de Doña Aldonza.

La evolución morfosedimentaria del aterramiento del embalse de Doña Aldonza se realiza en tres fases principales comprendidas entre los años 1956-1977, 1977-1985 y 1985-2010, además se ha tenido en cuenta la situación anterior a la construcción de la presa (1945) y la situación en el estado inicial (1956).

3.1.1. Situación pre-embalse (1945)

En esta primera fase previa a la construcción del embalse se puede apreciar un trazado muy sinuoso característico de río meandriforme. El principal meandro ocupa el extremo noreste del futuro embalse, hacia la cola del mismo, y se encuentra en fase de casi abandono de canal por un proceso de estrangulamiento (*neck cut-off*) (**Zona señalada en rojo en figura 7**). El estrangulamiento llevaría a la formación de una laguna efímera/humedal (*oxbow-lake*) en el meandro abandonado. La posterior construcción de la presa y evolución sedimentaria del embalse en este sector noreste estará precisamente representada por un sistema lagunar semicerrado o casi aislado del canal principal (ver etapa 1956-1977).



Figura 7. Estado pre-embalse de la zona de estudio (año 1945). En rojo meandro en proceso de estrangulamiento.

3.1.2. Estado inicial (1956)

Justo posterior a la construcción del embalse, se produce la formación de un delta en la desembocadura del canal principal, al que denominamos delta principal formado por la deposición de sedimentos al llegar el río al nivel de base relativo producido por la presa y que dará lugar a la primera zona aterrada años después. Los sedimentos someros del lóbulo o barra de desembocadura y su elongación SE-NW se puede apreciar, aun bajo lámina de agua, en la ortofoto (**Figura 8**). En ningún otro sector del embalse se aprecia actividad sedimentaria relevante.

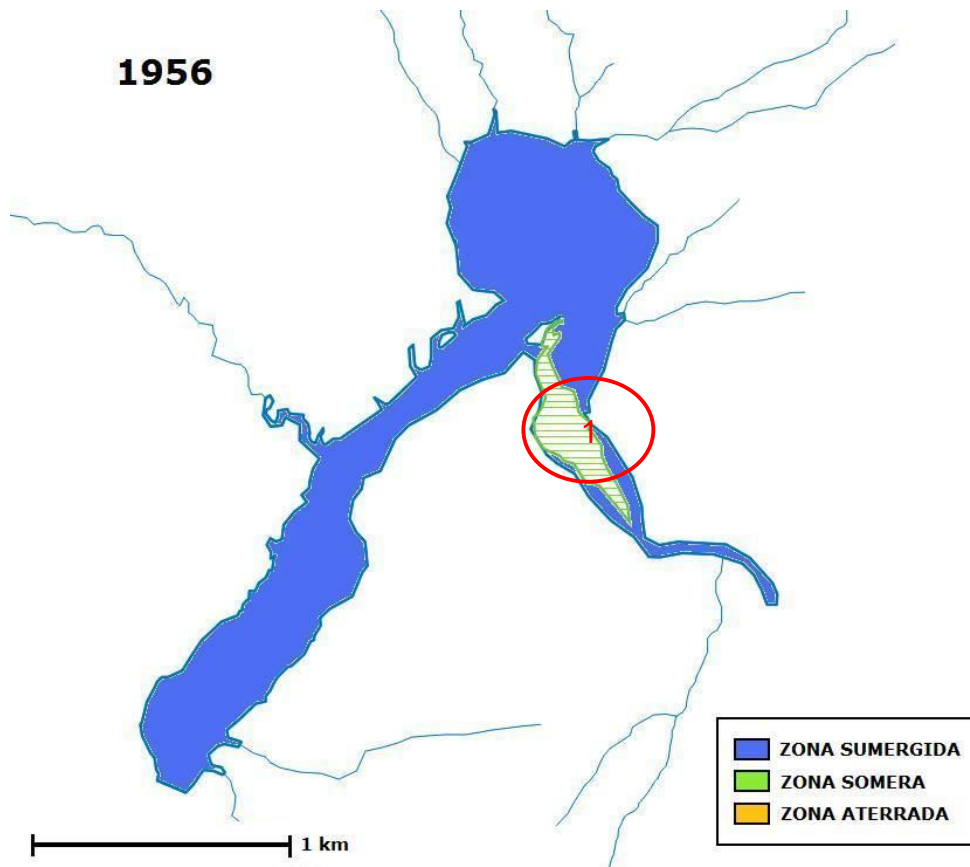


Figura 8. Estado inicial del proceso de aterramiento del embalse (año 1956). Punto 1: lóbulo de desembocadura.

3.1.3. Primera fase (1956-1977)

Es el primer estadio de colmatación del embalse y en el que se produce la mayor parte del proceso. La actividad sedimentaria no se concentra, como en el año 1956, a la desembocadura del canal principal sino que se extiende dicha dinámica sedimentaria a todo el embalse.

La progradación hacia el norte del lóbulo deltaico del canal principal (la barra/lóbulo de desembocadura de 1956 aparece emergida y vegetada) provoca la individualización de dos sistemas deposicionales diferenciados: (1) un sistema lagunar (**Punto 4 en la figura 10**), casi desconectado del canal, en el extremo noreste que ocupaba el meandro estrangulado de la foto de 1945 y (2) resto del embalse con una dinámica sedimentaria compleja.

Sistema lagunar

Con forma en planta casi circular, está representado por una laguna semicerrada, casi aislada del canal principal por los sedimentos del delta principal. Un canal de desbordamiento, natural o artificial (**Punto 1 en la figura 10**) (*crevasse channel*), disecta los sedimentos del margen derecho (mota o *levée*) del canal. A través de este canal de desbordamiento las aguas del canal principal vierten a la laguna en periodos de alto caudal. El agua desbordada arrastra sedimento, presumiblemente de granulometría fina, que es depositado en las aguas estancas de la laguna en forma de lóbulos o barras de sedimento. Estos lóbulos o barras de sedimentos someros (bajo reducida lámina de agua) representan, en términos deposicionales y atendiendo a la dinámica fluvial del canal principal, lóbulos de desbordamiento del canal principal (*crevasse splay*). Para este largo periodo de 20 años transcurridos desde la ortofoto del vuelo americano (1956), la aportación sedimentaria desde los márgenes y desde los arroyos que vierten a la misma es reducida. Parece insinuarse una orla de sedimento somero próxima al arco costero septentrional de la laguna.

