



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de la sedimentación
de embalses mediante
distintas metodologías**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Adrian Martínez Córdova

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Luis Aragón Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025

Resumen

La acumulación de sedimentos en un embalse desde el punto de vista del aprovechamiento del almacenamiento de agua, es un fenómeno que se debe considerar, debido a que da lugar a la pérdida de capacidad del embalse, e inclusive puede provocar que se vuelva obsoleto.

En el presente trabajo se determinó con métodos empíricos el volumen de sedimentos atrapado en 52 presas de México, las cuales disponen de información medida para estimarlo directa o indirectamente.

Posteriormente, se realizó un análisis de los resultados medidos y calculados, partiendo desde lo general a lo particular, con la finalidad de determinar que metodología es la más adecuada para estimar el volumen de sedimentos acumulado en las presas de la zona de estudio.

A partir del volumen de sedimentos que llega a una presa, se calculó el volumen sedimentado en el embalse, considerando que un porcentaje de sedimentos continúa hacia aguas abajo. Posteriormente se consideró una disminución de este volumen debida a la compactación del sedimento desde la fecha de inicio de operación de la presa hasta el año 2024. Una vez calculado este volumen, se determinó la pérdida de capacidad de almacenamiento respecto al volumen al NAME y NAMO.

A partir de los datos medidos se propusieron tres ecuaciones para calcular el volumen de sedimento atrapado a partir de distintas características fisiográficas de la cuenca.

El análisis de resultados indica que los métodos empíricos no son exactos, sin embargo, se identificaron los más adecuados para las presas analizadas y se recomienda en que condiciones es mejor utilizarlos.

Este trabajo (Tesis de Licenciatura No. 16) fue desarrollado en el Grupo de Enseñanza e Investigación en Ingeniería y Ciencias del Agua (GEIICA). Además de la presente, el asesor ha dirigido 6 tesis de Especialidad, 6 de Maestría y 1 de Doctorado.

GEIICA está formado por estudiantes de Servicio Social, Tesistas de Licenciatura y Posgrado (Especialidad, Maestría, Doctorado y Posdoctorado) y profesores-investigadores del Departamento de Hidráulica, División de Ingenierías Civil y Geomática, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, quienes comparten el gusto por la enseñanza en las asignaturas que imparten a nivel Licenciatura y Posgrado, la práctica profesional para solventar problemáticas de la mejor manera, desarrollar e impulsar la investigación en el área de la ingeniería y ciencias del agua.



Agradecimientos

A mi mamá y papá por brindarme siempre el amor y apoyo necesario para poder llevar a cabo mis estudios, les agradezco de todo corazón su ayuda.

A mi hermana Fabiola por orientarme, alentarme y apoyarme siempre con mis estudios

Al Dr. José Luis Aragón Hernández por brindarme siempre el apoyo y el espacio necesario para mi desarrollo como ingeniero y la elaboración presente trabajo.

Al M. I. Edson López Basilio y el Ing. Luis Armando Hernández González por el apoyo brindado durante la elaboración del presente trabajo y las revisiones realizadas a este mismo.

A mi compañera de grupo GEICA, la Ing. Esp. Ilse Rosas por apoyarme en la utilización de programa QGIS.

A mis sinodales Ing. Víctor Manuel Palma Valderrama, M. I. Sixta Hinndi Mendoza Pérez, M. I. Marisol Alfonso Romero y M. Oscar David Arroyo García, por el tiempo de dedicado a la revisión del presente proyecto.

Índice

Introducción.....	1
Objetivos.....	3
Objetivo principal.....	3
Objetivos secundarios	3
Descripción del trabajo	3
1 Marco teórico	5
1.1 La cuenca hidrográfica	5
1.2 Componentes de una presa	6
1.3 Erosión de cuencas hidrográficas	7
1.3.1 Erosión hídrica.....	7
1.3.2 Transporte de material sólido	8
1.3.3 Depósito de los sedimentos	9
1.4 Distribución espacial de sedimentos en un embalse.....	9
1.5 Volumen de sedimentos en un embalse.....	9
1.5.1 Mediciones directas	10
1.5.2 Métodos empíricos	14
1.5.3 Volumen de sedimento medio anual	21
1.5.4 Eficiencia de atrapamiento	21
1.5.5 Compactación del sedimento.....	22
1.6 Manejo de sedimentos	24
1.6.1 Métodos preventivos	24
1.6.2 Métodos correctivos	24
1.7 Regresión estadística	25
1.8 Impactos	25
2 Zona de estudio	27
2.1 Ubicación geográfica.....	27
2.2 Topografía	30
2.3 Clima	31
2.4 Uso de suelo y vegetación	33
2.5 Edafología.....	35
2.6 Precipitación.....	36
2.7 Estaciones hidrométricas	37

2.8	Información disponible.....	38
3	Estimación de la sedimentación	40
3.1	Registros de sedimentación en los embalses	40
3.2	Caracterización de las cuencas de aportación.....	41
3.3	Resultados.....	43
3.3.1	Erosión hídrica, aporte y volumen de sedimentos	44
3.3.2	Volumen de sedimento medio anual	49
3.3.3	Volumen de sedimento atrapado	50
3.3.4	Pérdida de capacidad de los embalses	51
4	Análisis de resultados.....	54
4.1	Datos medidos vs datos calculados	54
4.1.1	Error relativo.....	56
4.2	Ajuste de modelos	57
4.2.1	Una variable.....	57
4.2.2	Dos o más variables	60
4.2.3	Mejor formulación.....	61
4.3	Volumen de sedimentos vs características de la cuenca y del embalse.....	61
5	Conclusiones	67
	Referencias	68
	Anexos	77
	ANEXO A. Ubicación de embalses y cuencas de aportación	77
	ANEXO B. Curvas capacidad-elevación	84

Introducción

El agua es uno de los recursos más importantes para el ser humano; sin embargo, éste no se encuentra siempre en el mismo estado ni en las mismas proporciones, debido a cambios importantes que ocurren en el medio y que alteran las fases del ciclo hidrológico, por ejemplo, el agua superficial que se evapora y asciende a la atmósfera debido a la energía producida por el sol ha experimentado un cambio significativo debido al calentamiento global, y el vapor que se condensa no encuentra las condiciones favorables para generar nubes, lo cual trae consigo largos periodos de sequía. Por otro lado, la precipitación se encuentra con diferentes obstáculos al caer, ya que puede ser absorbida por la vegetación, almacenarse en cuerpos de agua superficiales o escurrir por la superficie antes de infiltrarse en el subsuelo (Chow, 2000); lo anterior, puede alterar los niveles freáticos y la disponibilidad del recurso, es por ello que las presas son un vital elemento para su almacenamiento y administración de los recursos hídricos.

La construcción de presas en México está documentada desde la época prehispánica. Un ejemplo de ello es la presa Purrón, en el estado de Puebla, la cual data del siglo VII A.C. y que se mantuvo en operación durante aproximadamente 900 años (Rojas, 2009). En la laguna de Yuriria en Guanajuato existen evidencias de su confinamiento en el año 1550 con el propósito de almacenar agua para riego (Rojas, 2009). Entre los siglos XVII y XIX se construyeron presas de mampostería en el centro del país, principalmente en Aguascalientes, Guanajuato, Estado de México y Querétaro, que fueron empleadas para abastecer las haciendas de la colonia española; muchas de las cuales, siguen en operación (Domínguez, 2019).

Actualmente, en México existen más de 6,000 presas, con una capacidad de almacenamiento total de aproximadamente 150,000 hectómetros cúbicos, 210 (3.5% del total) representan el 85% del almacenamiento total respecto al Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO), en 2022 el volumen almacenado en esta represento 77,400 hectómetros cúbicos (CONAGUA & SEMARNAT, 2023). El uso de las presas en México es diverso, pero principalmente son empleadas en la gestión y el abastecimiento de agua para el uso doméstico e industrial, con un uso predominante en la agricultura (Arreguín-Cortés & Marengo-Mogollón, 2013).

El almacenamiento de agua a través de presas para el riego de cultivos es vital para México, principalmente para los estados del Norte, donde se presenta la mayor variabilidad hidrológica. Es por ello que los efectos del cambio climático, que traen consigo la disminución de la disponibilidad del recurso, sumado a fenómenos cíclicos como la niña y el niño, podrían comprometer el bienestar económico y social del país (Mendivil et al., 2023), tal como se documentó en el año 2022, cuando las sequias extremas afectaron entre el 30 y el 60% del territorio nacional (BANXICO, 2022).

En un contexto global, el cambio en las condiciones climáticas, sumadas al crecimiento poblacional y la sobreexplotación del suelo, han provocado un incremento en la erosión de las cuencas de aportación de las presas y la consecuente generación de sedimento, que es trasportado por los ríos y depositado en los embalses, lo cual conduce a la pérdida de

capacidad útil de almacenamiento de agua; y aunque este fenómeno evoluciona lentamente, se estima que a nivel mundial estas pérdidas alcanzarán valores de entre el 23% y 28% en el año 2050 (1,655 hm³), equivalente al uso anual de India, China, Indonesia, Francia y Canadá juntos (Perera et al., 2022). Se estima que la pérdida de capacidad en México será de entre 27% y 30% (Perera et al., 2022).

Una manera de estudiar este fenómeno consiste en estimar la tasa de sedimentación, como un porcentaje del volumen de almacenamiento que se pierde cada año (García, 2008); no obstante, esta es una variable que cambia en función de la región analizada. White (2001) estimó una tasa de sedimentación anual aproximada de 2.3% en China y de 0.3 a 1% en el resto de Asia, 0.2% en Norteamérica, 0.2% en Europa, 0.1% en Centro y Sudamérica, de 0.08 a 1.5% en el Norte de África, 0.23% en África Subsahariana, 1.5% en Medio Oriente y una tasa mundial de 0.5 a 1 %. Por lo que el monitoreo constante de este proceso es de vital importancia para la ingeniería civil. En esta línea, en México se realizan mediciones rutinarias del caudal sólido en los ríos, con las cuales es posible estimar el volumen de sedimentos que llega a un embalse. Durante la época de avenidas, cuando se genera una mayor tasa de transporte de sedimentos, los procesos empleados miden el material transportado cerca de la superficie (sedimento en suspensión), lo cual puede ser inexacto debido que existe un perfil de concentración del mismo. Por otra parte, las mediciones de caudal sólido son escasas, pues solo cerca de 400 estaciones hidrométricas en la red nacional cuentan con esta información (Arreguín et al., 2021).

