

# Evaluación integral del azolvamiento de grandes embalses mediante una herramienta de diagnóstico gráfica

## *Comprehensive evaluation of siltation in large reservoirs using a graphical diagnostic tool*

Edson Eduardo López-Basilio <sup>\*a1</sup>, José Luis Aragón-Hernández <sup>ib a2</sup>, Óscar Arturo Fuentes Mariles <sup>ib b</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Hidráulica, División de Ingenierías Civil y Geomática, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

<sup>b</sup>Coordinación de Hidráulica, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

E-mail: <sup>a1</sup>elopezb@proton.me, <sup>a2</sup>jaragonh@unam.mx, <sup>b</sup>ofuentesm@ii.unam.mx

<sup>\*</sup>Autor para correspondencia

Recibido: 29/11/2025

Aceptado: 20/02/2026

Publicado: 30/04/2026

**Citar como:** López-Basilio, E.E., Aragón-Hernández, J.L., Fuentes Mariles, O.A. 2026. Comprehensive evaluation of siltation in large reservoirs using a graphical diagnostic tool. *Ingeniería del agua*, 30(2), 95-109. <https://doi.org/10.4995/ia.25130>

## RESUMEN

El azolvamiento representa una amenaza creciente para la sostenibilidad operativa de los embalses, al reducir su capacidad útil y comprometer la seguridad hídrica. Este trabajo propone una modificación al Diagrama Universal de Sedimentación en Embalses, sustituyendo relaciones adimensionales por escalas temporales características asociadas a la capacidad útil del embalse y a la vida remanente del volumen de azolves de diseño, incorporando además la presión hídrica regional al análisis. La metodología se aplicó a 25 grandes presas de México, permitiendo una evaluación integral del azolvamiento acumulado y su impacto sobre la regulación del recurso. Los resultados indican que diecisiete embalses han agotado potencialmente su volumen de azolves de diseño y cinco de ellos presentan simultáneamente déficit hídrico, configurando una condición operativa crítica. Este enfoque se perfila como una herramienta de diagnóstico útil para priorizar acciones de gestión y conservación en contextos con información limitada.

**Palabras clave** | DUSE; azolvamiento de embalses; erosión hídrica; gestión de recursos hídricos.

## ABSTRACT

*Siltation represents an increasing threat to the operational sustainability of reservoirs by reducing useful storage capacity and compromising water security. This study proposes a modification of the Universal Reservoir Sedimentation Diagram (URSD), which replaces dimensionless ratios with characteristic temporal scales associated with useful storage capacity and the remaining service life of the designing siltation volume, while also incorporating regional water stress. The methodology was applied to 25 large reservoirs in Mexico, enabling an integrated diagnostic assessment of accumulated siltation and its impact on water regulation. Results indicate that seventeen reservoirs have exhausted their design sediment storage, and five of them simultaneously exhibit water deficit conditions, defining a critical operational state. This approach is presented as a graphical diagnostic tool to support the prioritization of management and conservation actions in data-scarce reservoir systems.*

**Key words** | URSD; reservoirs siltation; water erosion; sediment management; water security.

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la erosión hídrica en las cuencas hidrográficas ha adquirido una relevancia creciente dentro de la ingeniería hidráulica, particularmente en relación con la operación y sostenibilidad de las presas y sus embalses. Este fenómeno responde a una combinación de factores naturales y antrópicos, entre los que destacan la deforestación, la expansión agrícola intensiva, la urbanización no planificada y la sobreexplotación de los recursos naturales, así como las alteraciones en los patrones de precipitación asociadas al cambio climático (Owens, 2020; Degife *et al.*, 2021). Como resultado, muchas presas operan actualmente bajo condiciones hidrológicas y sedimentológicas sustancialmente distintas a las consideradas en el diseño original (Johannis *et al.*, 2016; García-Chevesich *et al.*, 2021), pues la intensificación de los procesos erosivos ha provocado un aumento sostenido en la acumulación de sedimentos en los embalses, reduciendo progresivamente la capacidad de almacenamiento, comprometiendo su funcionalidad en la regulación de los ríos y aumentando los costos de operación y mantenimiento, asociados a la obstrucción de obras de toma y la abrasión prematura de turbinas hidroeléctricas (Kondolf *et al.*, 2014; Schleiss *et al.*, 2016; George *et al.*, 2017; Niu y Shah, 2021). A escala global, se estima que los embalses pierden entre 0.5 % y 1 % de su capacidad de almacenamiento anualmente debido al azolvamiento, provocando pérdidas económicas del orden de miles de millones de dólares cada año (Annandale *et al.*, 2018; Stauch *et al.*, 2024).

Un reto central en este contexto es la dificultad para evaluar con precisión la capacidad real de almacenamiento de los embalses. En numerosos casos, el volumen destinado por diseño al almacenamiento de sedimentos (volumen de azolves de diseño) se alcanza o se supera en plazos considerablemente menores a los previstos, provocando una pérdida acelerada de la capacidad útil destinada a satisfacer las demandas de los usuarios finales. Esta situación adquiere especial relevancia en regiones con estrés hídrico creciente, donde la reducción de la capacidad de regulación intensifica los conflictos asociados al suministro de agua (Nüsser 2013; Arreguín *et al.*, 2013; Febles y Vega, 2016; Rahmani *et al.*, 2018), lo que ha motivado el desarrollo de métodos para gestionar la infraestructura de almacenamiento.

El análisis del azolvamiento requiere, idealmente, la integración de información hidrosedimentológica y batimétrica. El monitoreo del flujo sólido mediante estaciones hidrométricas (EH) es una herramienta fundamental que permite medir el volumen de sólidos en suspensión que ingresa a los embalses por sus afluentes; sin embargo, este tipo de mediciones no registra el transporte de sedimentos de fondo durante las avenidas, que constituye una fracción relevante del material que finalmente se deposita en el embalse; es por ello que estudios batimétricos complementan las mediciones del sedimento total acumulado y su distribución espacial en el fondo del embalse (Odhiambo y Boss, 2004; Wang *et al.*, 2018; Essel-Yorke *et al.*, 2023).

Un caso de éxito de la integración de datos sobre la acumulación de sedimentos se encuentra documentado en China, donde durante la década de 1980 se realizaron estudios batimétricos en 231 embalses. Los resultados mostraron que, en promedio, el 14.3 % de su volumen total de almacenamiento ya había sido ocupado por el sedimento (Campos, 2012). Con base en esta información y complementándola con los registros hidrométricos de transporte de sólidos, Zhou (1993) desarrolló el Diagrama Universal de Sedimentación en Embalses (DUSE), una herramienta gráfica que permite clasificar los sistemas presa-embalse en función del volumen de sedimento en suspensión que aportan los tributarios. Este diagrama se fundamenta en tres variables esenciales: el volumen de escurrimiento medio anual que reciben (VEMA), el volumen de sedimentos en suspensión medio anual que llega al embalse (VSMA) y la capacidad de almacenamiento al Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO). La proporción del volumen del embalse respecto a sus aportaciones líquidas y sólidas anuales permite identificar aquellos sistemas con mayores tendencias al azolvamiento. No obstante, en muchos países en vías de desarrollo, la aplicación práctica del DUSE se ve limitada por la escasez de datos hidrométricos y batimétricos confiables (Ramírez y Aparicio, 2008; Campos, 2012).

A mediados de la década de 1970, la Secretaría de Recursos Hídricos (SRH) realizó una campaña de levantamientos batimétricos en 35 embalses pequeños y medianos de México, ubicados en la región centro-noreste, cuya capacidad conjunta ascendía a 371 hectómetros cúbicos ( $\text{hm}^3$ ); los estudios revelaron una pérdida acumulada del 11.46 % en la capacidad de almacenamiento, atribuida a la sedimentación. Campos (2012) aplicó el DUSE para clasificar tales embalses de acuerdo con la producción de sedimento en suspensión de sus cuencas de aportación. Ante la falta de registros hidrométricos, recurrió a métodos indirectos para estimar las variables requeridas, calculando el VSMA al dividir el volumen de azolves acumulado entre los años de operación del embalse, y el VEMA a partir de datos las cartas de precipitación del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI (INEGI, 1980). A partir de estos cálculos, estimó una pérdida media anual de capacidad de 0.0675  $\text{hm}^3/\text{año}$  en

embalses pequeños, constituyendo un referente del análisis del azolvamiento en diversos estudios a nivel nacional (Barragán, 2000; Ramírez y Aparicio, 2009; Yutis *et al.*, 2014; Domínguez, 2019).