Resto del embalse

La dinámica sedimentaria del resto del embalse es más compleja debido a la participación en la misma de tres subambientes sedimentarios: canal/delta principal, delta transversal en la desembocadura del Arroyo de la Chozas y sistema embalse próxima a la presa. Debido al gran período intermedio sin imágenes no podemos observar los escalones sedimentarios con los que se va rellenando el embalse. Este “resto del embalse” tiene una morfología rectilínea con dirección noreste a suroeste, extremo donde se encuentra ubicada la presa. En la imagen final de este periodo, la analizada de 1977, se observa el constreñimiento lateral del embalse por sedimentos marginales emergidos y vegetados, se observa la morfología canaliforme del embalse entre estos sedimentos marginales y, hacia la presa, la apertura del canal en la zona más profunda del embalse. Esta zona profunda próxima a la presa es distinguible en la ortofoto por el tono gris más oscuro que el resto de superficie sumergida del embalse/canal, caracterizada por el tono gris claro. En la zona próxima a la presa, una flecha de sedimento que se extiende por la zona central del embalse y paralela a los márgenes separa el canal principal de una zona de

aguas estancas en el margen izquierdo. A partir de esta descriptiva, se ha interpretado la evolución sedimentaria entre 1956 y 1977 para este sector del embalse de la siguiente manera. A continuación se interpretan los diferentes subambientes sedimentarios en sentido espacial, y no cronológico, desde el noreste al suroeste:

A. En el margen interno de la curva del canal principal, al pie de la gravera o zona de extracción de áridos visible en esta foto (no en 1956), aparece una barra de sedimento interpretada como una barra de meandro (*point-bar*) (**Punto 2 en la figura 10**). Esta barra es efecto de la acreción lateral del canal por reducción de la velocidad de flujo helicoidal característico del margen interno del meandro. En el margen externo, o margen erosivo, del meandro se observó en campo un escalón erosivo de más de dos metros resultado de la relativamente alta velocidad de flujo helicoidal en este margen (**Figura 9**).



Figura 9. Escalón erosivo de considerable tamaño en el margen externo del meandro.

B. Durante esta etapa en la zona central del embalse correspondiente a la desembocadura del Arroyo de las Chozas se produce la formación de un delta transversal (**Punto 3 en la figura 10**) debido a la deposición de sedimentos al llegar al nivel de base del arroyo. En planta no se observa la típica morfología en abanico de la llanura deltaica sino un cuerpo deltaico disectado

perpendicularmente por el canal principal. Este canal principal redistribuye el sedimento del delta hacia la presa, de ahí la morfología del delta alargada hacia la presa

C. En la zona más próxima a la presa (**Figura 11**) el canal deposita sedimento en los márgenes donde la velocidad de flujo es menor mientras que se mantiene la profundidad en la zona central del canal donde la velocidad de flujo, controlada por los aliviaderos de coronación de la presa, es alta y no se produce depósito de sedimento. Entre la flecha de sedimento central y el margen izquierdo del embalse aparece una masa de agua estanca. Dicha zona a pie de campo presentaba aparentemente una textura arcillosa, debido a la deposición de sedimentos por decantación al estar al margen del flujo dominante del embalse.

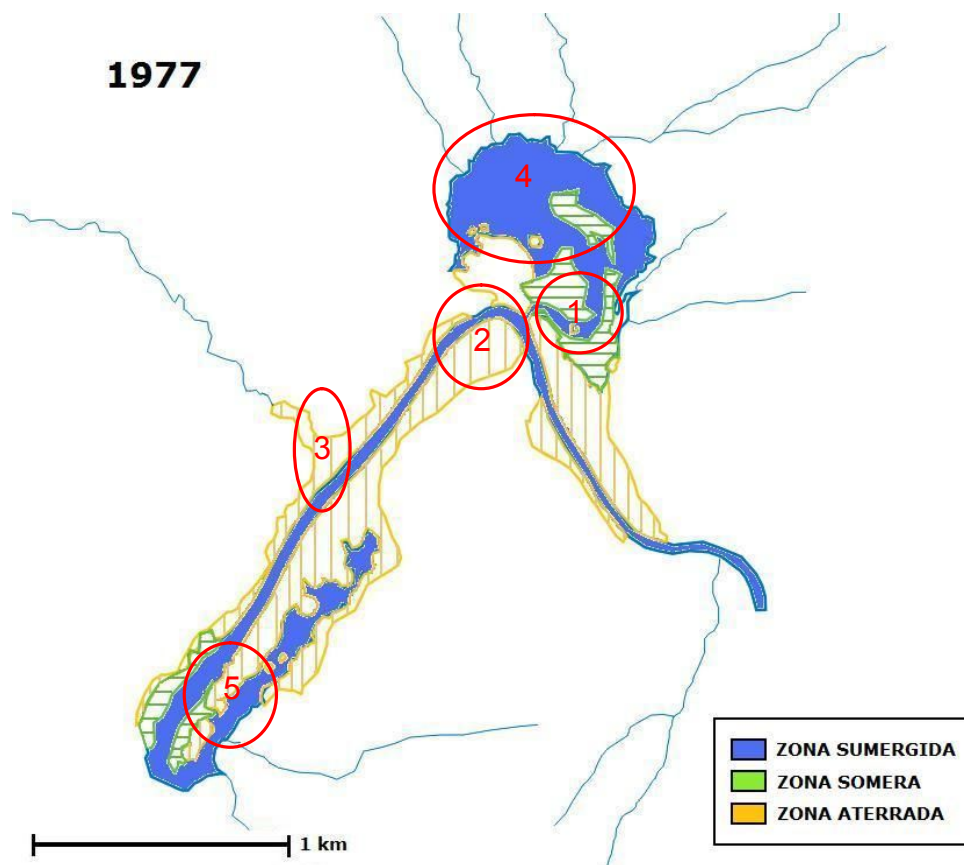


Figura 10. Estado del aterramiento en el embalse al final de la primera fase (año 1977). Punto 1: lóbulo de desbordamiento, punto 2: point-bar, punto 3: delta transversal en la desembocadura del Arroyo de las Chozas, punto 4: sistema lagunar, punto 5: barra central.