Para analizar la tasa de sedimentación en embalses de México, la literatura técnica dispone de información de 35 presas distribuidas en la región Centro y Norte, con la cual, Campos-Aranda, (2012) caracterizó la producción de sedimentos en sus cuencas de aportación, por medio del Diagrama Universal de Sedimentación en Embalses, DUSE (Wang & Hu, 2009); concluyó que el DUSE es una herramienta muy útil para analizar datos obtenidos por medio de una batimetría. La pérdida de capacidad se estimó en 0.0675 hm³/año en presas pequeñas de la región; sin embargo, estos resultados se basan en estudios in situ realizados durante la segunda mitad de la década de 1970 (Campos-Aranda, 2012).

Para cuantificar la pérdida de capacidad de almacenamiento debido a la acumulación de sedimentos en presas, es común emplear la curva elevación-área-capacidad inicial, una representación gráfica fundamental del volumen de agua almacenado en el embalse en función de su nivel (Ochoa-García, 2021) y compararla con estudios batimétricos (medición directa) que se realizan periódicamente, durante la vida útil de la presa. De esta forma, Acosta (2021), estudió las pérdidas de capacidad en presas de la zona noreste de México.

En este trabajo se realiza la estimación de la erosión en las cuencas de aportación de algunas presas de México por medio de los métodos empíricos más empleados (USLE, Namba, USBR, Gracia, Owen y Branson) con la intención de establecer una relación entre esta variable y las pérdidas de capacidad de almacenamiento en los embalses. Los resultados se comparan con datos disponibles en la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en 14 de los principales embalses del país, así como en 38 embalses secundarios con estudios documentados en Acosta (2021), Campos-Aranda (2012) y Moreno (2014).

Justificación

Dado que el almacenamiento de agua en las presas de México disminuye año con año debido a la sedimentación de los embalses, es muy importante conocer el grado de erosión en las diferentes cuencas y el aporte de sedimentos a las presas correspondientes, ya que es vital para la gestión de recursos y el mantenimiento de la infraestructura hidráulica. Por ello, las distintas técnicas de estimación del fenómeno, permiten identificar los parámetros de mayor influencia, las presas que presentan un potencial flujo de sólidos elevado, y aquellas que corren un mayor riesgo de perder parcial o totalmente su capacidad de almacenamiento, con los cuales es posible evaluar las estrategias aplicables en el control de sedimentos y el desazolve.

Objetivos

Para el desarrollo de este trabajo se planteó un objetivo principal y unos objetivos secundarios que a continuación se describen.

Objetivo principal

Estimar la producción de sedimentos de las cuencas de aportación, el sedimento almacenado y la pérdida potencial de la capacidad de almacenamiento en algunos embalses de México.

Objetivos secundarios

Determinar las características fisiográficas de las cuencas de aportación.

Estimar el aporte de sedimentos de las cuencas de aportación con distintas metodologías.

Estimar el volumen de sedimentos almacenado en los embalses.

Comparar el volumen de sedimentos calculado con datos medidos.

Calcular la pérdida de capacidad de los embalses.

Descripción del trabajo

El primer capítulo del presente trabajo describe los conceptos, definiciones, clasificaciones, ecuaciones y métodos utilizados para describir de forma general el proceso de sedimentación en embalses, así como los procedimientos utilizados para su medición y las consecuencias generadas por su acumulación.

En el segundo capítulo se describe la zona de estudio; debido a la extensión, las presas en estudio se agruparon en 7 zonas, en cada una se describe la topografía, clima, edafología, uso de suelo, precipitación media anual, ubicación de estaciones hidrométricas e información requerida en los métodos empíricos utilizados.

En el tercer capítulo se determinan las características fisiográficas por medio de sistemas de información geográfica (SIG); con dicha información se describe el procedimiento de cálculo y los resultados de cada método, expresado en erosión de suelos y aporte de sedimentos.

En el cuarto capítulo se analizan los resultados obtenidos con cada uno de los métodos empíricos empleados, y se comparan con los datos medidos; adicionalmente, se proponen ecuaciones con una o más variables independientes para estimar la aportación de sedimentos.

1 Marco teórico

En este apartado se describen los conceptos relacionados con la sedimentación en embalses; partiendo de la definición de los elementos fundamentales de una presa, para posteriormente, describir la teoría relacionada con la erosión de las cuencas hidrográficas y la producción de sedimentos, el comportamiento del fenómeno, métodos de medición e impactos en los embalses.

1.1 La cuenca hidrográfica

El volumen de agua almacenado en una presa proviene del agua que fluye a través de una cuenca hidrográfica (**Figura 1**) definida como una zona de la superficie terrestre en donde las gotas de lluvia que caen sobre la misma tienden a ser drenadas hacia un punto de salida (Aparicio, 1992); en el caso de la cuenca de aportación de una presa, el punto de salida son las obras hidráulicas ubicadas en la cortina de la misma. De acuerdo con la ubicación del punto de salida de la cuenca, se dividen en: endorreicas, donde el punto de salida se encuentra dentro de la cuenca y exorreicas, cuando el punto de salida se encuentra en los límites de la misma.

Las características más importantes son (Aparicio, 1992):

- Parteaguas: línea imaginaria formada por los puntos topográficos con mayor elevación.
- Área de la cuenca: superficie proyectada horizontalmente por el parteaguas.
- Cauce principal: corriente de la cuenca caracterizada por presentar la mayor longitud, elevación o área de aportación y pasa por la salida de la cuenca.
- Red de drenaje: formada por todas las corrientes de una cuenca.

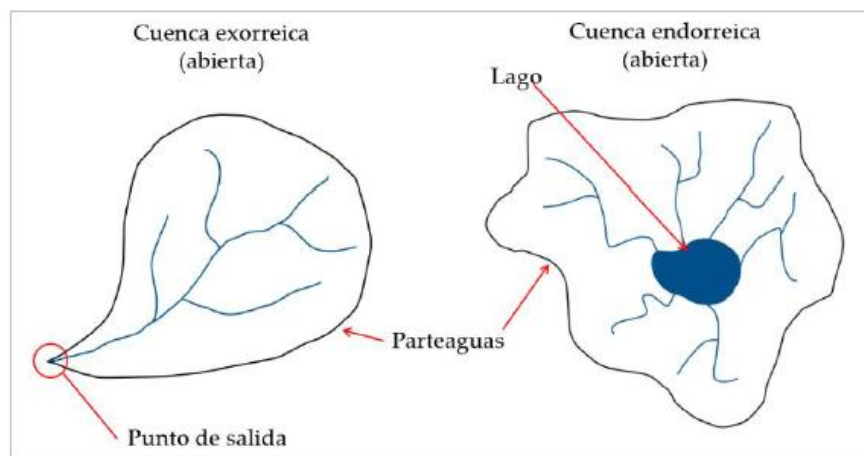


Figura 1. Componentes principales de una cuenca (Hernández (2022)).

En las presas se almacena agua y sedimentos. A continuación, se describe los componentes de una presa y los procesos de erosión, transporte y sedimentación que intervienen en este fenómeno.

1.2 Componentes de una presa

Una presa se define como un conjunto de estructuras cuyo objetivo es almacenar o desviar el agua escurrida en una cuenca de captación. De acuerdo a su principal función, las presas pueden agruparse en dos grandes áreas (Arreguín, 2021):

- a) Aprovechamiento: riego, abastecimiento de agua, usos industriales, generación de energía eléctrica, navegación, esparcimiento, acuacultura, mejoramiento y conservación del medio ambiente.
- b) Defensa: control de avenidas y control de azolves

Aunque la gran mayoría de las presas en el país tienen como uso principal el aprovechamiento de los recursos hídricos, es común que su diseño considere un volumen de superalmacenamiento, que es empleado para el control de avenidas extraordinarias que protege de inundaciones a poblaciones aguas abajo.

Las estructuras que conforman una presa son (Arreguín, 2021): cortina, obra de toma, obra de excedencias, desagüe de fondo y obras de desvío (**Figura 2**)

Es importante señalar la diferencia entre presa, embalse y cortina; una presa es un conjunto de estructuras que es empleado para almacenar o desviar el agua proveniente del escurrimiento de una cuenca, un embalse es el espacio físico donde se almacena el agua y una cortina es una estructura construida al paso de la corriente para almacenar y/o derivar el agua que fluye hacia la misma (Arreguín, 2021).

De acuerdo a la elevación del agua en el embalse (**Figura 2**), se identifican los siguientes volúmenes y niveles (Aparicio, 1992):

- Corona: parte superior de la cortina
- Bordo libre (BL): distancia de seguridad que permite tener un margen en caso de emergencias.
- NAME (Nivel de Aguas Máximo Extraordinario): nivel máximo de almacenamiento del embalse.
- NAMO (Nivel de Aguas Máximo de Operación): nivel máximo en que se puede operar el embalse.
- NAMINO (Nivel de Aguas Mínimo de Operación): nivel mínimo necesario para que pueda operar la obra de toma.
- NAMIN (Nivel de Aguas Mínimo): nivel esperado de los azolves en toda su vida útil (Arreguín, 2021).
- Volumen de superalmacenamiento: volumen entre el NAMO y el NAME
- Volumen o capacidad útil: volumen destinado para satisfacer las demandas de agua de acuerdo al uso determinado de cada embalse.
- Volumen muerto: volumen de agua que no se puede disponer.
- Volumen de azolves: se encuentra por debajo de la obra de toma, destinado al almacenamiento de los azolves durante toda la vida útil.

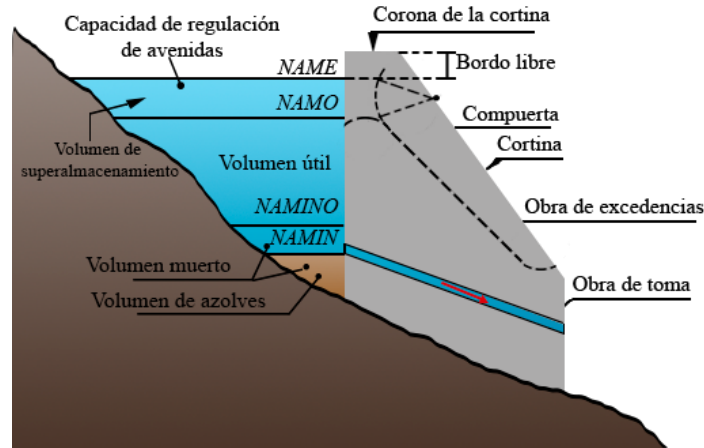


Figura 2. Componentes de una presa. Modificado de Aparicio (1992).