Sin embargo, este enfoque es esencialmente estático, ya que no incorpora de manera explícita la evolución temporal del azolvamiento ni la interacción con la operación del embalse. Al emplear tasas medias anuales, el análisis no permite evaluar el impacto de la acumulación progresiva de sedimentos sobre la capacidad útil efectivamente disponible para el suministro de agua. En consecuencia, si bien el DUSE resulta adecuado para comparar la magnitud relativa de los aportes sólidos entre sistemas, su aplicación aislada puede ser insuficiente para valorar la sostenibilidad operativa bajo condiciones de estrés hídrico. Una restricción particularmente relevante en países donde la toma de decisiones en materia hídrica se realiza bajo condiciones de información limitada.

México cuenta con más de 6000 presas, de las cuales 667 se clasifican como grandes. Aunque existen más de 2000 estaciones hidrométricas y plataformas de información pública, menos del 40 % cuenta con registros de sedimento en suspensión, la mayoría se concentra entre las décadas de 1960 y 1990 (Vaux *et al.*, 2007; García-Chevesich *et al.*, 2021). Por otro lado, los estudios batimétricos son escasos y no responden a una estrategia de monitoreo sistemático.

Ante este escenario, persiste la ausencia de herramientas gráficas que permitan integrar, de forma simultánea, el grado de azolvamiento acumulado y la suficiencia hidráulica de los embalses frente a las demandas actuales. Esta carencia limita la capacidad de diagnóstico temprano y la priorización objetiva de recursos y acciones de gestión, especialmente en contextos donde no es posible disponer de modelos predictivos complejos o de series de datos continuas.

Con el fin de atender esta necesidad, el presente trabajo propone una modificación metodológica del DUSE (DUSEM), que sustituye las relaciones adimensionales del método original por escalas temporales explícitas. Estas escalas representan, por un lado, la capacidad real de regulación del embalse a partir de su volumen útil y, por otro, la vida remanente del volumen de azolves de diseño bajo las condiciones observadas de aporte sólido. La integración de ambas métricas permite evaluar de manera conjunta la sostenibilidad operativa del embalse frente al azolvamiento y su vulnerabilidad ante el estrés hídrico regional.

El objetivo de este estudio es evaluar y jerarquizar el impacto operativo del azolvamiento en grandes embalses de México mediante la aplicación del DUSEM a 25 sistemas estratégicos, a partir de la integración e interpretación de información hidrosedimentológica y batimétrica disponible. La metodología propuesta busca fortalecer el diagnóstico temprano del azolvamiento, establecer criterios objetivos para la priorización de acciones de gestión y contribuir a una operación más sostenible del recurso hídrico.

---

## ZONA DE ESTUDIO Y DATOS

La zona de estudio se integra de 25 grandes presas construidas entre 1916 y 1995, localizadas en 13 de las 32 entidades federativas de México (Figura 1 y Tabla 1). Esta infraestructura presenta una antigüedad promedio de 64 años y capacidades de almacenamiento al NAMO de entre 12 y 3000 hm<sup>3</sup>, con cuencas de captación con dimensiones igualmente contrastantes, desde 69 km<sup>2</sup> hasta 58 340 km<sup>2</sup> (SSP, 2026).

La Figura 2 muestra las tasas anuales de ingreso del escurrimiento ( $V_{LA}$ ) que abastece a estos embalses, estimadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a partir de registros de niveles y caudales de salida (SSP, 2026). Esta variable es fundamental para caracterizar la disponibilidad del recurso hídrico; sin embargo, la tasa de ingreso de sedimentos transportados por la red de drenaje hacia los embalses ( $V_{SA}$ ) no suele encontrarse como un dato explícito en la misma base de datos. Por ello, el  $V_{SA}$  se obtuvo a partir de dos fuentes de información adicionales: En los embalses de las presas 1 a 15, la CONAGUA realizó levantamientos topo-batimétricos en las últimas dos décadas, lo que ha dado lugar a estudios regionales orientados a comparar la capacidad de almacenamiento actual con la de diseño, y a estimar el volumen de sedimentos acumulados en el periodo considerado (Moreno, 2014; Acosta, 2021; SSP, 2026). Aunque esta información es valiosa para dimensionar la pérdida de capacidad, su carácter puntual limita el análisis de la variabilidad interanual del azolvamiento. En consecuencia, el  $V_{SA}$  obtenido por este medio (Tipo 1) representa una tasa promedio de azolvamiento entre levantamientos sucesivos.

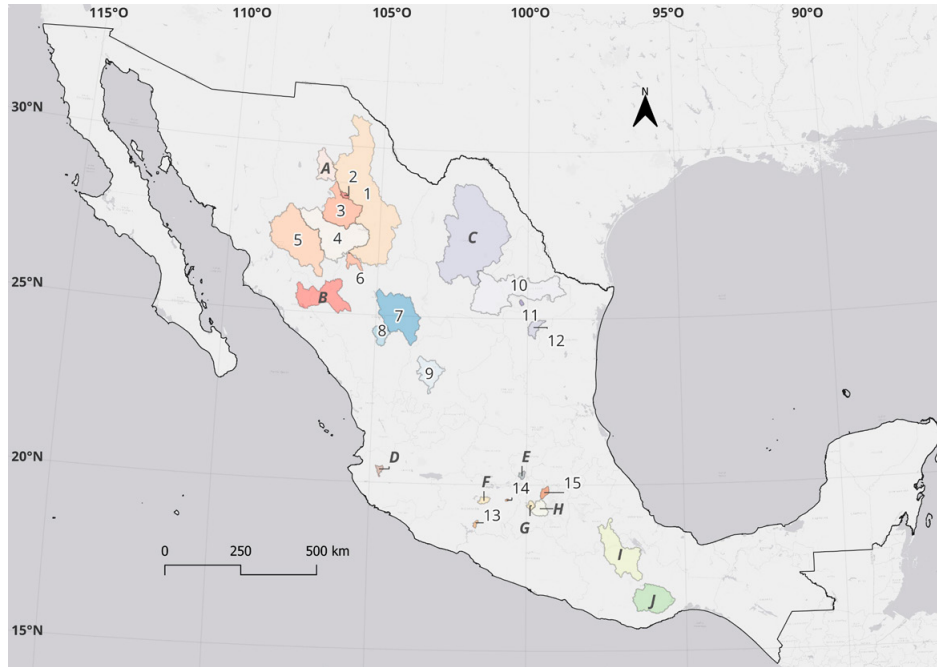


Figura 1 | Cuencas de captación de los 25 embalses en estudio.

Tabla 1 | Datos operativos de los embalses en estudio.