Figura 11. Área más próxima a la presa .

3.1.4. Segunda fase (1977-1985)

En la etapa presente en la zona norte del embalse se va produciendo el aterramiento de la laguna fundamentalmente por los aportes de sedimento procedentes del desbordamiento del canal principal. En 1984 ya aparece la laguna desconectada del canal principal. En la orla costera septentrional de la laguna, debido al aporte de los arroyos que vierten por el norte, en especial del Arroyo de la Minilla, se va depositando sedimento que empieza a constreñir el lago hacia el sur (**Punto 2 en la figura 12**).

El canal principal (**Punto 4 en la figura 12**) aparece más estrecho que en la ortofoto de 1977 por acreción sedimentaria de los márgenes del mismo. La flecha o barra central (**Punto 5 en la figura 12**) de sedimento ha avanzado frontalmente hacia la presa además de engrosarse por acreción lateral llegando casi a adosarse al margen izquierdo del embalse y aterrando el golfo que aparecía en la ortofoto de 1977. Esta acreción lateral de la flecha o barra central podría estar ligada a líneas de flujo que, separándose del flujo principal, tuvieran un sentido inverso, es decir, hacia aguas arriba.

Vista en planta, la extensión de la gravera próxima al embalse parece duplicar su área de explotación respecto a la ortofoto de 1977 (**Figura 15, c**)

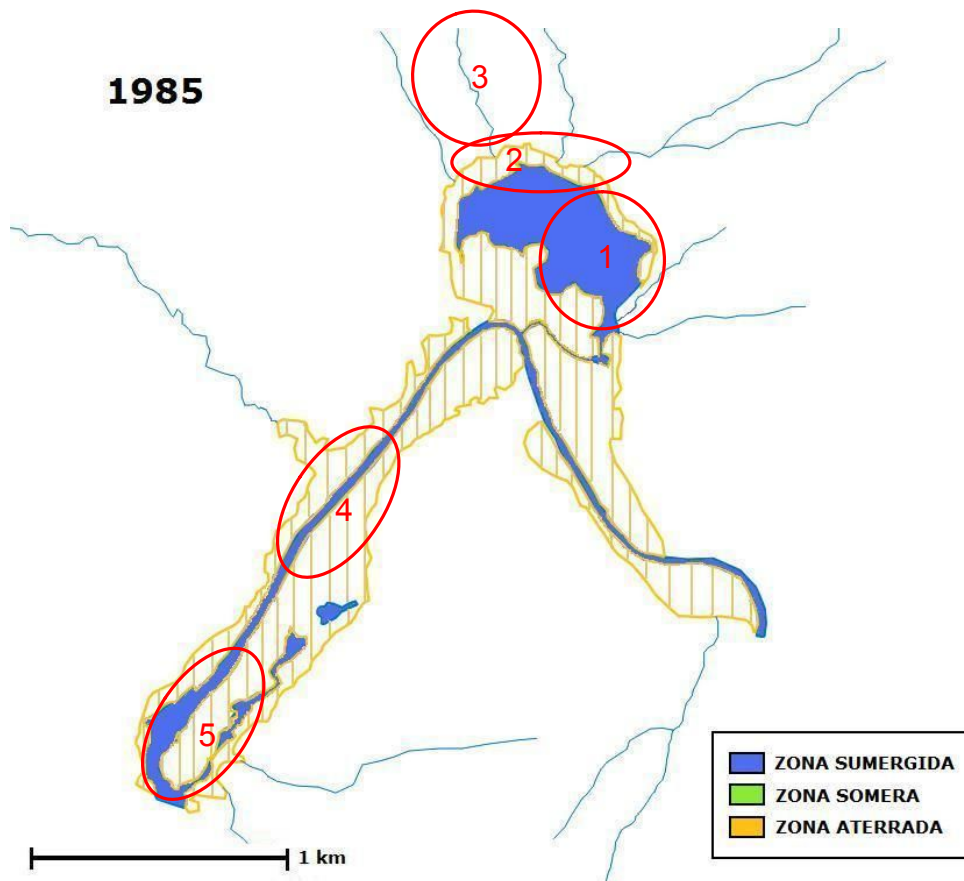


Figura 12. Estado del aterramiento en el embalse al final de la segunda fase (año 1985). Punto 1: Sistema lagunar, punto 2: lóbulos deltaicos del Arroyo de la Minilla, punto 3: arroyo de la Minilla, 4: sección del canal principal, 5: barra de sedimento.

3.1.5. Fase final (1985-2010)

La laguna se estrecha considerablemente hacia el sur por el aporte de los arroyos vertientes, especialmente del Arroyo de la Minilla. Se aprecia dos lóbulos en la desembocadura de estos arroyos correspondientes a dos deltas unidos (**Punto 2 en la figura 14**), lo cual refleja la importancia sedimentaria de estos afluentes.