1.3 Erosión de cuencas hidrográficas

La erosión de una cuenca es un fenómeno que se refiere a la degradación del suelo y la roca por diversos agentes físicos como el agua, el viento, la actividad sísmica, entre muchos otros, que generan partículas más pequeñas, que son transportadas por medios hídricos (erosión hídrica), eólicos o por la intervención de las actividades del ser humano. En este trabajo se aborda la erosión hídrica. La erosión hídrica se puede dividir en 3 fases (Gracia, 1997a): (a) la remoción de partículas del suelo por la lluvia (erosión hídrica), (b) transporte de material sólido y (c) el depósito de los sedimentos.

1.3.1 Erosión hídrica

Debido a la complejidad del proceso de la erosión hídrica (**Figura 3**), la remoción de partículas del suelo se clasifica en los siguientes tipos (Gracia, 1997a):

a) **Erosión laminar**

El impacto en el suelo de las gotas de lluvia genera un desprendimiento de partículas, si el suelo tiene la capacidad de absorber totalmente el agua de lluvia las partículas se depositarán dependiendo de la energía cinética de la lluvia y la pendiente del terreno. Cuando la infiltración es menor que la intensidad, el agua escurrirá y arrastrará las partículas de suelo. El flujo superficial arrastra principalmente material fino en función de las características físico-químicas del suelo y la magnitud del flujo.

b) **Erosión de canalillos**

El escurrimiento superficial tiene la capacidad de generar pequeños canalillos que aportan importantes cantidades de sedimento. Los canalillos usualmente cambian dependiendo de las tormentas y/o desaparecen debido a las actividades de agricultura.

c) **Erosión de cárcavas**

Cuando los canalillos aumentan sus dimensiones impidiendo que puedan ser removidos por las actividades agrícolas, se denominan cárcavas. Comprenden desde pequeños agrietamientos hasta las grandes barrancas; se caracterizan por su crecimiento constante

hacia aguas arriba y generan continuos deslizamientos de las paredes de las márgenes que propician una pérdida acelerada del suelo.

d) **Erosión de canales**

Flujo concentrado que puede llegar a canales o cauces bien definidos, por lo tanto, generará esfuerzos cortantes contra el fondo y paredes de los canales, iniciando la erosión de los mismos.

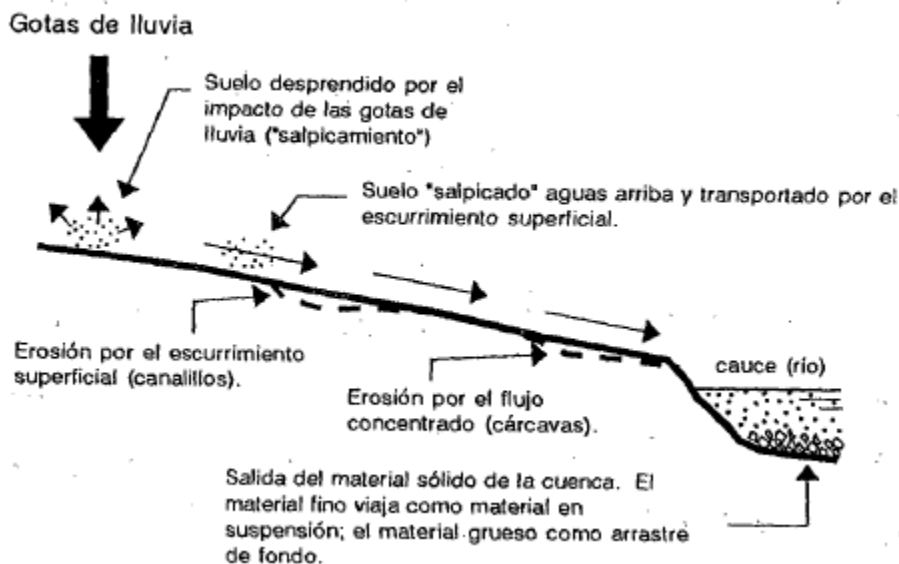


Figura 3. Proceso de erosión en cuencas (Gracia, 1997a).

La erosión de las cuencas tiene diversas afectaciones, entre ellas a los embalses y a la agricultura; la primera se tratará más adelante y en la última se reduce la capa arable del suelo, degradando las áreas de cultivo, provocando una alteración del nivel de fertilidad que disminuye la capacidad de sostener actividades agrícolas (FAO, 1993).

1.3.2 Transporte de material sólido

Las partículas de suelo y roca contenidas en el flujo de una corriente son transportadas debido a que el esfuerzo cortante promedio sobre el fondo del cauce excede el esfuerzo crítico tractivo sobre el material. El transporte de las partículas sólidas se presenta como rodamiento o deslizamiento sobre el fondo, a saltos dentro del flujo, suspendido o soportado por el flujo durante el tiempo de transporte y como una combinación de los anteriores (Berezowsky & Vilchis, 2000).

Debido a que las características y tamaño de las partículas pueden ser diferentes dentro de una misma corriente de flujo, se pueden clasificar distintos tipos:

a) **Carga de fondo**

Conformado por arenas, gravas y boleos; generalmente ruedan, se deslizan o avanzan a saltos apoyándose en el fondo.

b) Carga en suspensión

Conformado por partículas finas menores a 0.62 mm de material del fondo del cauce que viajan por la corriente (carga de fondo en suspensión) y el material de la superficie de la cuenca arrastrado por el escurrimiento pluvial, también conocido como material de carga o de lavado (Maza & García, 1996).

1.3.3 Depósito de los sedimentos

El material sólido se transporta desde las zonas más altas de la cuenca a las más bajas, encontrando su depósito final a la salida de la misma. Dado que las presas funcionan como una barrera que impide el paso de un flujo de agua, la mayor parte de la porción sólida del flujo (sedimentos) no puede continuar su camino y se acumula en el fondo de los embalses (**Figura 4**).

1.4 Distribución espacial de sedimentos en un embalse

Teóricamente, la distribución de los sedimentos en los embalses depende de diversos factores, como la velocidad del flujo de llegada, los niveles operativos y la variabilidad hidrológica en la región; pero entre ellos, destaca el tamaño de las partículas sólidas, pues se ha comprobado que las partículas de mayor tamaño se depositan a la entrada del embalse formando deltas, como efecto de la disminución de la velocidad del agua, mientras que las partículas de menor tamaño continúan su flujo a través del embalse, en algunos casos como una corriente de densidad, para finalmente depositarse en el fondo (**Figura 4**). Debido a las distintas características del sedimento fino, en algunas ocasiones pueden identificarse como una fracción del agua que genera una turbidez generalizada (Gracia, 1997b).

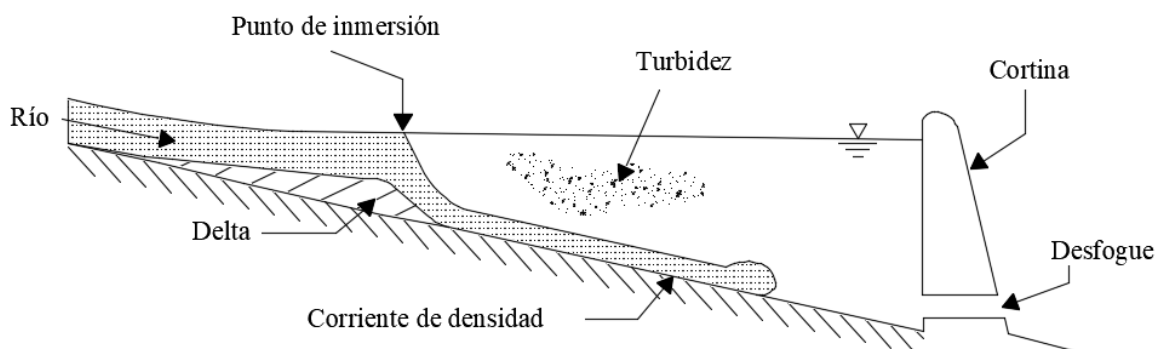


Figura 4. Comportamiento general de los sedimentos en un embalse. Modificado de Gracia (1997b)

El comportamiento no siempre es el mismo ya que depende de distintos factores relacionados con los sedimentos, las condiciones del embalse, las avenidas y los distintos niveles de operación.

1.5 Volumen de sedimentos en un embalse

Existen diferentes métodos para determinar la cantidad de sólidos que entran en un embalse y la evolución del fondo del mismo; suelen clasificarse en dos grandes grupos: (1) mediciones directas, que se llevan a cabo por medio del aforo de las corrientes de entrada y

la aplicación de levantamientos topográficos/batimétricos; y (2) estimaciones numéricas, cuando no se tienen datos medidos, basadas en criterios de predicción para estimar la cantidad de sedimentos generados por las cuencas de captación; la principal ventaja de estos criterios es que se puede estimar el aporte de sedimentos para una presa que aún no se ha construido (Gracia, 1997b). Las estimaciones numéricas se pueden clasificar en métodos empíricos, estadísticos y de base física.

1.5.1 Mediciones directas

Se utilizan cuando es posible medir el sedimento que se encuentra depositado en el fondo del embalse, por medio de estudios topográficos/batimétricos, y/o por la tasa de ingreso de partículas sólidas registradas en estaciones hidrométricas instaladas aguas arriba.

Estudios topográficos y batimétricos

Consisten en realizar un estudio de niveles del fondo del embalse; cuando este se encuentra total o parcialmente vacío pueden emplearse herramientas de topografía como estaciones totales; pero cuando el sedimento se encuentra constantemente sumergido, se recurre a un estudio batimétrico, que se lleva a cabo por medio de sonares montados en embarcaciones pequeñas. Con esta información puede obtenerse un modelo digital del terreno (MDT) y posteriormente una curva elevaciones-volúmenes; para estimar el volumen de sedimento en el embalse, se realiza una comparación con información similar de un periodo anterior. Estos estudios dependen de los instrumentos, equipo y recursos disponibles para su realización. Hoy en día, existen investigaciones en desarrollo enfocadas a estimar la batimetría de un embalse por medio de imágenes de satélite y algoritmos de teledetección (López-Basilio, 2024; Zhu et al., 2020).

Aforo de las corrientes de entrada

El volumen de sedimento que cruza una sección transversal de un río puede medirse con equipos mecánicos y electrónicos de acuerdo al tamaño de las partículas que se desea estudiar; sin embargo, la gran mayoría de estos instrumentos se enfoca en la medición del sedimento en suspensión o de fondo, y ningún equipo es capaz de medir el total de la carga sólida (Camargo & Franco, 2005).