ID	Nombre oficial	Entidad	Área de captación (km <sup>2</sup> )	Año de construcción (antigüedad)	Altura de la cortina (m)	Capacidad (hm <sup>3</sup> )		
						Al NAMO	Útil	Azolves de diseño
1	Luis L. León	Chihuahua	58,340	1968 (57)	50.0	284.4	262.2	90.0
2	Chihuahua	Chihuahua	393	1960 (65)	31.8	23.4	22.5	2.0
3	Francisco I. Madero	Chihuahua	10,600	1949 (76)	62.0	333.3	330.8	85.0
4	La boquilla	Chihuahua	21,003	1916 (109)	105.5	2846.8	2751.9	113.0
5	Luis Donaldo Colosio	Sinaloa	26,000	1995 (30)	70.0	2703.0	2264.7	500.0
6	Federalismo mexicano	Durango	1,539	1979 (46)	39.5	245.4	212.5	10.0
7	Francisco Zarco	Durango	15,174	1968 (57)	35.3	309.2	305.7	70.0
8	Peña del águila	Durango	2,644	1954 (71)	24.0	27.9	26.8	1.9
9	El cazadero	Zacatecas	5,167	1964 (61)	27.1	22.2	14.1	8.0
10	Marte R. Gómez	Tamaulipas	32,220	1946 (79)	35.0	781.7	750.4	300.0
11	Rodrigo Gómez	Nuevo León	266	1961 (64)	38.0	39.5	36.0	2.0
12	José López Portillo	Nuevo León	1,708	1984 (41)	57.0	300.0	248.3	25.0
13	El cueramal	Michoacán	220	1985 (40)	25.0	11.9	10.7	1.2
14	Agostitlán	Michoacán	69	1954 (71)	38.0	15.7	15.0	0.8
15	Requena	Hidalgo	758	1919 (106)	35.0	56.5	51.3	10.0
A	Las lajas	Chihuahua	4,607	1964 (61)	48.0	91.0	88.0	3.0
B	Adolfo López Mateos	Sinaloa	10,972	1964 (61)	164.8	3086.6	3038.6	135.0
C	Venustiano Carranza	Coahuila	39,861	1930 (95)	49.0	1312.9	1300.0	10.0
D	Corrinchis	Jalisco	496	1977 (48)	58.0	20.0	16.5	3.5
E	Constitución de 1917	Querétaro	408	1969 (56)	46.0	65.0	52.6	5.0
F	Cointzio	Michoacán	661	1939 (86)	47.0	84.0	69.0	15.0
G	Ignacio Ramírez	Edo.Mex.	550	1965 (60)	23.5	20.5	18.8	3.0
H	José Antonio Álzate	Edo.Mex.	2,108	1962 (63)	25.0	34.5	31.9	8.0
I	Miguel de la Madrid	Oaxaca	14,038	1988 (37)	82.0	2,599.9	1,640.5	700.0
J	Benito Juárez	Oaxaca	9,000	1961 (64)	85.5	963.7	957.8	280.0

En contraste, para las presas A a J se dispone de registros de caudal y sedimento en suspensión provenientes de EH ubicadas en los tributarios aguas arriba de los embalses (BANDAS, 2026; SIH, 2026). Estos datos que permiten analizar la variabilidad temporal del transporte sólido y su relación con el régimen hidrológico. No obstante, la mayoría de estos registros (Tipo 2) corresponden a las décadas de 1960 y 1990, por lo que no reflejan la evolución reciente del sistema ni capturan la influencia de los cambios en el uso de suelo o el régimen hidroclimático de las últimas décadas.

En conjunto, estos casos ilustran la situación de información hidrosedimentológica en México: los datos disponibles sobre sedimentos en embalses son fragmentarios y dispersos, con batimetrías aisladas en algunos sitios y registros hidrométricos históricos en otros. Si bien ambas fuentes aportan información valiosa, su carácter parcial evidencia la necesidad de generar y articular nuevas fuentes de información, así como de desarrollar métodos que permitan integrar e interpretar de manera consistente la información existente, con el fin de comprender con mayor precisión la magnitud y dinámica del azolvamiento.

En ambos casos, los valores de  $V_{SA}$  empleados en este estudio corresponden a estimaciones reportadas en estudios técnicos y literatura especializada, derivadas a partir de información hidrométrica y batimétrica generada por la CONAGUA. En concordancia con el alcance de la investigación, el presente trabajo no busca recalculer ni validar dichas tasas de ingreso de sedimentos, sino analizar e interpretar de manera integrada la información disponible, considerando su origen, escala temporal y limitaciones inherentes.

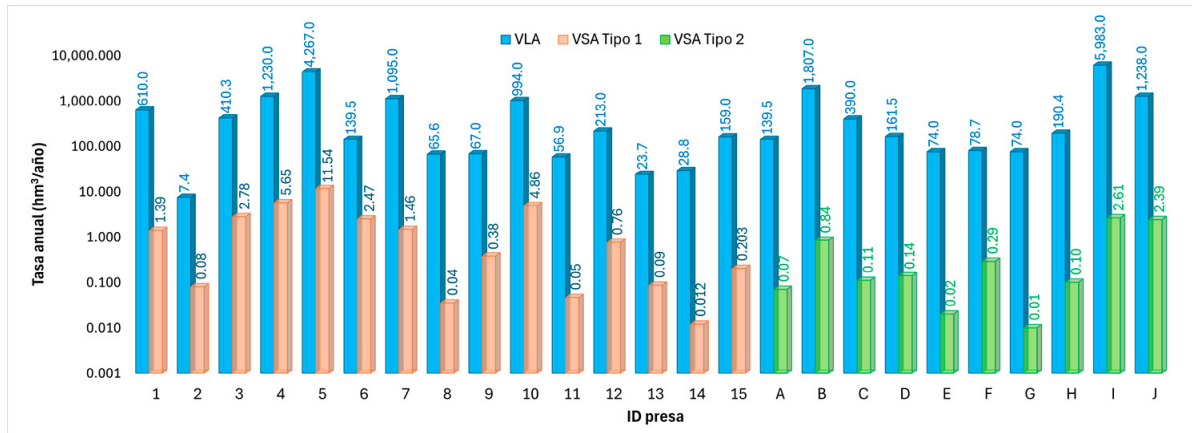


Figura 2 |  $V_{LA}$  y  $V_{SA}$  de los embalses en estudio.

## METODOLOGÍA

Para clasificar los embalses en estudio en función de sus aportes líquidos y sólidos se empleó el DUSE, formulado por Zhou (1993). Este método se construye a partir de los parámetros adimensionales  $\Phi$  y  $\Psi$  (Ecuaciones 1 y 2, respectivamente), los cuales caracterizan la relación entre la capacidad del embalse y los volúmenes medios anuales de agua y sedimentos que recibe (Zhou, 1993; Campos, 2012).

$$\Phi = \frac{C_{namo}}{VEMA} \quad (1)$$

$$\Psi = \frac{C_{namo}}{VSMA} \quad (2)$$

donde  $C_{namo}$  es la capacidad de almacenamiento de diseño del embalse al NAMO en  $\text{hm}^3$ ; VEMA es el volumen de escurrimiento medio anual de la cuenca de aportación en  $\text{hm}^3$  y VSMA el volumen de sedimento medio anual que ingresa al embalse en  $\text{hm}^3$ .

En un plano logarítmico doble, el DUSE permite clasificar los embalses de acuerdo con la concentración de sedimento en suspensión en sus corrientes de aportación, distinguiendo tres grupos (Figura 3a): El Grupo I incluye embalses alimentados por corrientes con concentraciones de sedimento en suspensión inferiores a 1 kg/m<sup>3</sup>, lo que indica aportes muy diluidos y por lo tanto una baja propensión al azolvamiento. El Grupo II corresponde a embalses cuyas corrientes principales presentan concentraciones entre 1 y 10 kg/m<sup>3</sup>, reflejando aportes moderados; mientras que el Grupo III comprende los embalses cuyos afluentes superan los 10 kg/m<sup>3</sup>, lo que los hace más susceptibles al azolvamiento debido a cargas sólidas elevadas (Zhou, 1993; Campos, 2012). En términos generales, este método compara que tan grande es el embalse respecto a sus aportes líquidos y sólidos en un año promedio.

Aunque el DUSE permite identificar los embalses que, en términos relativos, reciben mayores aportes de sedimentos, este criterio presenta limitaciones para fines operativos, ya que no incorpora explícitamente la dimensión temporal del azolvamiento ni su impacto directo sobre la capacidad efectiva de regulación de los sistemas.