A pie de campo se identificaron importantes lenguas de deslizamiento en la desembocadura del Arroyo de la Minilla (**Figura 13**), principales responsables del incremento de la velocidad de retroceso de la laguna hacia el sur en esta etapa. Es también debido a ello la aparente granulometría mixta que presentaba el sedimento sobre el delta del Arroyo de la Minilla. También se observó el límite del ambiente lagunar gracias a la presencia de un cambio de

vegetación, estando presente Taray (*Tamarix* sp.) sobre el delta del Arroyo de la Minilla y Eneas (*Typha* sp.) en la zona lagunar debido a que las Eneas (*Typha* sp.) necesitan la presencia de lámina de agua para su crecimiento (Cirujano et al., 2010).



Figura 13. Lenguas de deslizamiento en la desembocadura del Arroyo de la Minilla.

Se observa un avance de la costa meridional de la laguna respecto a la ortofoto de 1984 pese a que la laguna está desconectada del canal principal. El desbordamiento del canal principal durante periodos de crecida ocurridos en entre 1984 y 2010 debió arrastrar sedimento que quedó acumulado en la orla costera del sur de la laguna, quedando únicamente inundada la zona central de la misma.

El canal principal se ha estrechado respecto a la ortofoto de 1984 y se ha aterrado prácticamente todo el embalse. La dinámica sedimentaria fluvial domina sobre la dinámica lacustre característica de los embalses. Sin embargo, la dinámica fluvial de este tramo del río Guadalquivir difiere respecto a la dinámica fluvial de hace 70 años. En la fotografía aérea de 1945, previa a la construcción de la presa, aparece un río de trazado muy sinuoso, sin desarrollo de llanura de inundación, y con barras de sedimento características de una

morfodinámica sedimentaria de río trenzado. Actualmente, el sistema fluvial resultado de la colmatación sedimentaria del embalse representa un canal poco sinuoso, de curso estrecho y estabilizado por una llanura de inundación amplia y vegetada principalmente por Eneas (*Typha* sp), en primer término, y Sauces (*Salix* sp.) y Álamos (*Populus* sp.) en el borde de la antigua línea de costa. Aparte se observaron Taray (*Tamarix* Sp.) sobre el delta del Arroyo de la Minilla.

La extensión de la gravera en 2010 no muestra variaciones respecto a 1984, lo que puede indicar el abandono parcial o total de la explotación (**Figura 15, d)**)

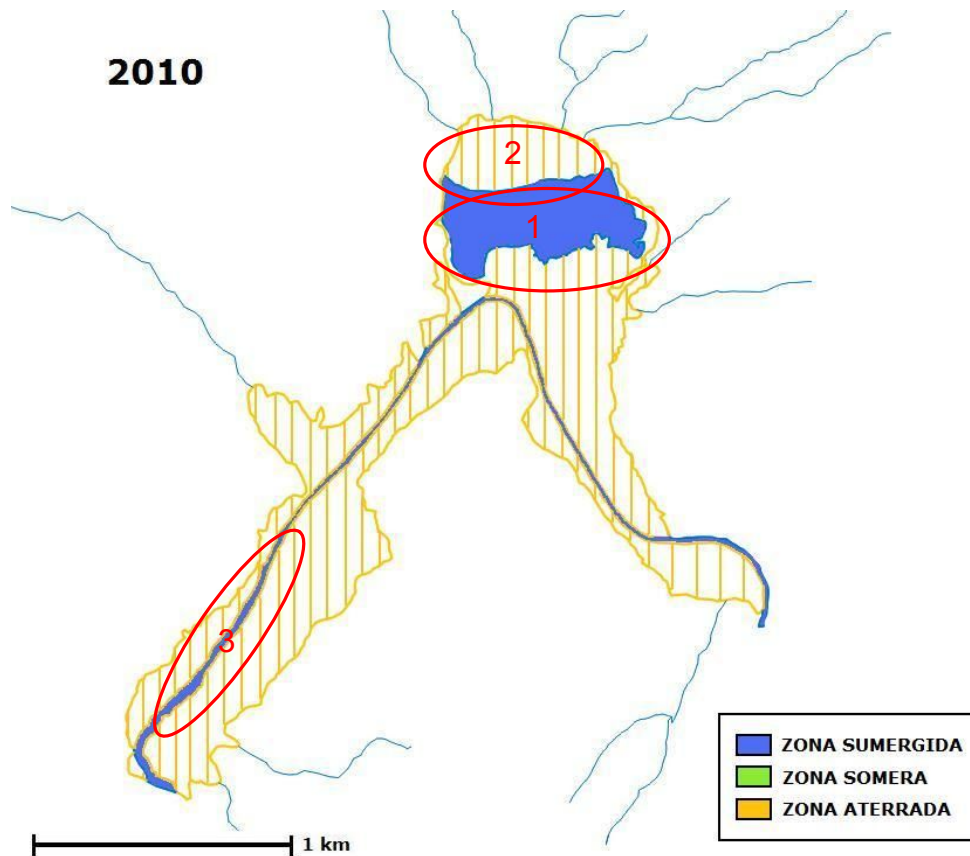


Figura 14. Estado del aterramiento en el embalse al término de la etapa final (año 2010). Punto 1: Sistema lagunar, punto 2: lóbulos deltaicos del Arroyo de la Minilla, punto 3: sección del canal principal