El volumen de sólidos en suspensión y arrastre de fondo varía de acuerdo a su origen. Cuando el sedimento proviene de la cuenca, es decir, sedimento fino, se transporta en suspensión. Cuando proviene del fondo de la red de drenaje, puede componerse en mayor medida por material grueso y se transportan en el fondo de la misma con una cantidad mínima de sedimento fino. Algunos de los equipos más utilizados son (Camargo & Franco, 2005):

a) Muestreadores de sedimento en suspensión:

- **Muestreador instantáneo:** Consiste en descender un recipiente (muestreador) de forma vertical u horizontal hasta el punto que se desea obtener la muestra, una vez adquirida, se activa un mecanismo que cierra el recipiente; se obtiene una muestra

con un volumen entre 1 y 5 litros (**Figura 5**). Si el equipo se sumerge en aguas someras se utilizan varillas para operar el recipiente, sin embargo, en aguas profundas se requiere de cables o cuerdas.

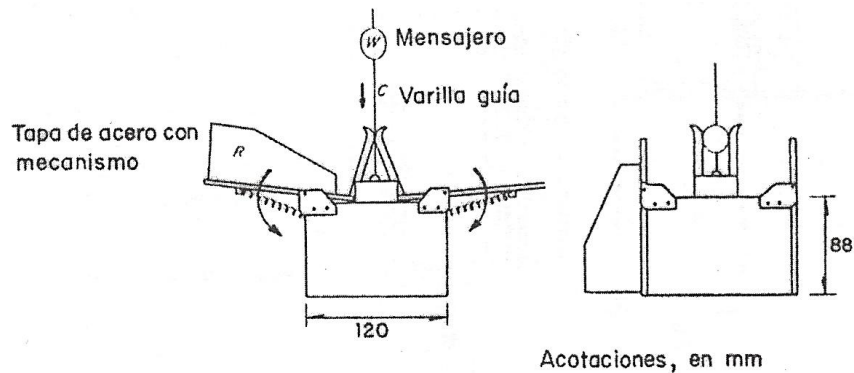


Figura 5. Muestreador horizontal instantáneo de sedimentos en suspensión (Camargo & Franco, 2005).

- **Muestreadores integrales:** Se componen principalmente de 3 elementos, un recipiente en el que se deposita la muestra, una boquilla y un conducto que permite liberar el aire atrapado durante el muestreo. Algunos muestreadores integrales cuentan con un mecanismo de inicio automatizado. Pueden clasificarse en 3 tipos:
 - **Muestreadores integrales de punto:** El recipiente obtiene la muestra permaneciendo en un punto determinado, durante un periodo de tiempo (**Figura 6**).

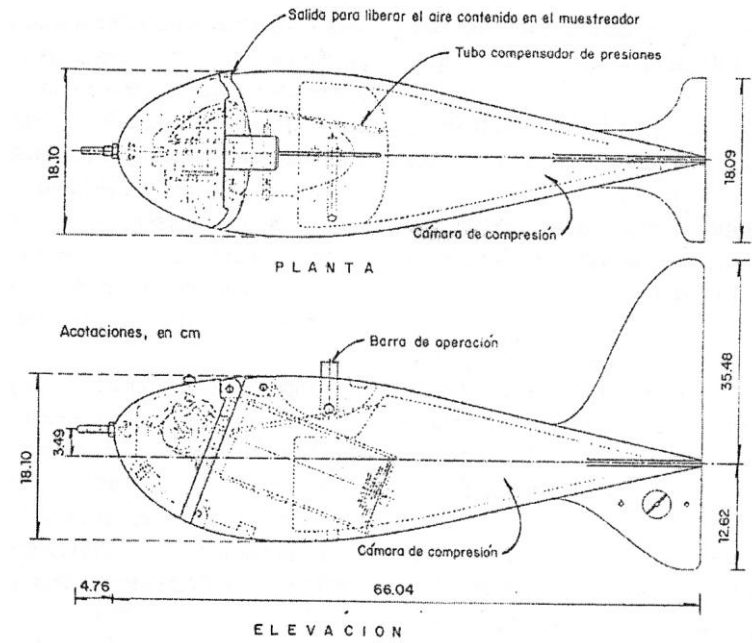


Figura 6. Muestreador integral de punto, US-P-46R (Camargo & Franco, 2005).

- **Muestreadores integrales de profundidad:** Tienen la capacidad de recoger una muestra mientras el equipo se desplaza verticalmente (**Figura 7**).

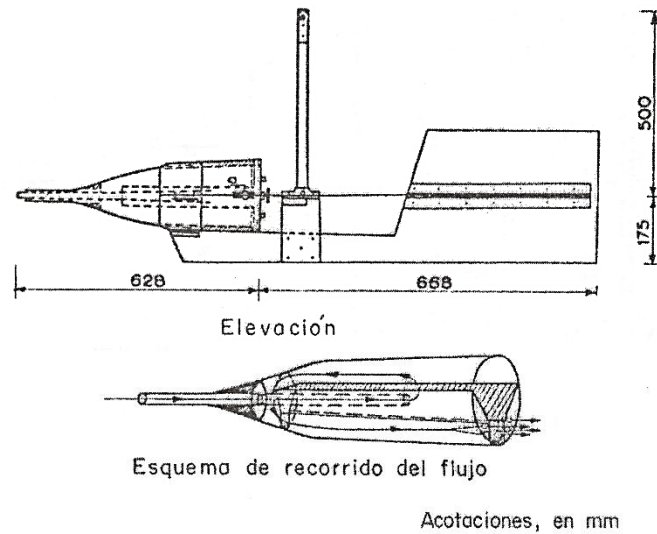


Figura 7. Muestreador integral de profundidad, botella de Delft (Camargo & Franco, 2005).

- **Muestreadores integrales de registro continuo:** Las partículas sólidas en suspensión impiden el paso de la luz a través del agua (translucidez), por lo tanto, estos equipos tienen la capacidad de tomar registros automáticos de forma continua.

b) Muestreadores de sedimento de fondo:

El método de muestreo se selecciona de acuerdo a las condiciones hidráulicas y morfológicas, y este puede ser directo o indirecto.

Métodos directos

Se basan en la medición de la masa de los sedimentos que atraviesan una sección transversal de un río en un tiempo determinado. Estos muestreadores se clasifican de acuerdo a su diseño o principio de operación en:

- **Muecas o trampas:** Se utilizan en estructuras pequeñas como desarenadores que permiten atrapar el material que se mueve en el fondo, mediante ranuras o trampas ubicadas en el fondo del canal. El material obtenido se extrae por gravedad o bombeo, y se cuantifica (**Figura 8**).

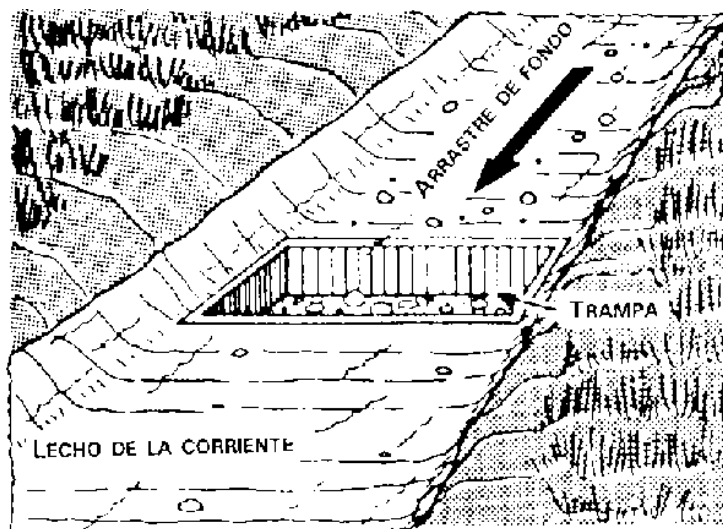


Figura 8. Trampa de arrastre de fondo (Hudson, 1997).

- **De canasta:** Conformados por un recipiente permeable que capta el material arrastrado al hacer contacto con el lecho, cuando se iza el equipo, este acciona el cierre de una compuerta, permitiendo realizar mediciones en intervalos de tiempo.
- **De paneles:** Dispositivos que presentan una forma de cuña en su sección transversal; la corriente debe ser perpendicular a la cara de menor área de la cuña. Con el paso del flujo los sedimentos se depositan sobre los paneles debido al peso propio (Figura 9).

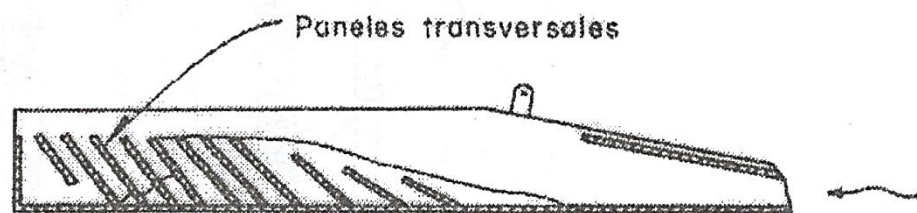


Figura 9. Trampa de panel (Camargo & Franco, 2005).

- **De foso a cámara:** Permite captar y acumular de forma continua el material arrastrado, posteriormente es extraído por medios mecánicos, cuantificado y asociado al tiempo que estuvo sumergido el equipo.

Métodos indirectos

De acuerdo al procedimiento realizado por los equipos pueden dividirse en 3 grupos:

- **Muestreadores convencionales:** Estos equipos están basados en criterios que calculan el arrastre de fondo como una parte del transporte total o evaluando únicamente el arrastre de fondo, con la desventaja que el segundo requiere conocer la composición del material que forma el lecho.
- **Muestreadores tipo sonoro:** Utilizan instrumentos acústicos que registran ondas sonoras producidas por la fricción o choque de las partículas provenientes del arrastre de fondo, los equipos cuentan con micrófonos capaces de registrar el sonido

proveniente del choque, posteriormente se genera una señal que el amplificador transmitirá a un receptor.

- **Rastreo de lecho:** Permite cuantificar el arrastre de fondo para números de Froude menores o iguales a 1, rastreando el movimiento de la configuración del fondo en la dirección del flujo. El arrastre total de sedimentos se calcula utilizando la Ecuación 1:

$$q_{BT} = (1 - m)(C_B) \left(\frac{\Delta \bar{H}}{2} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde q_{BT} es el arrastre total de fondo, m la porosidad de lecho, C_B la velocidad media de traslado de la ondulación del fondo y $\Delta \bar{H}$ la altura de la ondulación del fondo.

1.5.2 Métodos empíricos

Los métodos empíricos permiten estimar la cantidad de sedimento removido en una cuenca como resultado de la erosión hídrica, o el volumen de sedimentos que llega a la salida de la cuenca en un periodo de tiempo determinado en función de las diferentes características fisiográficas de las cuencas y los patrones de precipitación. Uno de los más empleados alrededor del mundo es la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE por sus siglas en inglés).