Con el fin de introducir métricas temporales explícitas, diversos estudios emplean la relación entre la capacidad de almacenamiento del embalse y el volumen de escurrimiento medio anual (las mismas variables del DUSE), pero la expresan como una escala temporal característica, conocida como Tiempo de Retención Hidráulico, TRH (Kondolf *et al.*, 2014; Annandale *et al.*, 2016; Jinyun *et al.*, 2024). Sin embargo, en la mayoría de los casos, esta relación se calcula a partir de la capacidad total del embalse, sin considerar que una fracción significativa de este volumen está destinada, por diseño, al almacenamiento de sedimentos y al control de avenidas. En este contexto, y aprovechando la información sobre las características operativas de los grandes embalses documentadas por la CONAGUA en México, el presente estudio propone una modificación del DUSE ( DUSEM), basada en la comparación de dos escalas temporales independientes. Como primer parámetro se define la relación entre el volumen útil del embalse, efectivamente destinado al suministro de agua, y las aportaciones medias anuales del escurrimiento de su cuenca de aportación. Este parámetro, denotado como  $\Phi_M$  (3), representa una escala temporal hidráulica útil, expresada en años, asociada a la capacidad real de regulación del sistema:

De manera complementaria, para evaluar la evolución efectiva del azolvamiento, el volumen de azolves de diseño de cada embalse se dividió entre la tasa media anual de ingreso de sedimentos, obteniéndose una estimación de la vida útil teórica del volumen destinado a contener azolves bajo las condiciones observadas. Al restar los años de operación del embalse, el parámetro  $\Psi_M$  (4), representa la vida útil remanente del volumen de azolves de diseño, también expresada en años.

$$\Phi_M = \frac{V_U}{V_{LA}} \quad (3)$$

$$\Psi_M = \frac{V_{AD}}{V_{SA}} - A_{OP} \quad (4)$$

donde  $V_U$  es el volumen útil del embalse en hm<sup>3</sup>,  $V_{LA}$  es el volumen de escurrimiento medio anual en hm<sup>3</sup>/año,  $V_{AD}$  el volumen de azolves de diseño en hm<sup>3</sup>,  $V_{SA}$  el volumen medio anual de sedimentos que ingresa al embalse en hm<sup>3</sup>/año y  $A_{OP}$  el número de años en operación.

Bajo este enfoque, el DUSEM no compara directamente volúmenes ni razones adimensionales, sino dos escalas temporales características de cada sistema, asociadas de forma independiente a la dinámica hidráulica y al proceso de azolvamiento (Figura 3b). El parámetro  $\Phi_M$  indica cuántos años hidrológicos promedio de escurrimiento pueden ser almacenados en el volumen útil del embalse. Valores de  $\Phi_M < 1$  indican una capacidad útil suficiente para satisfacer las demandas de diseño y contar con una reserva estratégica.

Por su parte, el parámetro  $\Psi_M$  proyecta la vida útil remanente del volumen de azolves de diseño, bajo las condiciones observadas. En el plano logarítmico, una línea vertical  $\Phi_M = 1$  año, identifica el umbral a partir del cual la capacidad útil del embalse es equivalente a un año hidrológico promedio de aportaciones, mientras que una línea horizontal  $\Psi_M = 0$  años, indica el agotamiento del volumen de azolves de diseño; valores negativos indican sistemas que se estiman ya azolvados. La combinación de ambas escalas permite identificar estados operativos contrastantes en términos de seguridad hídrica y sostenibilidad frente al azolvamiento en cuatro grupos:

- Grupo A. Condición operativa favorable: Embalses que no han agotado el volumen de azolves de diseño ( $\Psi_M > 0$  años) y con una relación entre capacidad útil y aportaciones medias congruente con la disponibilidad hídrica ( $\Phi_M < 1$  año). Estos sistemas presentan una baja vulnerabilidad tanto al azolvamiento como al estrés hídrico bajo condiciones medias de operación.
- Grupo B. Riesgo hídrico dominante: Embalses que aún no han agotado su volumen de azolves de diseño ( $\Psi_M > 0$  años), pero el volumen útil resulta mayor que las aportaciones medias anuales ( $\Phi_M > 1$  año). En estos sistemas, el azolvamiento puede tener un efecto crítico a corto plazo, al reducir aún más un volumen de regulación ya limitado.
- Grupo C. Resiliencia estructural con azolvamiento: Embalses que han agotado el volumen de azolves de diseño ( $\Psi_M \leq 0$  años), pero que mantienen una relación favorable entre capacidad útil y aportaciones medias ( $\Phi_M < 1$  año). Corresponden típicamente a grandes embalses que, a pesar del azolvamiento, conservan capacidad suficiente para operar bajo condiciones hidrológicas adversas.
- Grupo D. Condición crítica: Embalses que presentan agotamiento del volumen de azolves de diseño ( $\Psi_M \leq 0$  años) y, simultáneamente, una relación desfavorable entre capacidad útil y aportaciones medias ( $\Phi_M > 1$  año). Estos sistemas concentran la mayor vulnerabilidad, al combinar pérdidas de capacidad por azolvamiento con una disponibilidad hídrica insuficiente.

Desde una perspectiva de priorización operativa, los embalses clasificados en el Grupo D representan la condición más crítica, donde el estrés hídrico es dominante y el azolvamiento puede detonar impactos severos. Mientras que los embalses del Grupo C, si bien presentan agotamiento del volumen de azolves de diseño, mantienen una capacidad de regulación suficiente bajo condiciones medias, por lo que su atención corresponde a horizontes de gestión de mediano a largo plazo.

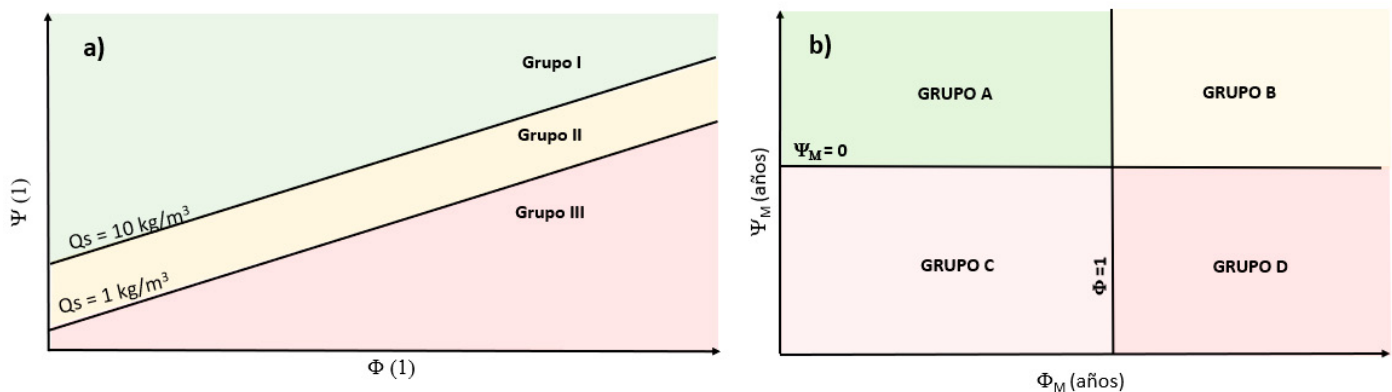


Figura 3 | Forma general del DUSE: a) versión original y b) modificada.

## RESULTADOS

En la Figura 4a se presenta la clasificación de los 25 grandes embalses analizados mediante el DUSE, identificándose seis sistemas en el grupo III: 2 Chihuahua, 3 Francisco I. Madero, 4 La Boquilla, 6.Federalismo Mexicano, 9 El Cazadero y 10 Marte R. Gómez. Estos embalses corresponden a los sistemas más propensos al azolvamiento cuando el análisis se limita al volumen medio anual de sedimentos recibido en relación con su capacidad total.