a) 1956



b) 1977



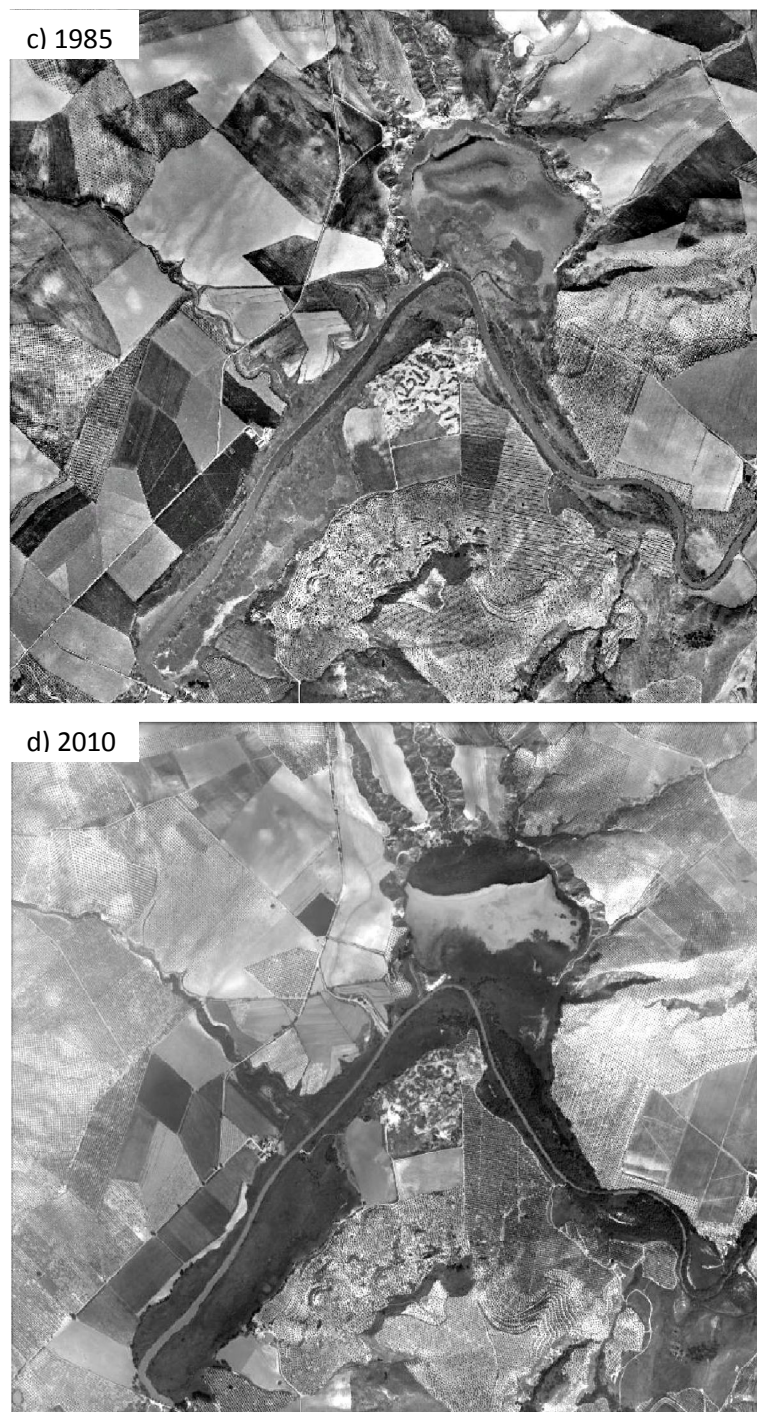


Figura 15. Ortofotografías aéreas que evidencian el proceso de aterramiento del embalse de Doña Aldonza. Fechas: a) 1956, b) 1977, c) 1984, d) 2010.

3.2. Cálculo de las pérdidas medias anuales de suelo en la cuenca vertiente

La superficie de la cuenca vertiente durante la mayor parte del proceso de aterramiento incluía parte de la cabecera del río Guadalquivir y de la cuenca

del río Guadiana Menor (superficie de la cuenca anterior a 1985), abarcando en su mayor parte las provincias de Jaén y Granada y superficies menores de la provincia de Almería y Murcia.

Tomando de base los valores por municipios del Inventario Nacional de Erosión de los Suelos resultado de la ecuación RUSLE y la superficie de cada término municipal dentro de la cuenca vertiente al embalse de Doña Aldonza se obtuvo un valor medio de pérdida de suelo en la cuenca vertiente de $15,7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$.

Teniendo en cuenta la clasificación del método RUSLE de las pérdidas de suelo en siete niveles erosivos (**Figura 16**), la cuenca vertiente al Doña Aldonza está clasificada como nivel erosivo 3 que engloba las pérdidas de suelo entre $10 \text{ y } 25 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$.

Nivel erosivo ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$)	
1	0-5
2	5-10
3	10-25
4	25-50
5	50-100
6	100-200
7	> 200

Figura 16. Clasificación de las pérdidas de suelo en siete niveles erosivos (Inventario Nacional de Erosión de los Suelos basado en el método RUSLE)

Tabla 1. Pérdidas de suelo ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) de los municipios que forman parte de la cuenca vertiente (datos del Inventario Nacional de la Erosión de los Suelos) y porcentaje que ocupa la cuenca vertiente en ellos (elaboración propia).

Municipio	Porcentaje en la cuenca vertiente (%)	Pérdidas de suelo ($\text{Mg}\cdot\text{Ha}^{-1}\cdot\text{Año}^{-1}$)
Alamedilla	100	9,6
Albuñán	100	1,7
Alcudia De Guadix	100	5,2
Aldeire	100	6,7

Alicún De Ortega	100	5,9
Alquife	100	3,6
Baza	100	5,6
Beas De Guadix	100	12,1
Bemanaurel	100	7,8
Benalúa	100	3,0
Cabra Sto Cristo	95	13,7
Caniles	100	5,6
Castilléjar	100	6,4
Castril	100	22,2
Cazorla	100	34,1
Chilluévar	100	59,9
Cogollos De Guadix	100	4,2
Cortes De Baza	100	13,7
Cortes Y Graena	100	11,6
Cuevas Del Campo	100	9,8
Cúllar	100	6,5
Darro	100	9,4
Dehesas De Guadix	100	7,1
Diezma	100	14,5
Dólar	100	5,7
Ferreira	100	6,5
Fonelas	100	7,5
Freila	100	9,8
Galera	100	6,8
Gobernador	100	23,2
Gor	100	9,3
Gorafe	100	6,9
Guadahortuna	25	21,8
Guadix	100	6,6
Hinojares	100	26,0
Hornos de Segura	75	35,2
Huélago	100	10,7
Huelma	55	35,5
Huesa	100	15,4
Huéscar	90	8,3
Huétor Santillán	60	7,9
Iznalloz	5	25,8
Jerez del		
Marquesado	100	7,2
Jódar	5	21,8
La Calahorra	100	3,0
La Peza	90	11,7
Lanteira	100	5,4
Larva	100	22,0
Lugros	100	5,9