USLE

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE por sus siglas en inglés) fue desarrollada por Wischmeier y Smith (1978), con el objetivo de estimar la pérdida de suelo debida a la erosión laminar y canalillos, siendo validada experimentalmente con información de más de 10,000 lotes de escurrimiento analizados estadísticamente. La pérdida de suelo se calcula a partir de la Ecuación 2.

$$A = RKSLCP \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde A es la pérdida de suelo ($t/ha/año$), R la erosividad de la lluvia ($MJ * mm/ha * hr - año$), K el Factor de erodabilidad del suelo ($t * ha * h/MJ * mm * ha$), S el factor del grado de la pendiente, L el factor del grado de longitud de la pendiente, C el factor del manejo de vegetación y P el factor de prácticas mecánicas en el manejo de la vegetación agrícola.

Cada factor de la USLE puede obtenerse con datos del terreno, nomogramas o ecuaciones adaptadas a distintas regiones.

Factor R

La erosividad de la lluvia (Factor R), representa la capacidad de las gotas de lluvia para iniciar la erosión (Harsányi et al., 2022). El factor R se puede estimar con distintas metodologías, como el índice modificado de Fournier (Arnoldus, 1977) o las propuestas de Escalante (2004) y Loredo (2007).

Para calcular este factor, se requieren datos de la intensidad y la energía cinética de la lluvia. No obstante, la escasez de registros de alta resolución obliga al uso de distintas ecuaciones empíricas (Harsányi et al., 2022). De esta forma, Arnoldus (1977) propuso el índice modificado de Fournier (Ecuación 3), utilizando como datos de partida la precipitación mensual y la precipitación anual total.

$$MFI = \sum_i^{i=12} \frac{p_i^2}{P_{total}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde MFI es el índice modificado de Fournier, p_i la precipitación mensual y P_{total} la precipitación anual.

Además, Escalante (2004) propuso un método para estimar R en sitios con información de lluvia horaria, con la cual se obtiene el factor R por medio de la Ecuación 4.

$$R = 1.702 \left\{ \frac{[\sum 1,099(1 - 0.72e^{-1.27I_j})(I_j T_j)](I_{30})}{100} \right\} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde R es el potencial erosivo de la lluvia, I_j la intensidad de la precipitación [mm/h], T_j incremento específico de tiempo [h] e I_{30} la intensidad máxima de la tormenta en 30 minutos [mm/h].

Otra alternativa fue propuesta por Loredó (2007), quién regionalizó el factor R en México dividiendo el territorio en 14 zonas (Figura 10), cada una con una ecuación para estimar el factor R en función de la precipitación media anual (Tabla 1).

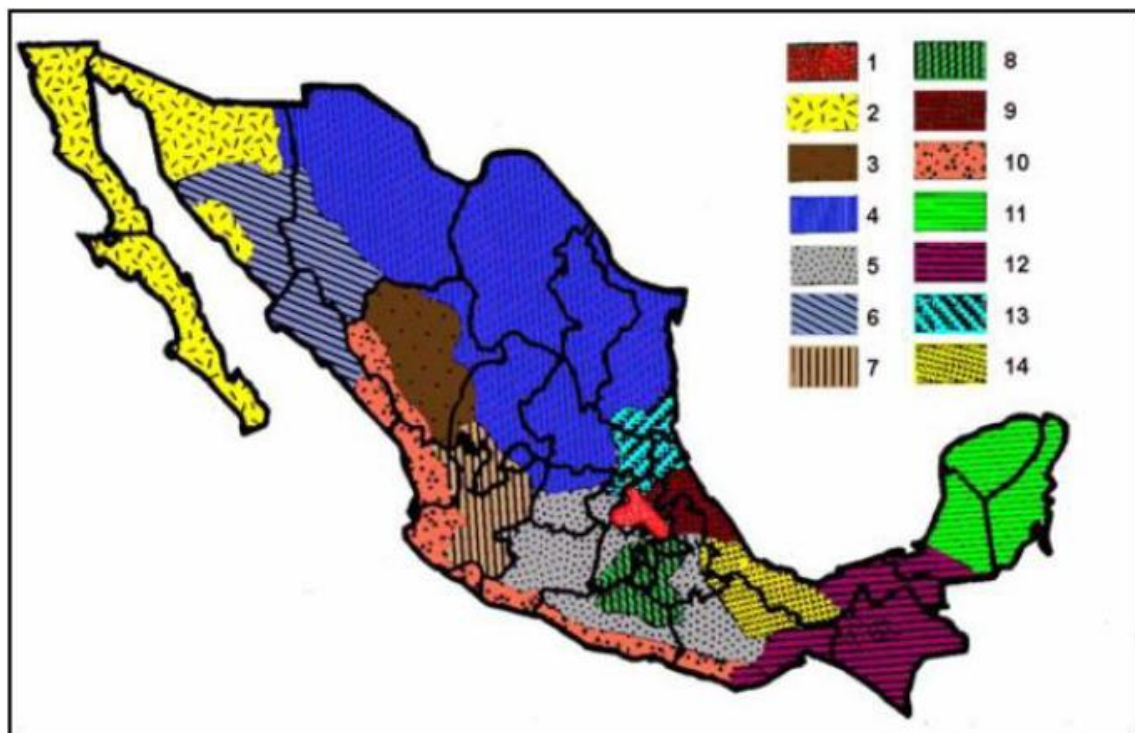


Figura 10. Regiones para estimar el factor R (Loredó et al., 2007)

Tabla 1. Ecuaciones de erosividad en función de la lluvia media anual (Loredo et al., 2007).

Región	Ecuación	R ²
I	$R = 1.20785P + 0.002276P^2$	0.92
II	$R = 3.45552P + 0.006470P^2$	0.93
III	$R = 3.67516P - 0.001720P^2$	0.94
IV	$R = 2.89594P + 0.002983P^2$	0.92
V	$R = 3.48801P - 0.000188P^2$	0.94
VI	$R = 6.68471P + 0.001680P^2$	0.90
VII	$R = 0.03338P + 0.006661P^2$	0.98
VIII	$R = 1.99671P + 0.003270P^2$	0.98
IX	$R = 7.04579P - 0.002096P^2$	0.97
X	$R = 6.89375P + 0.000442P^2$	0.95
XI	$R = 3.77448P + 0.004540P^2$	0.98
XII	$R = 2.46190P + 0.006067P^2$	0.96
XIII	$R = 10.74273P - 0.001008P^2$	0.97
XIV	$R = 1.50046P + 0.002640P^2$	0.95

Factor K

La erodabilidad del suelo (factor K) se asigna de acuerdo a las características del suelo, como el criterio propuesto (Figura 11) por Wischmeier y Smith (1978) o el propuesto (Tabla 2) por la FAO (1980), donde se asigna un valor de K de acuerdo a la clasificación edafológica del suelo y su textura.

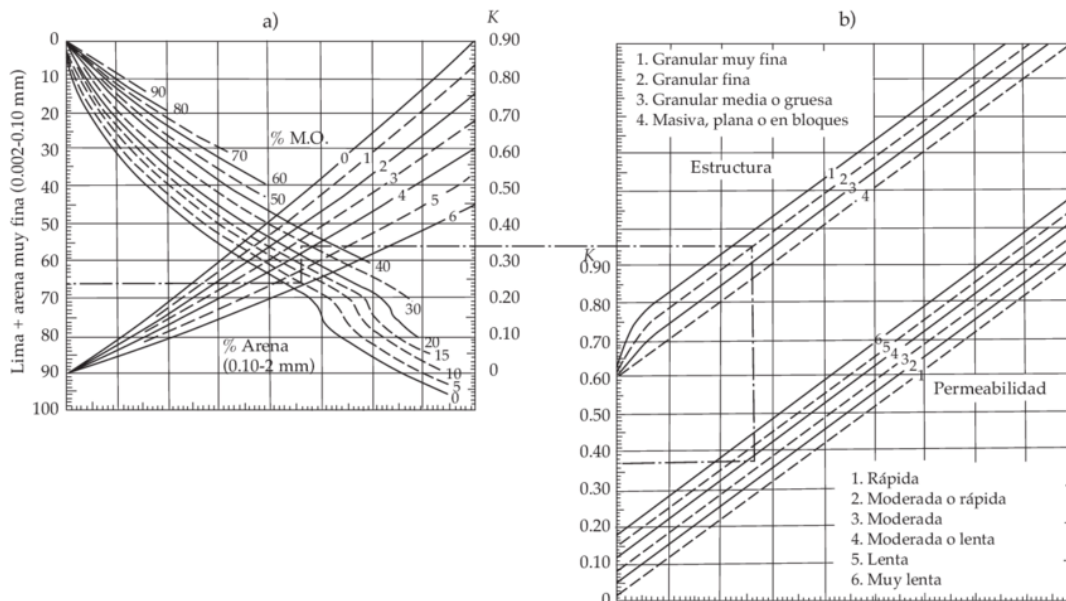


Figura 11. Nomograma para obtener el factor de erodabilidad K (Wischmeier & Smith, 1978).

Tabla 2. Factor K de acuerdo a la clasificación edafológica (Loredo et al., 2007).

Símbolo	Nombre	Gruesa	Media	Fina	Símbolo	Nombre	Gruesa	Media	Fina
A	Acrisol	0.026	0.04	0.013	N	Nitosol	0.013	0.02	0.007
B	Cambisol	0.026	0.04	0.013	O	Histosol	0.013	0.02	0.007
C	Chernozem	0.013	0.02	0.007	P	Podzol	0.053	0.079	0.026
D	Podzoluvisol	0.053	0.079	0.026	Q	Arenosol	0.013	0.02	0.007
E	Rendzina	0.013	0.02	0.007	R	Regosol	0.026	0.04	0.013
F	Ferrasol	0.013	0.02	0.007	S	Solonetz	0.053	0.079	0.026
G	Gleysol	0.026	0.04	0.013	T	Andosol	0.026	0.04	0.013
H	Feozem	0.013	0.02	0.007	U	Ranker	0.013	0.02	0.007
I	Litosol	0.013	0.02	0.007	V	Vertisol	0.053	0.079	0.026
J	Fluvisol	0.026	0.04	0.013	W	Planosol	0.053	0.079	0.026
K	Castañozem	0.026	0.04	0.013	X	Xerosol	0.053	0.079	0.026
L	Luvisol	0.026	0.04	0.013	Y	Yermosol	0.053	0.079	0.026
M	Greysem	0.026	0.04	0.013	Z	Solonchak	0.053	0.04	0.013

Factor S

El grado de pendiente (Factor S) depende de la pendiente media de la cuenca y se determina utilizando la Ecuación 5 (Loredo et al., 2007):

$$S = 0.065 + 0.45s + 0.0065s^2 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde s es la pendiente media de la cuenca expresada en porcentaje.