En contraste, la aplicación del DUSEM permite evaluar de manera conjunta el grado de azolvamiento y el impacto de la pérdida de capacidad útil sobre la regulación del recurso hídrico (Figura 4b). Bajo este enfoque, 17 embalses son identificados con problemas de azolvamiento en los grupos C y D (incluyendo los seis señalados por el DUSE), con una discretización adicional que permite reconocer aquellos sistemas que, además, presentan condiciones hidrológicas adversas. En particular, los embalses

2 Chihuahua, 4 La Boquilla, 6 Federalismo Mexicano, 12 José López Portillo y C Venustiano Carranza se clasifican como críticos (Grupo D), al presentar simultáneamente pérdidas de capacidad útil ( $\Psi_M < 0$  años) y déficit hídrico ( $\Phi_M > 1$  año), lo que implica que la demanda supera su disponibilidad media anual de agua.

Resulta especialmente ilustrativo el caso del embalse C Venustiano Carranza, que no era clasificado como prioritario por el DUSE (Grupo I), al presentar un aporte de sedimentos relativamente bajo en relación con su capacidad total. No obstante, al incorporar explícitamente la antigüedad del sistema y el aporte medio anual de sedimentos, el DUSEM lo identifica como un embalse potencialmente azolvado, con una magnitud de sedimentación suficiente para colmatarse el volumen de azolves de diseño hacia 2025. Este resultado, reforzado por la reestructuración gráfica del conjunto de embalses, evidencia la capacidad del nuevo enfoque para identificar condiciones de vulnerabilidad que no se manifiestan cuando el análisis se limita exclusivamente a los aportes de sedimentos.

Asimismo, el DUSEM permite discriminar, entre los embalses propensos al azolvamiento, con aquellos que presentan mayores restricciones hidrológicas y, por tanto, un mayor riesgo de escasez del recurso. Aunque 17 sistemas son identificados como potencialmente azolvados, los correspondientes al Grupo D emergen como los de atención prioritaria. En conjunto, estos resultados confirman la utilidad del método como herramienta de apoyo a la gestión, al orientar de manera más precisa la toma de decisiones en embalses afectados por procesos de sedimentación.

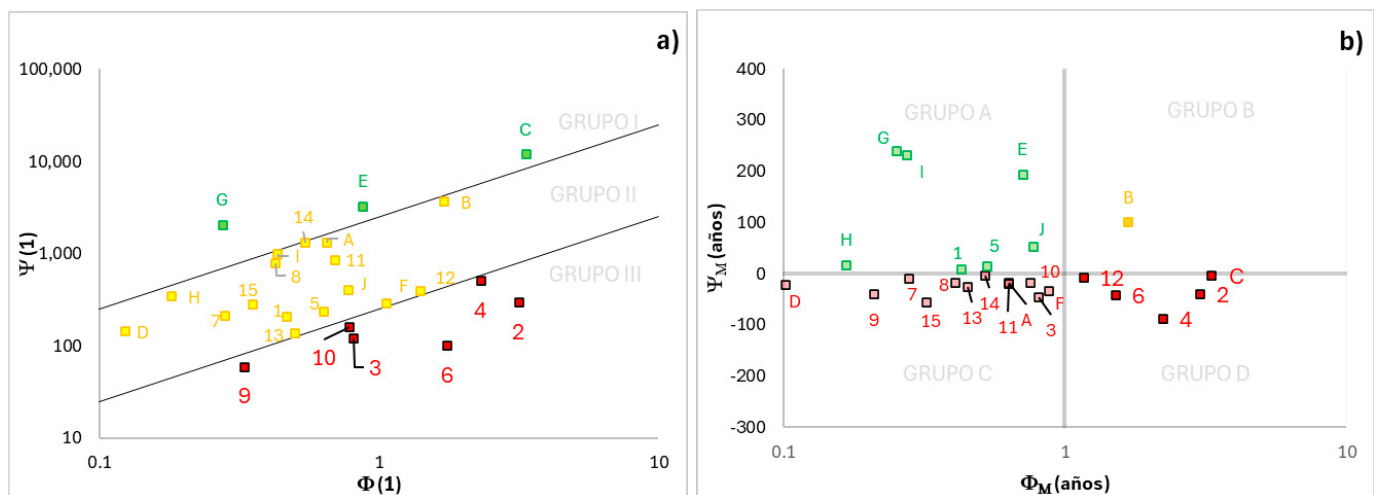


Figura 4 | Aplicación del DUSE en su versión a) original y b) modificada

La Tabla 2 resume los parámetros obtenidos por ambos métodos para los 25 embalses. Los valores negativos del parámetro  $\Psi_M$  del DUSEM, indican que los embalses se encuentran potencialmente azolvados, proporcionando un indicador cuantitativo adicional para la identificación de riesgos operativos.

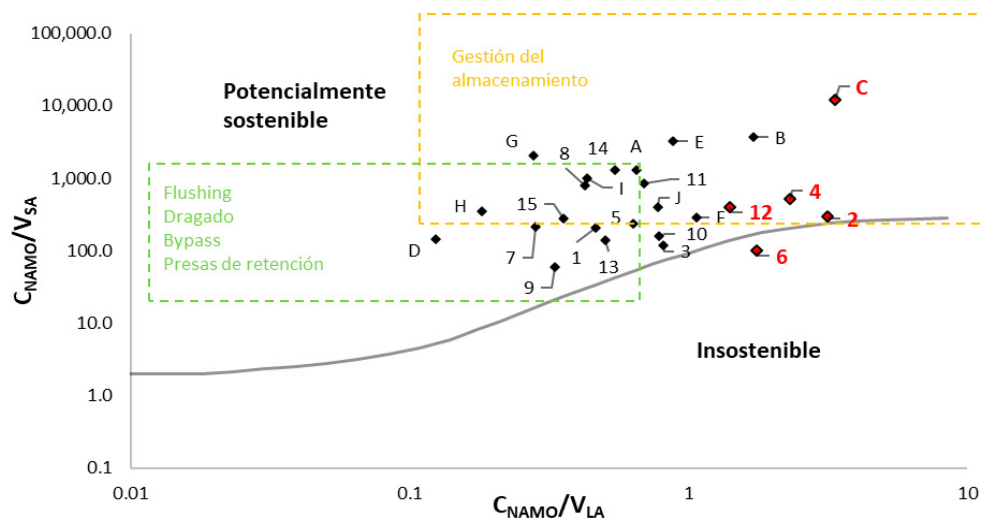
Con la información empelada en el diagnóstico de azolvamiento, se aplicó el criterio de Annandale *et al.* (2016) para evaluar la factibilidad de la aplicación de técnicas de remoción de sedimentos. La Figura 5 muestra que 12 embalses (1 Luis L. León, 5 Luis Donaldo Colosio 7 Francisco Zarco, 8 Peña del Águila, 9 El Cazadero, 13 El Cuernamal, 14 Agostitlán, 15 Requena, A Las lajas, D Corrinchis, H José Antonio Álzate e I Miguel de la Madrid) presentan relaciones entre capacidad y aportes líquidos y sólidos comparables con las reportadas en la literatura para sistemas donde dichas técnicas han sido aplicadas. En el resto de los sistemas analizados, incluidos los clasificados en el grupo D del DUSEM, la gestión del almacenamiento se identifica como la estrategia predominante y se acepta una pérdida progresiva de capacidad útil.