Marchal	100	8,5
Montejícar	70	24,1
Morelábor	100	19,8
Orce	100	6,3
Peal De Becerro	100	32,9
Pedro Martínez	100	11,5
Píñar	95	32,1
Polícar	100	13,1
Pozo Alcón	100	17,6
Puebla de Don		
Fadrique	100	8,2
Quéntar	10	18,7
Quesada	100	36,2
Santiago Pontones	35	21,2
Santo Tomé	100	50,7
Torre Cardela	100	29,2
Torreperogil	80	57,1
Úbeda	40	41,9
Villacarrilo	85	58,5
Vva Arzobispo	50	78,4
Vva. De Las Torres	100	8,8
Zújar	100	13,1

3.3. Densidad real del sedimento

Se obtuvo mediante la ecuación **2)** un valor medio de densidad real del sedimento en las muestras de $2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, estando próximo del valor de densidad real fijado en $2,65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para los suelos minerales (Thompson et al., 1988).

Tabla 2. Valores obtenido de densidad real para las muestras 1, 2 y 3 y media aritmética resultante.

Muestra	$D_r (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
1	2,19
2	3,2
3	2,7
MEDIA	2,7

3.4. Densidad aparente del sedimento

Se obtuvo mediante la ecuación **4)** un valor medio de densidad aparente en las muestras de $1,27 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, un valor relativamente bajo debido al reciente depósito de ese sedimento en el lugar de muestreo, estando sin estructuración.

Tabla 3. Valores obtenidos de densidad aparente del sedimento para las muestras 1, 2 y 3 así como la media aritmética resultante.

Muestra	$D_a (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
1	1,32
2	1,24
3	1,26
MEDIA	1,27

Con el dato de la densidad aparente media del sedimento se calculó la masa de sedimentos depositada en el embalse en función del volumen del mismo (23 Hm^3) mediante la ecuación **5)** obteniéndose $29,21 \cdot 10^6 \text{ Mg}$.

3.5. Estimación de la degradación específica de la cuenca vertiente al embalse.

3.5.1. Degradación específica de la cuenca vertiente.

En base a la masa de sedimentos obtenida anteriormente se calculó la degradación específica de la cuenca de Doña Aldonza ($\text{Mg}\cdot\text{Km}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) (**ecuación 6)** desde la construcción del embalse (1955) hasta el estado actual (2015) obteniéndose un valor de $46,2 \text{ Mg}\cdot\text{Km}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ de aporte sedimentario medio al embalse.

3.5.2. Coeficiente de entrega de sedimentos (CES)

La estimación de la degradación específica mediante el método del coeficiente de entrega de sedimentos dio como resultado un coeficiente de entrega de sedimentos del 5,6%, calculado mediante la ecuación **7)**. Este dato indica que del total de $15,7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ de sedimentos erosionados en el área fuente

(obtenidos anteriormente por la ecuación revisada universal de pérdida de suelo (RUSLE)) se aportan al embalse el 5,6% de ellos.

4. DISCUSIÓN

El proceso de aterramiento del embalse de Doña Aldonza se concentró fundamentalmente en la primera fase del proceso (1956-1977) al producirse una aceleración de la dinámica sedimentaria durante la década de los años 60 debido a la presencia de años húmedos en la cuenca. 7 años de la década estuvieron por encima de la media pluviométrica obtenida en la estación de referencia (período 1960-1996) y dos de ellos (1960 y 1963) fueron los más húmedos de toda la serie con valores superiores un 90% respecto al valor de la media. La media decenal de este período fue un 26% por encima a la media de la serie de la estación de referencia.

Estos mayores valores de pluviometría en la década de los 60 produjeron un incremento de la erosión hídrica laminar y en surcos provocando un mayor arranque de partículas en la cuenca, siendo mayor el valor de generación de sedimentos en la cuenca vertiente en esta década que la media calculada mediante la Ecuación Revisada Universal de Pérdidas del Suelo (RUSLE) cuyo valor obtenido de $15,7 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ya supera ampliamente la tasa natural de renovación del suelo definida en $3 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ (Birkeland et al., 1999) aunque está por debajo del valor medio de la provincia de Jaén que se encuentra en $32 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ y de la provincia de Granada que se sitúa en $24 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ (ambos datos según el Inventario Nacional de Erosión de los Suelos). La presencia en la cuenca vertiente de amplia superficie de baja pendiente correspondiente a la hoya de Guadix -Baza además de grandes zonas forestales como Sierra Nevada, Sierra de Cazorla o Sierra de Baza cuyos datos de pérdida de suelo se encuentra por debajo de $10 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ explica el valor menor de generación de sedimentos respecto al total de las provincias de Jaén y Granada.

Estos valores de generación de sedimento resaltan la importancia de la presencia del Arroyo de la Minilla y de las Chozas en el aporte sedimentario al

embalse ya que los cursos altos de estos arroyos se sitúan en la zona con mayor tasas de generación de sedimento de la cuenca, con valores superiores a $50 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ (datos del Inventario Nacional de Erosión de los Suelos), siendo los cursos fluviales que mas sedimento aportan al embalse.