Factor L (grado de longitud de la pendiente)

El grado de longitud de la pendiente (Factor L), puede estimarse a partir de la Ecuación 6 (Loredo et al., 2007):

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde m se obtiene de acuerdo con el valor correspondiente al grado de pendiente de la cuenca indicado en la **Tabla 3** y λ es igual a la longitud de la pendiente.

Tabla 3. Valor del parámetro m de acuerdo al grado de pendiente (Loredo et al., 2007).

Grado de pendiente (%)	m
< 1	0.2
1-3	0.3
3-5	0.4
>5	0.5

Factor C

El factor de manejo de la vegetación (Factor C), se obtiene con los valores propuestos en la **Tabla 4**, en donde se asigna un valor de acuerdo a la clasificación de uso de suelo y vegetación (Montes-León et al., 2011).

Tabla 4. Factor C de acuerdo a la clasificación de uso de suelo (Montes-León et al., 2011).

Vegetación y/o uso de suelo	C	Vegetación y/o uso de suelo	C
Agricultura de humedad	0.25	Matorral sarco-crasicaule	0.25
Agricultura de humedad	0.25	Matorral sarco-crasicaule de neblina	0.25
Agricultura de riego	0.55	Matorral submontano	0.35
Agricultura de temporal	0.75	Matorral subtropical	0.12
Asentamientos humanos	0.005	Mezquital	0.65
Bosque cultivado	0.01	Palmar natural	0.75
Bosque de ayarín	0.01	Pastizal cultivado	0.2
Bosque de cedro	0.01	Pastizal gipsófilo	0.25
Bosque de encino	0.1	Pastizal halófilo	0.25
Bosque de encino-pino	0.01	Pastizal inducido	0.75
Bosque de galería	0.1	Pastizal natural	0.07
Bosque de mesófilo de montaña	0.01	Popal	0.85
Bosque de mezquite	0.01	Pradera de montaña	0.05
Bosque de oyamel	0.01	Sabana	0.54
Bosque de pino	0.01	Sabanoide	0.54
Bosque de pino-encino	0.01	Selva	0.45
Bosque de táscate	0.01	Selva alta perennifolia	0.45
Bosque inducido	0.01	Selva alta subperennifolia	0.45
Chaparral	0.65	Selva baja caducifolia	0.5
Cuerpo de agua	1	Selva baja espinosa caducifolia	0.5
Desprovisto de vegetación	1	Selva baja espinosa subperennifolia	0.5
Manglar	0.1	Selva mediana perennifolia	0.45
Matorral	0.3	Selva mediana caducifolia	0.45
Matorral crasicaule	0.65	Selva mediana subcaducifolia	0.45
Matorral de coníferas	0.2	Sin vegetación aparente	1
Matorral desértico micrófilo	0.25	Tular	0.1
Matorral desértico rosetófilo	0.25	Vegetación de desiertos arenosos	0.85
Matorral espinoso tamaulipeco	0.45	Vegetación de dunas costeras	0.85
Matorral rosetófilo costero	0.25	Vegetación de galería	0.85
Matorral sarcocaule	0.25	Vegetación halófila	0.85

Factor P

El factor correspondiente a las prácticas mecánicas en el manejo de la vegetación agrícola (Factor P), se asigna con el fin de mitigar la erosión en las parcelas (**Tabla 5**).

Tabla 5. Valor de P de acuerdo al tipo de prácticas mecánicas (Loredo et al., 2007).

Práctica mecánica	P
Surcado al contorno	0.75
Surcos rectos	0.8
Franjas al contorno	0.6
Terrazas (2-7% de pendiente)	0.5
Terrazas (7-13% de pendiente)	0.6
Terrazas (mayor de 13%)	0.8
Terrazas de banco	0.1
Surcado lister	0.5
Ripper	0.6
Terrazas de zing	0.1

Los resultados obtenidos con el método USLE indican la erosión total en la cuenca, por lo tanto, para conocer la cantidad de sedimento que será transportada hasta la salida de la cuenca, se debe de considerar el material redepositado en la misma, mediante el concepto del coeficiente de entrega de sedimentos (Gracia, 1997a).

$$CES = 100 * \frac{AS}{A} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde AS es el aporte de sedimentos [$m^3/km^2 * \text{año}$], A es la pérdida de suelo ($ton/ha/año$) y CES es el coeficiente de entrega de sedimentos.

Alternativamente, el CES puede calcularse a partir de los criterios de Maner (Ecuación 8), ASCE (Figura 12) y Roehl, (Tabla 6 y Ecuación 9 (McCuen, 1989):

$$\log CES = 1.9354 - 0.1419 \log Ac \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde CES es el coeficiente de entrega de sedimentos y Ac el área de la cuenca [km^2].

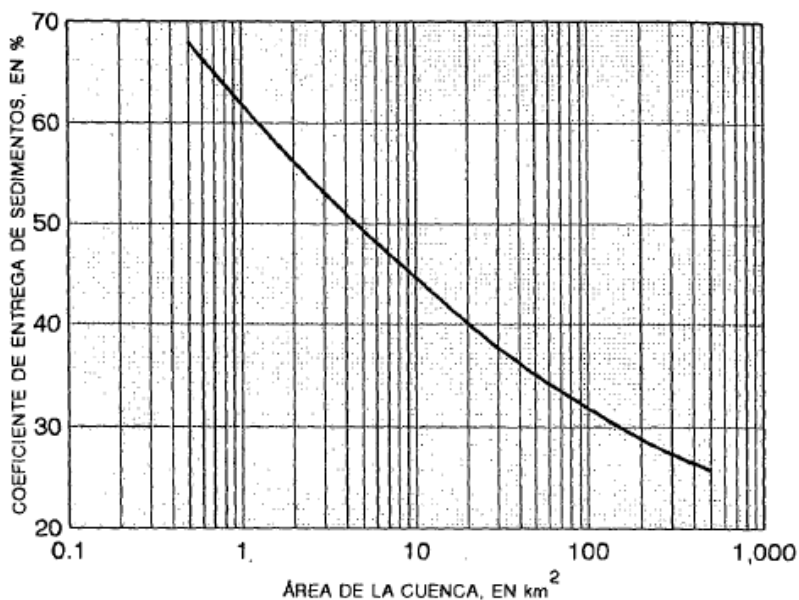


Figura 12. Gráfica para el cálculo del CES utilizando el criterio ASCE (Gracia, 1997a).

Tabla 6. Valores para el cálculo del coeficiente CES (Gracia, 1997a).

A_1 (km²)	CES_1 (%)
0.026	65.0
0.259	44.0
2.589	29.0
25.889	18.0
258.888	9.5
1553.329	5.0

$$CES = CES_1 \left(\frac{Ac_1}{Ac} \right)^{0.2} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde CES es el coeficiente que se desea calcular, A_c es el área de la cuenca [km^2], CES_1 y A_{c1} son los coeficientes obtenidos a partir de la **Tabla 6**.

De esta forma, el aporte de sedimento se puede estimar como (Ecuación 10):

$$AS = CES * A \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde AS el aporte de sedimentos [$ton/(km^2 * año)$], A es la pérdida de suelo [$ton/ha/año$] y CES el coeficiente de entrega de sedimentos.

Aunque el uso de la USLE es predominante en la estimación de la erosión hídrica de las cuencas de captación, su uso no ha sido generalizado en el estudio del fenómeno, debido principalmente a que los factores que la componen son difíciles de obtener con precisión fuera de un laboratorio (Ramírez-León & Aparicio, 2009), y es común que se recurra a otros modelos capaces de estimar la cantidad de sedimento que llega a un embalse. Algunos de ellos, se describe a continuación.

Método de Namba

Namba propone estimar el aporte de sedimentos en las cuencas por medio de la ecuación siguiente:

$$AS = 0.292P + 0.474H - 0.118F + 2.452 \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde AS es el aporte de sedimentos [$m^3/km^2 * año$], P la precipitación media anual [mm], H el desnivel máximo de cotas en la cuenca [m] y F la relación entre las áreas de suelo desnudo y las que cuentan con cobertura vegetal.

Método de Owen y Branson

Owen y Branson propusieron la Ecuación 12 para el estudio del aporte de sedimentos en cuencas de Colorado en Estados Unidos de América. El método requiere que se cumpla la relación indicada en la Ecuación 13.

$$AS = 19,495 \left(\frac{H}{L} \right) + 14.29Ps - 604.8 \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\frac{H}{L} > \frac{60480 - 1,429Ps}{1,946,500} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde AS es el aporte de sedimentos [$m^3/km^2 * año$], H el desnivel máximo de cotas en la cuenca [m], L la longitud total del cauce principal [m] y Ps el porcentaje de suelo desnudo en la cuenca.

Método del USBR

El *United States Bureau of Reclamation* (USBR) propuso la Ecuación 14 para estimar el aporte de sedimentos, se basa en mediciones realizadas en cuencas del Suroeste de los Estados Unidos de América.

$$AS = 1421.8(Ac)^{-0.229}$$

Ecuación 14

Donde AS es el aporte de sedimentos [$m^3/km^2 * año$] y Ac el área de la cuenca [km^2].

Método de Gracia

A partir de mediciones en embalses pertenecientes a la Comisión Federal de Electricidad (CFE), Gracia (2015) determinó una relación entre el volumen anual de sedimentos y el área de cuenca, obteniendo la Ecuación 15 (Bribiesca, 2017):

$$V_i = 0.0005A_c^{0.964}$$

Ecuación 15

Donde V_i es el volumen anual de sedimento [m^3] y A_c el área de la cuenca en estudio [m].

1.5.3 Volumen de sedimento medio anual

Después de calcular la erosión hídrica o el aporte de sedimentos, según sea el caso, se puede determinar el volumen de sedimento medio anual que llega a las presas. Para ello, se utilizan distintas ecuaciones: la Ecuación 16 para el método USLE y la Ecuación 17 para los métodos NAMBA, USBR, Owen y Branson. Debido a que el método de Gracia estima el volumen en metros cúbicos, este se debe convertir a hectómetros cúbicos.

$$VSMA = \frac{CES * A * Ac}{1 * 10^3 * W}$$

Ecuación 16

$$VSMA = \frac{AS * Ac}{1 * 10^6}$$

Ecuación 17

Donde VSMA es el volumen de sedimento atrapado medio anual [hm^3], V_i volumen anual de sedimentos, A es la pérdida de suelo [$ton/ha/año$], CES es el coeficiente de entrega de sedimentos, W es la densidad del sedimento [kg/m^3], AS el aporte de sedimentos [$m^3/(km^2 * año)$] y Ac el área de la cuenca [km^2].