En complemento, se aplicó el criterio de Kondolf *et al.* (2014) para evaluar la factibilidad del *flushing* en los embalses donde potencialmente pueden aplicarse técnicas de remoción de sedimentos. La Figura 6 muestra que la condición crítica ( $C_{NAMO}/V_{LA} < 0.4$ ) se cumple únicamente en seis embalses, 5 identificados por el criterio de Annadale *et al.* (2016): cuatro

**Tabla 2** | Parámetros adimensionales del DUSE y DUSEM, aplicados a los embalses en estudio.

ID	Nombre oficial	$A_{OP}$ (años)	$V_{LA}$ (hm <sup>3</sup> /año)	$V_{SA}$ (hm <sup>3</sup> /año)	DUSE		DUSEM	
					$\Phi$ (1)	$\Psi$ (1)	$\Phi_M$ (años)	$\Psi_M$ (años)
1	Luis L. León	57	610.0	1.389	0.47	204.77	0.43	7.80
2	Chihuahua	65	7.4	0.080	3.16	294.17	3.04	-39.86
3	Francisco I. madero	76	410.3	2.777	0.81	120.02	0.81	-45.39
4	La boquilla	109	1,230.3	5.645	2.31	504.29	2.24	-88.98
5	Luis Donaldo Colosio	30	4,267.0	11.542	0.63	234.18	0.53	13.32
6	Fed. mexicano	46	139.5	2.475	1.76	99.16	1.52	-41.96
7	Francisco zarco	57	1,095.0	1.460	0.28	211.78	0.28	-9.05
8	Peña del águila	71	65.6	0.035	0.43	789.35	0.41	-17.24
9	El cazadero	61	67.0	0.378	0.33	58.70	0.21	-39.85
10	Marte R. Gómez	79	994.0	4.861	0.79	160.79	0.75	-17.29
11	Rodrigo Gómez	64	56.9	0.047	0.69	849.25	0.63	-21.00
12	José López portillo	41	213.0	0.757	1.41	396.41	1.17	-7.97
13	El cueramal	40	23.7	0.086	0.50	137.86	0.45	-26.10
14	Agostitlán	71	28.8	0.012	0.55	1304.65	0.52	-4.52
15	Requena	106	159.0	0.203	0.36	278.74	0.32	-56.67
A	Las lajas	61	139.5	0.070	0.65	1300.00	0.63	-18.14
B	Adolfo López mateos	61	1,807.0	0.840	1.71	3674.52	1.68	99.71
C	Venustiano Carranza	95	390.0	0.110	3.37	11935.45	3.33	-4.09
D	Corrinchis	48	161.5	0.140	0.12	142.86	0.10	-23.00
E	Constitución de 1917	56	74.0	0.020	0.88	3250.00	0.71	194.00
F	Coíntzio	86	78.7	0.290	1.07	289.66	0.88	-34.28
G	Ignacio Ramírez	60	74.0	0.010	0.28	2050.00	0.25	240.00
H	José Antonio Álzate	63	190.4	0.100	0.18	345.00	0.17	17.00
I	Miguel de la Madrid	37	5,983.0	2.610	0.43	996.13	0.27	231.20
J	Benito Juárez	64	1,238.0	2.390	0.78	403.22	0.77	53.15

del grupo C del DUSEM (7 Francisco Zarco, 9 El Cazadero, 15 Requena y D Corrinchis) y dos del grupo A (H José Antonio Álzate y G Ignacio Ramírez), y salvo el embalse G, todos se ubican por debajo de la diagonal de referencia, lo que indica una rápida recolmatación posterior al vaciado y una efectividad limitada del *flushing*, Reiterando la necesidad de ajustar la operación en los embalses críticos reconociendo las pérdidas de capacidad de almacenamiento ante la inviabilidad de la remoción de sedimentos.



**Figura 5** | Viabilidad de la remoción de sedimentos en la zona de estudio según Annandale et al. (2016).

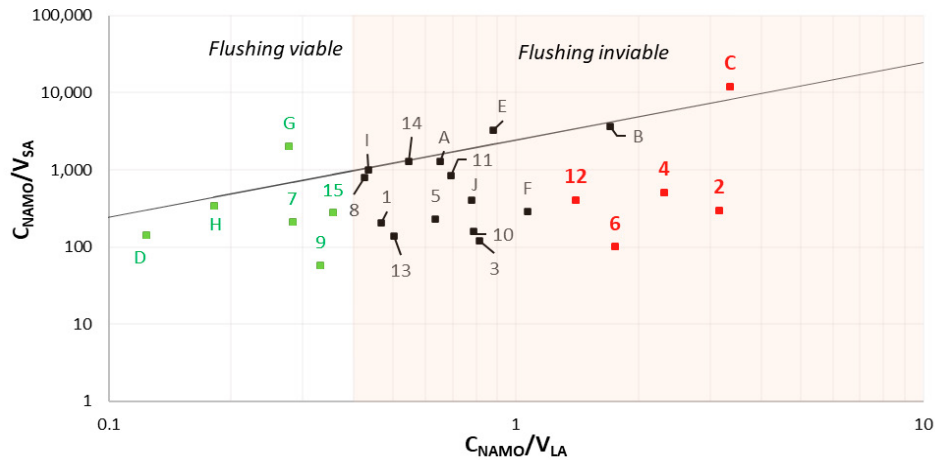


Figura 6 | Análisis de la viabilidad del *flushing* en los embalses en estudio según Kondolf *et al.* (2014).

## DISCUSIÓN

Según los resultados obtenidos, el DUSEM adquiere relevancia como una herramienta operativa de priorización para los organismos gestores, particularmente en contextos donde no existen recursos suficientes para actualizar de manera sistemática las curvas elevación–capacidad ni las políticas de operación en todos los sistemas. Su aplicación permite discretizar el conjunto de embalses y focalizar los esfuerzos de diagnóstico detallado y ajuste operativo en aquellos que presentan condiciones críticas, optimizando la asignación de recursos y atendiendo de forma preferente los sistemas con mayor riesgo de pérdida funcional.

El DUSE propuesto por Zhou (1993) y aplicado por Campos (2012) a embalses en México constituye un referente útil para identificar condiciones desfavorables frente al azolvamiento a partir de parámetros hidrológicos y geométricos, destacando principalmente los sistemas con altos aportes de sedimentos. Sin embargo, la aplicación del DUSEM, al incorporar parámetros operativos adicionales (volumen útil, volumen de azolves de diseño y antigüedad de la infraestructura) permite identificar diferencias sustanciales que modifican la interpretación de la problemática.

Por un lado, algunos embalses previamente identificados como críticos mediante el DUSE mantienen dicha condición bajo el DUSEM, lo que respalda la consistencia del enfoque. Por otro, la inclusión de variables operativas conduce a la reclasificación de sistemas que no figuraban como problemáticos bajo el DUSE y que presentan reducciones significativas de capacidad, con implicaciones directas en la regulación y el suministro de agua. Un ejemplo representativo es la presa C Venustiano Carranza, cuya condición crítica se explica no solo por los aportes de sedimentos en suspensión, sino también por la antigüedad de la infraestructura y el desequilibrio creciente entre demanda y disponibilidad hídrica en su cuenca de captación (Figura 4).

Este contraste evidencia el valor agregado del DUSEM: mientras el DUSE enfatiza la magnitud del flujo de sólidos, la modificación propuesta incorpora la dinámica funcional del embalse a lo largo del tiempo, ofreciendo un diagnóstico más sensible y representativo de su realidad operativa.

La consistencia de la clasificación obtenida mediante el DUSEM se respalda con la Figura 7, que presenta las curvas elevación–capacidad documentadas por la CONAGUA entre 2004 y 2009 para cuatro de los sistemas críticos (2 Chihuahua, 4 La Boquilla, 6 Federalismo Mexicano y 12 José López Portillo). En dicho periodo, las pérdidas de capacidad reportadas oscilan entre 3.17 hm<sup>3</sup> y 310 hm<sup>3</sup>, lo que representa entre el 11% y 15% de su capacidad al NAMO, congruente con lo reportado por Zhou (1993). A excepción el embalse 12 José López Portillo, estos embalses potencialmente han superaron sus volúmenes de azolves de diseño (Tabla 1), indicando una posible operación con pérdida de capacidad útil.