Unido a la mayor generación de sedimentos en la cuenca durante los años 60 hay que indicar el aumento de la eficiencia de transporte al embalse por los ríos del material erosionado durante esta década, medido por el coeficiente de entrega de sedimentos (CES). Este coeficiente es muy dependiente de la pluviometría siendo en torno al 22% sobre el material erosionado el que llega a los embalses en cuencas con pluviometría en torno a 1000mm, siendo mayor cuando los aportes pluviométricos en la cuenca son mayores (Bodoque et al., 2001). En nuestro caso particular, en el contexto de una cuenca de pluviometría baja (con clima mediterráneo), se obtuvo un valor de 5,6% para el CES en los años 1955-2015. Este valor estaría levemente por debajo del valor del CES para la década de los 60 al ser la media pluviométrica en este período un 26% mayor que la media obtenida en la estación de referencia, siendo de todas formas, un valor bajo de eficiencia de transporte de sedimento por parte de los ríos, como ocurre en las zonas de clima mediterráneo.

Ambos procesos aumentaron el valor de degradación específica de la cuenca durante los años 60 provocando una mayor entrada de sedimento al embalse debido tanto a la mayor generación de sedimento en la cuenca como la mayor eficiencia de transporte del mismo por los ríos gracias a la mayor pluviometría del período. El valor medio de degradación específica de la cuenca para esta década estuvo por encima del valor medio para el tiempo de explotación del embalse (1955-2015) resultante en $46,2 \text{ Mg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, un valor en comparación bajo con la media situada en $300 \text{ Mg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ obtenida por el CEDEX en 24 embalses (Avendaño et al., 1995).

Los procesos sedimentarios explicados anteriormente en el punto 3.1 continuaron a partir de los años 70 aterrando progresivamente el embalse. La velocidad de este aterramiento estaba en función de la pluviosidad del año correspondiente, acelerándose en años húmedos y ralentizándose en los secos

al afectar directamente a la cantidad de sedimento generado en la cuenca y a su transporte al embalse como se ha comentado anteriormente, siendo en términos generales menor a la de la década de los 60.

En 1985 se produce la construcción del embalse del Negratín, situado aguas arriba en la cuenca del Guadiana Menor que produjo una reducción del aporte anual de sedimentos al embalse de Doña Aldonza al disminuir la superficie de la cuenca vertiente al mismo de 12.477 km² a 8.600 km². Una parte de los sedimentos generados en la cuenca del río Guadiana Menor que se depositaban en Doña Aldonza pasaban a depositarse en el embalse del Negratín, si bien es cierto que el efecto de la construcción de este embalse es poco relevante ya que en el año 1985 el embalse de Doña Aldonza ya se encontraba aterrado prácticamente en su totalidad, observándose escaso cambio visual hasta la ortofoto del año 2010, excepto en el sistema lagunar.

El sistema lagunar se forma en los años 70 en posiciones de un meandro en fase de estrangulamiento en la dinámica pre-embalse debido a los procesos sedimentarios ocurridos durante la primera fase de aterramiento del embalse (punto 3.1), especialmente por los procesos ocurridos de los años 60 como se ha comentado más arriba. Estos procesos producen la desconexión total años posteriores de la zona donde se asienta el sistema lagunar del restante del embalse provocando la acumulación eficaz del agua aportada por los arroyos vertientes, especialmente por el Arroyo de la Minilla, al no haber ningún tipo de drenaje natural.

Desde los años 80 hasta la actualidad se está reduciendo la superficie del sistema lagunar especialmente en su parte más septentrional debido a un aumento del aporte de sedimentos por parte del Arroyo de la Minilla. Este aumento está relacionado por el incremento de la superficie de cultivo de olivar convencional en la cabecera del arroyo. Este tipo de cultivo al no dejar una cubierta protectora sobre el suelo permite más fácilmente el proceso de "detachment" de partículas, transportadas posteriormente por el Arroyo de la Minilla y depositadas sobre el sistema lagunar.

En el año actual (2015) también se han observado nuevas plantaciones de olivar convencional en régimen de regadío en la misma base de la desembocadura del Arroyo de la Minilla por lo que la sustitución de la vegetación natural por este tipo de cultivo está llevando a cabo un incremento de la producción de sedimentos y de la frecuencia de los deslizamientos en los márgenes del cauce del arroyo en los últimos años, como se ha observado en campo, llevando gran cantidad de material al sistema lagunar y aumentando la velocidad de retracción de la superficie de la laguna durante los próximos años. La evolución sedimentaria con estas condiciones aceleraría el proceso de relleno, retracción y desaparición del sistema lagunar, siendo efectivo en las próximas décadas.

La viabilidad de estas nuevas plantaciones de olivar convencional en régimen de regadío está cuestionada por estar situada en una zona próximas a frentes de deslizamiento que, incluso, serán agravados por la presencia de la propia explotación. Además el abastecimiento de agua por parte de la explotación se verá reducido por la tendencia de reducción de la superficie y final desaparición de la laguna, proceso acelerado por la explotación olivarera.

El aterramiento del embalse de Doña Aldonza tiene consecuencias negativas tanto a la producción de energía hidroeléctrica, el principal fin de explotación del embalse, como al abastecimiento de agua de las explotaciones agrícolas circundantes. Además el valor natural actual del embalse, declarado como Paraje Natural, LIC, ZEPA y ZEC, por su función como refugio de la biodiversidad debido fundamentalmente al sistema lagunar puede verse mermado en las próximas décadas con el futuro cierre de la laguna.

Todo ello pone de manifiesto la importancia de la gestión integral de las cuencas para minimizar el proceso de aterramiento de los embalses situados en cuencas agrícolas. El uso de técnicas como la agricultura de conservación o ecológica se hace fundamental para disminuir la generación de sedimentos que posteriormente será depositado en los embalses por la red de drenaje. De este modo la construcción y explotación de embalses situados en cuencas agrícolas

se haría de un modo más rentable, permitiendo la explotación de las funciones del mismo durante más años.

Para aumentar el alcance del presente trabajo se podrían plantear líneas futuras de estudio que incluyan el análisis sedimentario mediante la toma de testigos de sedimento y su posterior datación, incluso una modelización hidráulica del proceso de relleno de embalse de Doña Aldonza.