1.5.4 Eficiencia de atrapamiento

La eficiencia de atrapamiento se define como el porcentaje de la carga de sedimentos que queda atrapada en el embalse durante un periodo de tiempo; esta variable depende de factores como el periodo de retención, características del sedimento y la operación del embalse (García, 2008).

Para estimar la eficiencia de atrapamiento en un embalse, los métodos empíricos emplean curvas que relacionan dicho factor con las condiciones operativas del embalse. Uno de ellos es la propuesta de (Strand & Pemberton, 1987), quienes sugieren utilizar las curvas propuestas por Brune y Gunnar (1953) para grandes embalses y las de Churchill (1948) para pequeños embalses (**Figura 13**).

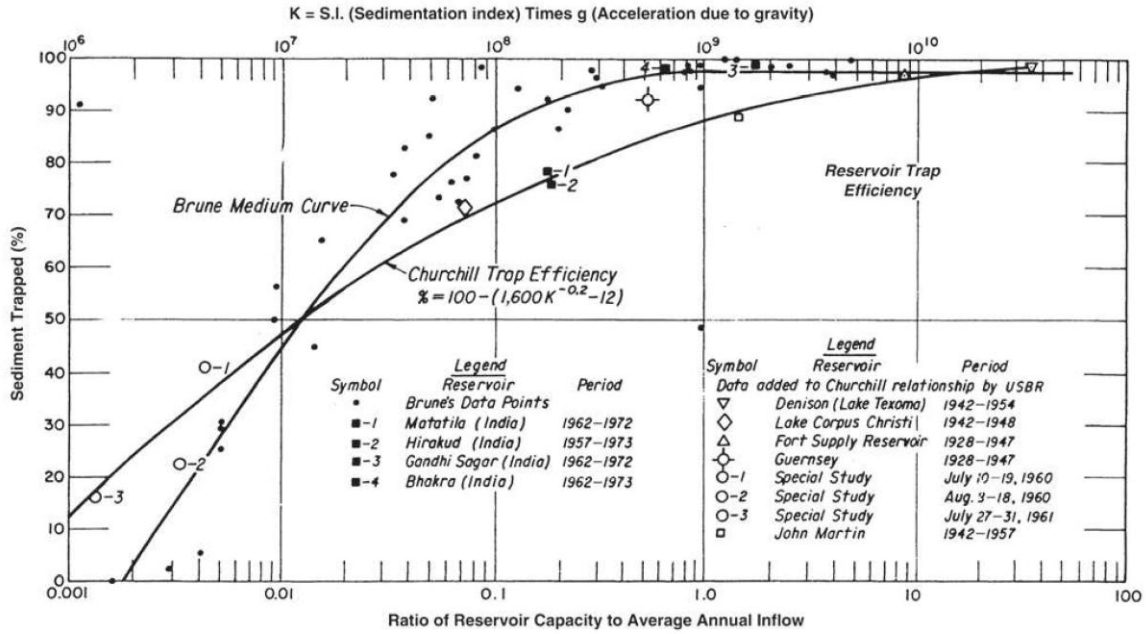


Figura 13. Curvas de eficiencia de atrapamiento (Strand & Pemberton, 1987).

Una alternativa para calcular la tasa de atrapamiento es la Ecuación 18 planteada por Brown (1946).

$$R_s = 100 \left(1 - \frac{1}{1 + 2,100 \left(\frac{KV_{NAMO}}{Ac} \right)} \right) \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde R_s es el coeficiente de atrapamiento de sedimentos, $K=1$, V_{NAMO} es la capacidad de almacenamiento al NAMO [hm^3] y Ac el área de aportación [km^2].

De forma que el volumen promedio sedimentado anualmente dentro del embalse se calcula utilizando la Ecuación 19.

$$\text{Volumen sedimentado} = VSMA * \% \text{ de eficiencia de atrapamiento} \quad \text{Ecuación 19}$$

1.5.5 Compactación del sedimento

La compactación del suelo es el proceso físico que ocurre cuando este se encuentra sujeto a una fuerza durante un periodo de tiempo. En el caso del sedimento en el fondo de un embalse la fuerza la ejerce su peso propio y el del agua; ello da lugar a un cambio del peso específico del mismo, pues aumenta por la consolidación de las partículas generada por dicha fuerza. El peso específico de los sedimentos se determina principalmente por 3 parámetros: el tamaño de partícula, el espesor del depósito y su exposición al aire. Algunos criterios se describen a continuación:

Lane y Koelzer (1943) proponen una fórmula empírica (Ecuación 20) que relaciona la densidad del sedimento respecto al tiempo de compactación, en función del tamaño de la partícula y la operación del embalse (**Tabla 7**).

$$W_t = W_1 + B \log(t)$$

Ecuación 20

Donde W es la densidad específica de un depósito después de una duración t , W_1 es el peso inicial, B el coeficiente de compactación indicado en la **Tabla 7** y t el tiempo en años.

Tabla 7. Valores del coeficiente B para el cálculo de la consolidación (Lane & Koelzer, 1943).

Operación del embalse	Coeficiente B					
	Arenas		Limos		Arcillas	
	(kg/m ³)	(lb/ft ³)	(kg/m ³)	(lb/ft ³)	(kg/m ³)	(lb/ft ³)
1	0	0	91	5.7	256	16
2	0	0	29	1.8	135	8.4
3	0	0	0	0	0	0

Miller (1953) propuso la Ecuación 21 para calcular la densidad promedio del sedimento durante un promedio de tiempo determinado, considerando que la compactación en un depósito de sedimentos cambia cada año.

$$W_{tc} = W_1 + 0.4343B \left[\left(\frac{t}{t-1} \right) (\ln t) - 1 \right]$$

Ecuación 21

Donde W_{tc} es la densidad específica promedio después de una duración t de consolidación, W_1 es el peso específico inicial, B el coeficiente indicado en la **Tabla 7** y t el tiempo en años.

Lara y Pemberton (1963) propusieron la Ecuación 22, para estimar la densidad de los sedimentos de acuerdo a la operación del embalse (**Tabla 8**) y la granulometría del sedimento.

$$W = W_c p_c + W_m p_m + W_s p_s$$

Ecuación 22

Donde W es la densidad del sedimento [kg/m^3], W_c la densidad de las arcillas [kg/m^3], p_c el porcentaje de arcillas, W_m la densidad de los limos [kg/m^3], p_m el porcentaje de limos, W_s la densidad de las arenas [kg/m^3] y p_s el porcentaje de arenas. Los coeficientes W_c , W_m y W_s , se obtienen empleando la **Tabla 9**.

Tabla 8. Tipo de operación del embalse (Strand & Pemberton, 1987)

Operación	Operación del embalse
1	Sedimento sumergido constantemente o parcialmente sumergido
2	Reducción moderada a considerable
3	Embalse normalmente vacío
4	Sedimento del cauce de un río

Tabla 9. Densidad del sedimento en función de la operación de mismos (Strand & Pemberton, 1987)

Operación del embalse	Densidad inicial					
	W_C		W_M		W_S	
	(kg/m ³)	(lb/ft ³)	(kg/m ³)	(lb/ft ³)	(kg/m ³)	(lb/ft ³)
1	416	26	1,120	70	1,550	97
2	561	35	1,140	71	1,550	97
3	641	40	1,150	72	1,550	97
4	961	60	1,170	73	1,550	97

1.6 Manejo de sedimentos

La construcción de presas altera el transporte de sedimentos reteniendo un porcentaje de estos dentro del embalse, por tanto, el manejo de sedimentos busca manipular el sistema río-embalse de tal forma que se altere en menor medida la capacidad útil, así como minimizar los impactos ambientales y costos socioeconómicos (García, 2008).

Con el fin de reducir la acumulación de sedimentos en los embalses, se han propuesto dos enfoques diferentes para abordar el problema: métodos preventivos y métodos correctivos. Los métodos preventivos requieren de una menor inversión económica, sin embargo, tienen la desventaja de solamente retrasar la acumulación de sedimentos, debido a que esta no se detiene por completo (Barragán, 2000).

1.6.1 Métodos preventivos

Estos métodos buscan controlar la cantidad de sedimentos que llegan al embalse; sin embargo, están sujetos a las características y ubicación del cauce principal y de la presa. Este enfoque se divide en dos categorías:

- Reducción de la entrada de sedimentos al embalse: de acuerdo a los recursos disponibles y un análisis económico, se pueden utilizar pequeñas presas que retienen el flujo de sedimentos, desvío de cargas de sedimento y trampas de sedimentos colocadas aguas arriba.
- Incrementar la capacidad de almacenamiento: considerando las características del embalse, se realiza un análisis para determinar una de las siguientes opciones: elevar la altura de la cortina o crear un canal de almacenamiento.

1.6.2 Métodos correctivos

Estos métodos se aplican cuando los sedimentos se han acumulado en el embalse; por lo tanto, es necesario removerlos o evitar que su volumen aumente. Los procedimientos más utilizados son:

- *Sluicing*: consiste en no almacenar agua durante los meses de mayor arrastre de sedimentos.
- *Flushing*: consiste en operar el desagüe o la obra de toma, permitiendo arrastrar los sedimentos cercanos a ellas.

- Dragado hidráulico: remueve los sedimentos depositados mediante la energía potencial generada entre el nivel aguas arriba y aguas abajo de la presa.
- Dragado mecánico: consiste en la extracción de sedimentos mediante maquinaria y/o equipos mecánicos.
- Remoción hidráulica: aprovecha la capacidad erosiva del agua para extraer la carga de sedimentos con el desfogue de agua.

Cualquiera de las medidas adoptadas requiere de la estimación de parámetros de evaluación. Por tales motivos, alrededor del mundo se han buscado indicadores que permitan conocer el grado de erosión en las cuencas de aportación de los embalses, y la relación que esta tiene con la pérdida de capacidad de almacenamiento, en búsqueda de identificar aquellos que son propensos al azolvamiento y que podrían afectar la calidad y cantidad de agua almacenada. Uno de ellos es RESCON (Palmieri et al., 2003), que consiste en elegir una técnica de manejo de sedimentos factible, y que maximice los beneficios económicos netos. Este modelo hace uso del software Excel y considera las técnicas de remoción de sedimentos: *flushing*, hidrosucción, dragado tradicional, *trucking* y no remover sedimentos (Flores, 2016).