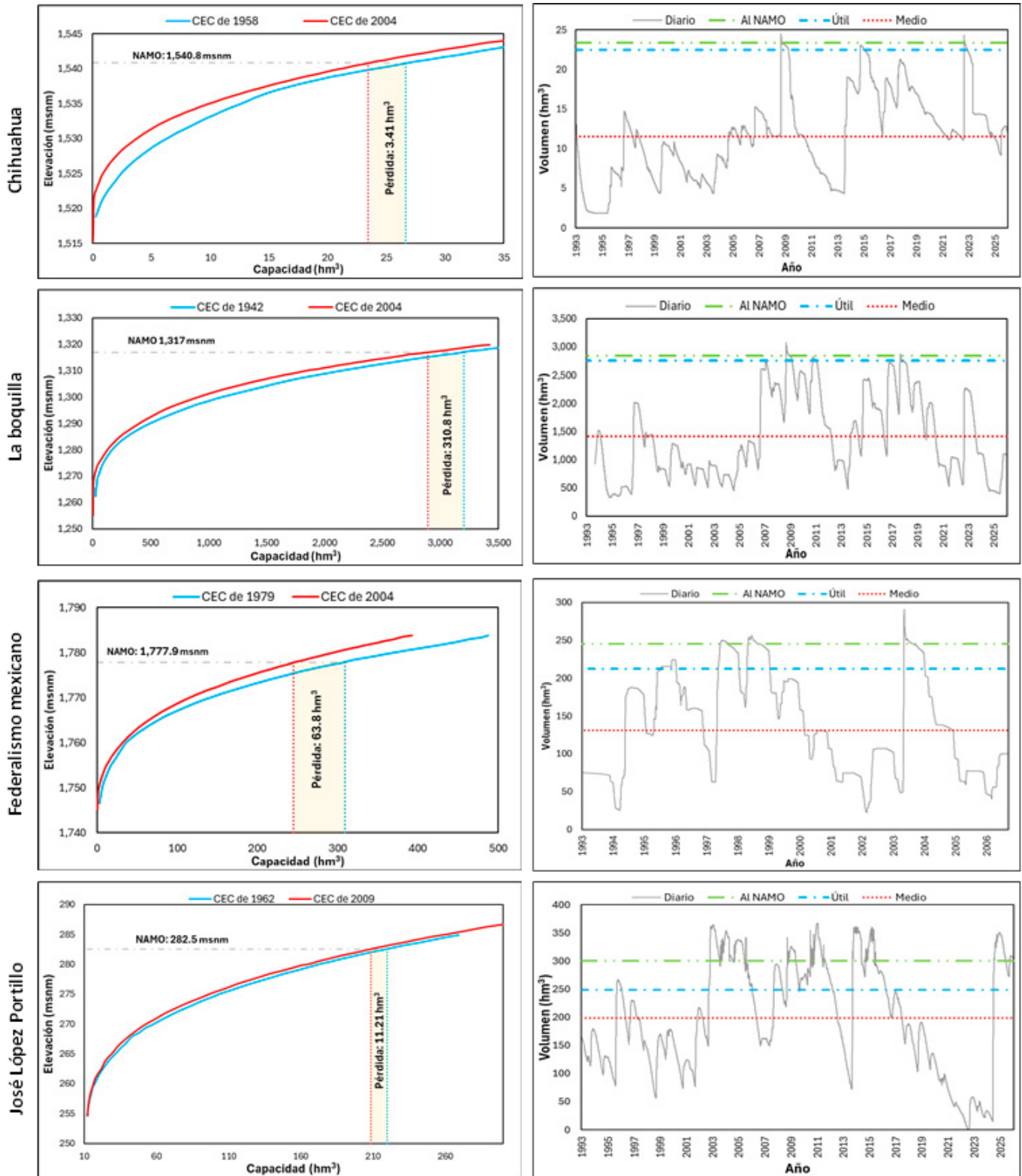


Figura 7 | Curvas elevación-capacidades de los embalses críticos y volúmenes de almacenamiento históricos.

Adicionalmente, los registros históricos del volumen almacenado reportados en las estaciones hidrométricas (SIH, 2026) muestran que los promedios de almacenamiento se sitúan entre 20 % y 50 % por debajo del volumen útil de diseño, lo que indica una condición persistente de estrés hídrico. En conjunto, estos resultados evidencian una doble condición de vulnerabilidad, tal cual lo considera el DUSEM: un déficit hidrológico recurrente y una pérdida progresiva de capacidad de almacenamiento por azolvamiento, cuya superposición reduce de forma sostenida la capacidad efectiva de regulación, incluso en años hidrológicos relativamente favorables.

En este contexto, las herramientas gráficas propuestas por Annandale *et al.* (2016) y Kondolf *et al.* (2014) resultan complementarias al DUSEM. Mientras dichos criterios se orientan a evaluar la viabilidad relativa de técnicas específicas de gestión de sedimentos, como el *flushing*, el DUSEM no busca determinar la factibilidad de una medida particular, sino discriminar el grado de vulnerabilidad funcional de los embalses frente al azolvamiento y al estrés hídrico. Esta distinción resulta especialmente relevante en sistemas donde las alternativas estructurales son limitadas y la gestión del azolvamiento se restringe principalmente al manejo de la operación.

La Tabla 3 sintetiza las principales diferencias conceptuales y operativas entre las herramientas analizadas y sus resultados en la zona de estudio. El análisis comparativo amplía el horizonte de interpretación al incorporar variables determinantes para comprender la pérdida de capacidad en embalses antiguos. En términos prácticos, el DUSEM no reemplaza, sino que complementa y enriquece el marco metodológico existente, proporcionando una jerarquización más realista de los embalses en riesgo y un mayor potencial para la priorización de acciones de gestión en contextos de recursos limitados.

**Tabla 3** | Comparación de herramientas gráficas y sus resultados principales.

Criterio	Eje de abscisas	Eje de ordenadas	Resultado principal
DUSE	TRH con capacidad nominal (normalizado)	Presión sedimentaria a la capacidad nominal (normalizada)	6 embalses reciben una aportación de sedimentos con una concentración mayor a 10 kg/m <sup>3</sup> .
DUSEM	TRH con capacidad útil	Presión sedimentaria al volumen de azolves de diseño	17 embalses azolvados, 5 de ellos críticos dado que presentan un grado de estrés hídrico; solamente 3 identificados por el DUSE.
Annandale	TRH con capacidad nominal	Presión sedimentaria relativa a la capacidad nominal	Medidas de remoción de sedimento son viables en 12 embalses. En 13 la única opción es la gestión de la operación asumiendo las pérdidas de volumen útil.
Kondolf	TRH con capacidad nominal	Presión sedimentaria relativa a la capacidad nominal	El <i>flushing</i> es viable solo en 6 embalses.

## CONCLUSIONES

El azolvamiento se confirma como una amenaza relevante para numerosos embalses de México, donde la combinación de altas concentraciones de sedimento en suspensión y balances hídricos deficitarios incrementa la vulnerabilidad operativa. La modificación propuesta al método del DUSE (DUSEM), aplicada a 25 grandes embalses, muestra que más de la mitad de los sistemas evaluados presentan reducciones significativas en su capacidad útil, con implicaciones directas para la seguridad hídrica regional y la confiabilidad de la operación.

El principal aporte metodológico del DUSEM consiste en integrar el número de años remanentes al volumen de azolves de diseño ( $\Psi_M$ ) con un indicador de presión hídrica relativa ( $\Phi_M$ ), lo que permite evaluar de forma conjunta la pérdida de capacidad de almacenamiento y la suficiencia de las aportaciones hídricas. Esta integración revela escenarios de doble vulnerabilidad, en los que coexisten restricciones de almacenamiento y déficit de agua, representando una mejora sustantiva respecto al DUSE original, centrado exclusivamente en el flujo de sólidos.

No obstante, aplicación del método se ve limitada por la disponibilidad de información, ya que en México persisten deficiencias en los registros operativos y en el monitoreo del sedimento, particularmente en embalses pequeños y medianos. Estas limitaciones subrayan la necesidad de fortalecer los programas de monitoreo hidrosedimentológico y de actualizar parámetros operativos fundamentales, como las curvas elevación-capacidad y las políticas de operación, especialmente en los sistemas con

mayor pérdida de capacidad útil. En este sentido, el uso complementario de técnicas de teledetección y modelación numérica ofrece una vía factible para reducir estas brechas de información.