5. CONCLUSIONES

- El proceso de aterramiento del embalse de Doña Aldonza se produjo con mayor celeridad durante la década de los años 60 debido a la mayor pluviometría del período que aumentó la degradación específica de la cuenca provocando una mayor llegada de sedimento al embalse, tanto por el mayor arranque de partículas en la cuenca como al aumento de la capacidad de transporte de las mismas por la red de drenaje.
- La existencia de amplias zonas de pendiente suave y de carácter forestal unido a una baja pluviometría en la cuenca vertiente reduce la velocidad del proceso de aterramiento del embalse de Doña Aldonza al ser menor tanto la generación de sedimento en la cuenca como la capacidad de transporte del mismo al embalse por parte de los ríos.
- Las cuencas de los arroyos laterales (Arroyo de las Chozas y Arroyo de la Minilla) vertientes al embalse de Doña Aldonza son las que aportan mayor volumen de sedimento al embalse, al poseer las mayores tasas de generación de sedimento en la cuenca.
- El sistema lagunar está reduciendo progresivamente su superficie efectiva de acumulación de agua desde los años 80 por los aportes sedimentarios del Arroyo de la Minilla, acelerado en los últimos años por el asentamiento de explotaciones olivareras convencionales en la base del arroyo, que llevarán al cierre del sistema lagunar en las próximas décadas al aumentar los aportes sedimentarios. Con este cierre se

completaría el proceso de aterramiento de toda la superficie del embalse de Doña Aldonza.

- El aterramiento del embalse de Doña Aldonza tiene consecuencias negativas tanto al principal fin de explotación del mismo, la obtención de energía hidroeléctrica, como al abastecimiento de agua de las explotaciones agrícolas circundantes. Además el valor natural actual del embalse, declarado como Paraje Natural, LIC, ZEPA y ZEC, por su función como refugio de la biodiversidad debido al ambiente lagunar se verá mermado en las próximas décadas con el cierre de la laguna.
- Es fundamental la gestión integral de las cuencas en embalses situados en entornos agrícolas para evitar el rápido aterramiento de los mismos como el ocurrido en el embalse de Doña Aldonza. El uso de la agricultura de conservación o ecológica en las explotaciones agrícolas resulta clave para disminuir la generación de sedimentos en la cuenca que posteriormente será depositado en los embalses por la red de drenaje. De este modo la construcción y explotación de embalses situados en cuencas agrícolas se haría de un modo más rentable, permitiendo la explotación de las funciones del mismo durante más años.

Agradecimientos

A Julio Antonio Calero González por su colaboración y al Departamento de Geología por el uso de sus infraestructuras.

6. BIBLIOGRAFÍA

Avendaño Salas, C., Cobo Rayán, R., Sanz Montero, E., Gómez Montaña, J.L. 1997. Capacity situation in Spanish reservoirs. Dix-neuvième Congrès des Grands Barrages, 849-862.

Avendaño, C. 2002. Situación de los embalses españoles. Jornadas SEPREM sobre Sedimentación en embalses, pp. 17-32.

Avendaño, C., Calvo, J.P., Cobo, R. & Sanz, M.E. 1993. La modelización matemática, ajuste y contraste del coeficiente de entrega de sedimentos a los embalses. Aplicación al cálculo de la erosión de cuencas fluviales. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, 1, 210 pp.

Avendaño, C., Cobo, R., Gómez, J.L. & Sanz, M.E. 1995. Procedimiento para evaluar la degradación específica de cuencas de embalses a partir de los sedimentos acumulados en los mismos. Aplicación al estudio de embalses españoles. Ingeniería Civil, 99, 51-58.

Birkeland, P. 1999. Soils and geomorphology. Oxford University Press.

Bodoque, J.M., Pedraza, J., Martín-Duque, J.F., Sanz, M.A., Carrasco, R.M., Díez, A., Mattera, M. 2001. Evaluación de la degradación específica de la cuenca vertiente al embalse de Puente Alta (Segovia) mediante método de estimación directos e indirectos. Rev. C&G 15:(3-4), 21-36.

Cirujano, S. 2010. Flora ibérica. CLXXV. Typhaceae, pp. 260-66.

Einsele G, Hinderer M (1997) Terrestrial sediment yield and lifetimes of reservoirs, lakes and larger basins. Geol Rundschau 86(2):288–310.

Glymp, L.H. (1954). Studies of sediment yields from watersheds. International Association Hidrology, IUGC, 10th General Assembly, Roma, 1, 178-191.

Inventario Nacional de Erosión de Suelos. Provincias Jaén y Granada (2006-2007). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Lajczak A, (1994) The role of silting and the useful lifetime of dam reservoirs in the Polish Carpatians. Z Geomorph N F 38:129–150.

Lázaro Sánchez, A., Herrera Suárez, M., Recarey Morfa, C.A., López Bravo, E. 2010. Determinación del desgaste de los aperos de labranzas de suelo en condiciones de campo. *Rev Cie Téc Agr* vol.19, n.4 pp. 60-66.

Libro Blanco del Agua en España (2002). Ministerio de Medio Ambiente.

Palau Ybars, A. 2002. La sedimentación en embalses. Medidas preventivas y correctoras. I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente, pp. 847-856.

Roldán-García, F.J., Lupiani Moreno, E., Villalobos Megía, M., Jerez Mir, L. (1992) Mapa geológico de España MAGNA Hoja de Baeza. IGME, Mapa y memoria 44 pp

Thompson, L.M., Troeh, F.R. 1988. Los suelos y su fertilidad, pp. 82. Editorial reverté.

Viseras, C., Cobo Fernández, J., García-García, F., Soria, J.M. 2008. Dynamics of sedimentary environments in the accelerated siltation of a reservoir: the case of Alhama de Granada, southern Spain. *Environ Geol* 56:1353–1369.