Desde una perspectiva operativa, el DUSEM se plantea como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en contextos de información limitada, al permitir identificar de manera objetiva los embalses críticos, priorizar acciones de diagnóstico y actualización operativa, y orientar la asignación de recursos públicos para mantenimiento, rehabilitación o estrategias de gestión de sedimentos. Su carácter comparativo lo convierte en un instrumento particularmente útil para la planeación a escala nacional, donde la disponibilidad de recursos es limitada y la priorización resulta indispensable.

---

## AGRADECIMIENTOS

El primer autor, estudiante de Doctorado en Ingeniería (Civil-Hidráulica) en el Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) agradece el apoyo recibido por parte de la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) del Gobierno de México, mediante la beca de posgrado, la cual permitió la dedicación y continuidad de los estudios que dieron origen a la presente investigación. Asimismo, se agradece profundamente a la UNAM por el respaldo académico, la formación recibida y las facilidades otorgadas para la realización de este estudio.

---

## REFERENCIAS

- Acosta Rodríguez, Y.A. 2021. Evaluación de la acumulación de azolves en embalses ubicados en la RH-24 Bravo–Conchos. Tesis de Maestría, *Universidad Autónoma de Chihuahua*. Chihuahua, Mexico.
- Annandale, G.W., Morris, G.L., Karki, P. 2016. Extending the life of reservoirs. *World Bank*. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-0838-8>
- Annandale, G.W., Randle, T.J., Langendoen, E.J., Hotchkiss, R.H. 2018. Reservoir sedimentation management: A sustainable development challenge. *HydroLink*, 3, 72–75.
- Arreguín-Cortés, F.I., Murillo-Fernández, R., Marengo-Mogollón, H. 2013. Inventario nacional de presas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(4), 179–185.
- Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). 2026. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA*. <https://app.conagua.gob.mx/bandas/estaciones.html>
- Barragán, M. 2000. Remoción de sedimentos en embalses con ayuda de la modelación física. Tesis de Maestría, *Universidad Nacional Autónoma de México*, Ciudad de México, México.
- Campos-Aranda, D.F. 2012. Resultados de 35 batimetrías de la región centro-noreste de México, según el diagrama universal de sedimentación en embalses de Zhidong Zhou. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(3), 163–173.
- Degife, A., Worku, H., Gizaw, S. 2021. Environmental implications of soil erosion and sediment yield in Lake Hawassa watershed, south-central Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 10(1), 28. <https://doi.org/10.1186/s40068-021-00232-6>
- Domínguez, J. 2019. La construcción de presas en México: Evolución, situación actual y nuevos enfoques para dar viabilidad a la infraestructura hídrica. *Gestión y Política Pública*, 28(1), 3–37. <https://doi.org/10.29265/gypv.v28i1.551>
- Essel-Yorke, K.A., Anim, M., Nyarko, B.K. 2023. Sedimentation assessment using hydrological simulation and bathymetry survey: The case of River Amisasa drainage basin, Ghana. *Heliyon*, 9(3), e14343. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14343>
- Febles Díaz, J.M., Vega Carreño, M.B. 2016. Estimación del aporte de la erosión hídrica al azolve del embalse Mampostón. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(3), 18–30.

- García-Chevesich, P.A., Tapia, R.P., Lehmann, C., Rodríguez, O.G. M. 2021. Perspectivas de la gestión actual de sedimentos en nueve países de las Américas. PHI-VIII Documento Técnico No. 44. UNESCO, París, Francia.
- George, M.W., Hotchkiss, R.H., Huffaker, R. 2017. Reservoir sustainability and sediment management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(3), 04016077. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000752](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000752)
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1980. Cartas de precipitación total anual: Chihuahua, Guadalajara, Monterrey y México (escala 1:1 000 000). INEGI. [https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?utm\\_source](https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?utm_source)
- Jinyun, D., Fang, X., Chenyu, M., Chunrui, Y., Zhanchao, Z., Hongyan, Y. 2024. Analysis of the sediment deposition characteristics in the Three Gorges Reservoir and its influence factors. *Environmental Earth Sciences*, 83(16), 476. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11762-4>
- Johannis, M., Flint, L.E., Dettinger, M.D., Flint, A.L., Ochoa, R. 2016. The role of snowpack, rainfall, and reservoirs in buffering California against drought effects. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2016–3062*. <https://doi.org/10.3133/fs20163062>
- Kondolf, G.M., Gao, Y., Annandale, G.W., Morris, G.L., Jiang, E., Zhang, J., Yang, C.T. 2014. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. *Earth's Future*, 2(5), 256–280. <https://doi.org/10.1002/2014EF000254>
- Moreno Sánchez, J.T. (2014). Levantamiento aerofotogramétrico y topobatómétrico de la presa Cazadero, municipio de Sain Alto, Zacatecas. Tesis de licenciatura. *Universidad Nacional Autónoma de México*. Ciudad de México.
- Niu, Y., Shah, F.A. 2021. Economics of optimal reservoir capacity determination, sediment management, and dam decommissioning. *Water Resources Research*, 57(7), e2020WR028198. <https://doi.org/10.1029/2020WR028198>
- Nüsser, M. 2013. Technological hydroscaapes in Asia: The large dams debate reconsidered. En Nüsser, M. (Ed.), *Large dams in Asia: Contested environments between technological hydroscaapes and social resistance*. Springer, 1–14. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-2798-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2798-4_1)
- Odhiambo, B.K., Boss, S.K. 2004. Integrated echo sounder, GPS, and GIS for reservoir sedimentation studies: Examples from two Arkansas lakes. *Journal of the American Water Resources Association*, 40(4), 981–997. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01061.x>
- Owens, P.N. 2020. Soil erosion and sediment dynamics in the Anthropocene: A review of human impacts during a period of rapid global environmental change. *Journal of Soils and Sediments*, 20(12), 4115–4143. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02815-9>
- Rahmani, V., Kastens, J.H., DeNoyelles, F., Jakubauskas, M.E., Martinko, E.A., Huggins, D.H., Blackwood, A.J. 2018. Examining storage capacity loss and sedimentation rate of large reservoirs in the central US Great Plains. *Water*, 10(2), 190. <https://doi.org/10.3390/w10020190>
- Ramírez, J.M. R., Aparicio, J. 2009. Estimación de producción de sedimentos en cuencas: Aplicación al río Apulco, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 24(4), 145–157.
- Schleiss, A.J., Franca, M.J., Juez, C., De Cesare, G. 2016. Reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), 595–614. <https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1225320>
- Sistema de información hidrológica (SIH). 2026. Inventario de estaciones hidrométricas. *Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)*. <https://sih.conagua.gob.mx/hidros.html>
- Sistema de Seguridad de Presas (SSP). 2026. Inventario nacional de presas. *Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)*. <https://presas.conagua.gob.mx/inventario/>
- Stauch, G., Dörwald, L., Esch, A., Walk, J. 2024. 115 years of sediment deposition in a reservoir in Central Europe: Topographic change detection. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(2), 582–600. <https://doi.org/10.1002/esp.5722>
- Vaux, H., Marin, L., Holliday, L. (Eds.). 2007. Sustainable management of groundwater in Mexico: Proceedings of a workshop. *National Academies Press*.

Wang, H.W., Kondolf, G.M., Tullos, D.D., Kuo, W.C. 2018. Sediment management in Taiwan's reservoirs and barriers to implementation. *Water*, 10(8), 1034. <https://doi.org/10.3390/w10081034>

Yutsis, V., Krivosheya, K., Levchenko, O., Lowag, J., de León Gómez, H., Ponce, A.T. 2014. Bottom topography, recent sedimentation and water volume of the Cerro Prieto Dam, NE Mexico. *Geofísica Internacional*, 53(1), 27–38. [https://doi.org/10.1016/S0016-7169\(14\)71488-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7169(14)71488-6)

Zhou, Z. 1993. Remarks on reservoir sedimentation in China. En Fan, S.S., Morris, G.L. (Eds.), Notes on sediment management in reservoirs: National and international perspectives. *Water Resources Publications*, 153–160.