1.7 Regresión estadística

La regresión estadística es un proceso mediante el cual se estima una relación entre una variable dependiente y una o más variables explicativas o independientes (Ecuación 23). El análisis permite predecir valores basándose en un modelo matemático (ArcGIS Insights, s/f). Estos modelos se pueden clasificar como lineales, no lineales y simples o múltiples (Calinski et al., 1990).

$$\mu_y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde μ_y es la variable dependiente, β_0 el intercepto, $\beta_1, \beta_2, \beta_k$ los coeficientes de ajustes X_1, X_2, X_k las variables independientes.

La estimación de los parámetros de ajuste se puede realizar por distintos métodos, uno de ellos es el método de mínimos cuadrados (Calinski et al., 1990).

1.8 Impactos

La acumulación de sedimentos en los embalses conduce a la disminución gradual en la capacidad de almacenamiento de agua, documentándose casos extremos en donde las presas han resultado inhabilitadas por el azolvamiento de los embalses. De no atenderse a tiempo, esta problemática resulta en la inviabilidad económica de la extracción de sedimentos, mejor conocido como desazolve (Gracia, 1997b), y puede conducir a afectaciones químicas, debido a que los limos y arcillas absorben productos químicos como fósforos, plaguicidas y metales (Ongley, 1997). Se estima que la acumulación de sedimentos ha limitado la capacidad de almacenamiento de aproximadamente 50,000 presas de todo el mundo, representado pérdidas entre el 13% y 19% de su capacidad inicial (**Figura 14**). Se estima que estas pérdidas alcanzarán valores de entre el 23% y 28% en el año 2050 (6,500 *millones de m³*), equivalente al uso de agua de India, China, Indonesia, Francia y Canadá juntos (Perera et al., 2022).

Los sedimentos provocan una disminución de la calidad del agua contenida en los embalses, debido a que pueden absorber contaminantes.

Además de los efectos generados dentro del embalse, los sedimentos pueden modificar las características de los ríos aguas arriba de la presa, provocando un aumento del nivel de río y una reducción de la altura libre de navegación debajo de puentes u ocasionando un incremento de niveles de agua subterránea causantes de salinización y aumento de la evaporación (García, 2008). Aguas abajo de las mismas, también pueden generar cambios morfológicos en el cauce.

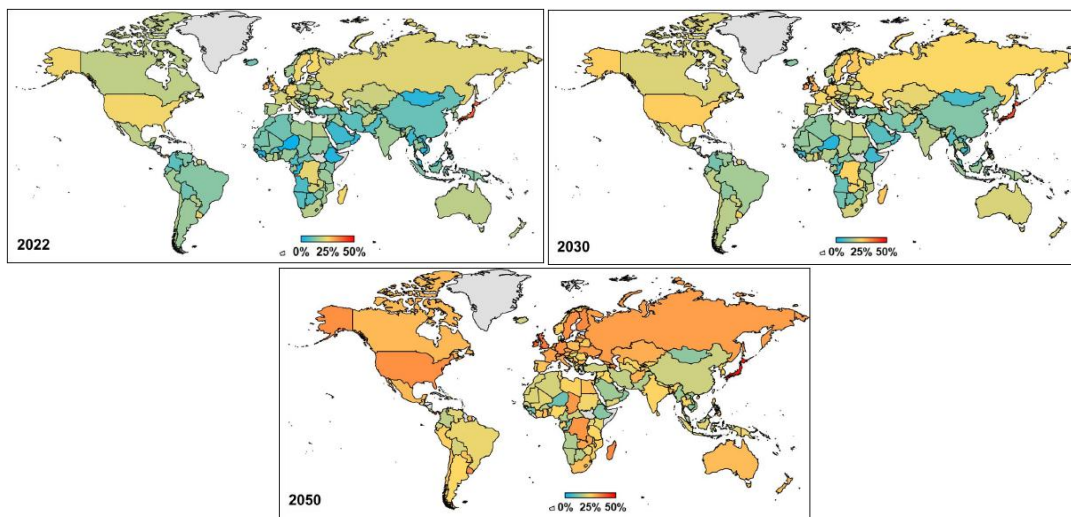


Figura 14. Mapa de la pérdida de capacidad de almacenamiento estimada para cada país (Perera et al., 2022)

2 Zona de estudio

En este capítulo se identifican las presas que conforman la zona de estudio, así como la ubicación, topografía, clima, uso de suelo, edafología e información empleada en la estimación del aporte de sedimentos de las mismas.

La zona de estudio comprende 52 presas y las cuencas de aportación correspondientes, las cuales fueron seleccionadas en función de la disponibilidad de información sobre sedimento atrapado, documentada en estudios especializados (Acosta, 2021; Campos-Aranda, 2012); Moreno, (2014). y en el portal digital del Sistema de Seguridad de Presas (CONAGUA & SEMARNAT, 2012)

2.1 Ubicación geográfica

Las presas se ubican en las regiones Norte y Centro de México (**Figura 15**), abarcando 13 entidades federativas (**Tabla 10**). Para identificar las presas, se asignó una numeración natural de acuerdo con el nombre oficial ordenado alfabéticamente (**Tabla 11**) y se clasificaron en 7 zonas distintas para realizar una mejor descripción de las mismas (**Figura 15** y **Tabla 12**). En el ANEXO A se presenta la ubicación más detallada de las presas y sus cuencas de aportación.

Tabla 10. Distribución estatal de presas de estudio.

Estado	Número de presas
Aguascalientes	8
Baja California	2
Chihuahua	6
Coahuila	2
Durango	3
Hidalgo	1
Jalisco	2
Michoacán de Ocampo	2
Nuevo León	5
San Luis Potosí	5
Sinaloa	3
Tamaulipas	5
Zacatecas	8

Tabla 11. Ubicación geográfica de las presas de estudio. Obtenida de Campos-Aranda (2012) (1), Acosta (2021) (2), CONAGUA & SEMARNAT (2012) (3), CONAGUA & IMTA (s/f) (4) y Moreno (2014)(5)

#	Nombre común	Nombre oficial	Estado	Fuente	Latitud	Longitud
1	Mata de Pinos	Agostitlan	Michoacán	3	19.58	-100.61
2	Agualeguas	Agualeguas	Nuevo León	1	26.293	-99.55
3	Alto de Norias	Alto de Norias	Coahuila	1	26.002	-101.23
4	Álvaro Obregón	Álvaro Obregón	San Luis Potosí	1	23.098	-101.03
5	Mexquitic	Álvaro Obregón	San Luis Potosí	1	22.267	-101.12
6	Chihuahua	Chihuahua	Chihuahua	2	28.572	-106.17
7	Las Marinas	Dolores	Zacatecas	1	23.416	-103.96
8	El Carrizo	El Carrizo	Baja California	3	32.479	-116.70
9	El Cazadero	El Cazadero	Zacatecas	1 y 5	23.693	-103.10
10	El Cedazo	El Cedazo	Aguascalientes	1	21.867	-102.26
11	El Cuernamal	El Cuernamal	Michoacán	3	18.694	-101.61
12	Talamantes	El Durazno	Chihuahua	1	26.895	-105.49
13	El Niagara	El Niagara	Aguascalientes	1	21.78	-102.37
14	El Saucillo	El Saucillo	Aguascalientes	1	22.248	-102.34
15	San Gabriel	Federalismo Mexicano	Durango	2	26.437	-105.56
16	Las Vírgenes	Francisco I. Madero	Chihuahua	3 y 4	28.166	-105.63
17	Las Tórtolas	Francisco Zarco	Durango	3	25.271	-103.77
18	El Peaje	Gonzalo N. Santos	San Luis Potosí	1	22.093	-101.10
19	El Rosario	Gral. Abelardo Rodríguez	Aguascalientes	1	21.917	-102.43
20	Chihuahua	Ing. Adolfo Orive De Alba	Zacatecas	1	21.492	-103.12
21	Tayahua	Ing. Julián Adame Alatorre	Zacatecas	1	22.12	-102.86
22	El Granero	Ing. Luis L. León	Chihuahua	2, 3 y 4	28.985	-105.28
23	Ojo Caliente	Ing. Valentín Gama	San Luis Potosí	1	21.88	-100.82
24	Piedritas	Integración Latinoamericana	Coahuila	1	28.693	-103.06
25	El Oyul	José Bernardo Gutiérrez de Lara	Tamaulipas	1	22.534	-99.07
26	Cerro Prieto	José López Portillo	Nuevo León	3y 4	24.936	-99.40
27	Lago Toronto	La Boquilla	Chihuahua	2	27.545	-105.41
28	La Codorniz	La Codorniz	Aguascalientes	1	21.997	-102.68
29	La Lajilla	La Lajilla	Tamaulipas	1	23.664	-98.73
30	La Loba	La Loba	Tamaulipas	1	24.357	-98.62
31	Santos Bañuelos	Laguna Bañuelos	Zacatecas	1	22.654	-102.51
32	Loma Larga	Loma Larga	Nuevo León	1	26.258	-99.54
33	Huites	Luis Donald Colosio	Sinaloa	3 y 4	26.845	-108.37
34	El Chamal	María Soto la Marina	Tamaulipas	1	24.401	-99.00
35	Sombrerete	Mariano Escobedo	Nuevo León	1	26.323	-99.95
36	El Azúcar	Marte R. Gómez	Tamaulipas	1 y 4	26.198	-98.93
37	El Mahone	Miguel Hidalgo y Costilla	Sinaloa	3 y 4	26.51	-108.58
38	Ordeña Vieja	Ordeña Vieja	Aguascalientes	1	21.947	-102.72
39	Palomas	Palomas	Zacatecas	1	22.348	-102.80
40	Peña Blanca	Peña Blanca	Aguascalientes	1	21.903	-102.75
41	Peña del Águila	Peña del Águila	Durango	3 y 4	24.203	-104.66
42	Pico del Águila	Pico del Águila	Chihuahua	3y 4	26.546	-105.25
43	El Taray	Pilotos	Aguascalientes	1	22.036	-101.97
44	Víboras	Presa Grande	Zacatecas	1	22.444	-103.16
45	Requena	Requena	Hidalgo	3 y 4	19.963	-99.31
46	La Boca	Rodrigo Gómez	Nuevo León	1	25.428	-100.13
47	Abelardo L. Rodríguez	Rodríguez	Baja California	3	32.445	-116.91
48	San José	San José	San Luis Potosí	1	22.15	-101.06
49	Sanalona	Sanalona	Sinaloa	3 y 4	24.814	-107.15
50	Susticacán	Susticacán	Zacatecas	1	22.611	-103.15
51	Boquilla de Zaragoza	Tenasco	Jalisco	1	22.172	-103.20
52	Achimec II	Vaqueros	Jalisco	1	22.327	-103.23

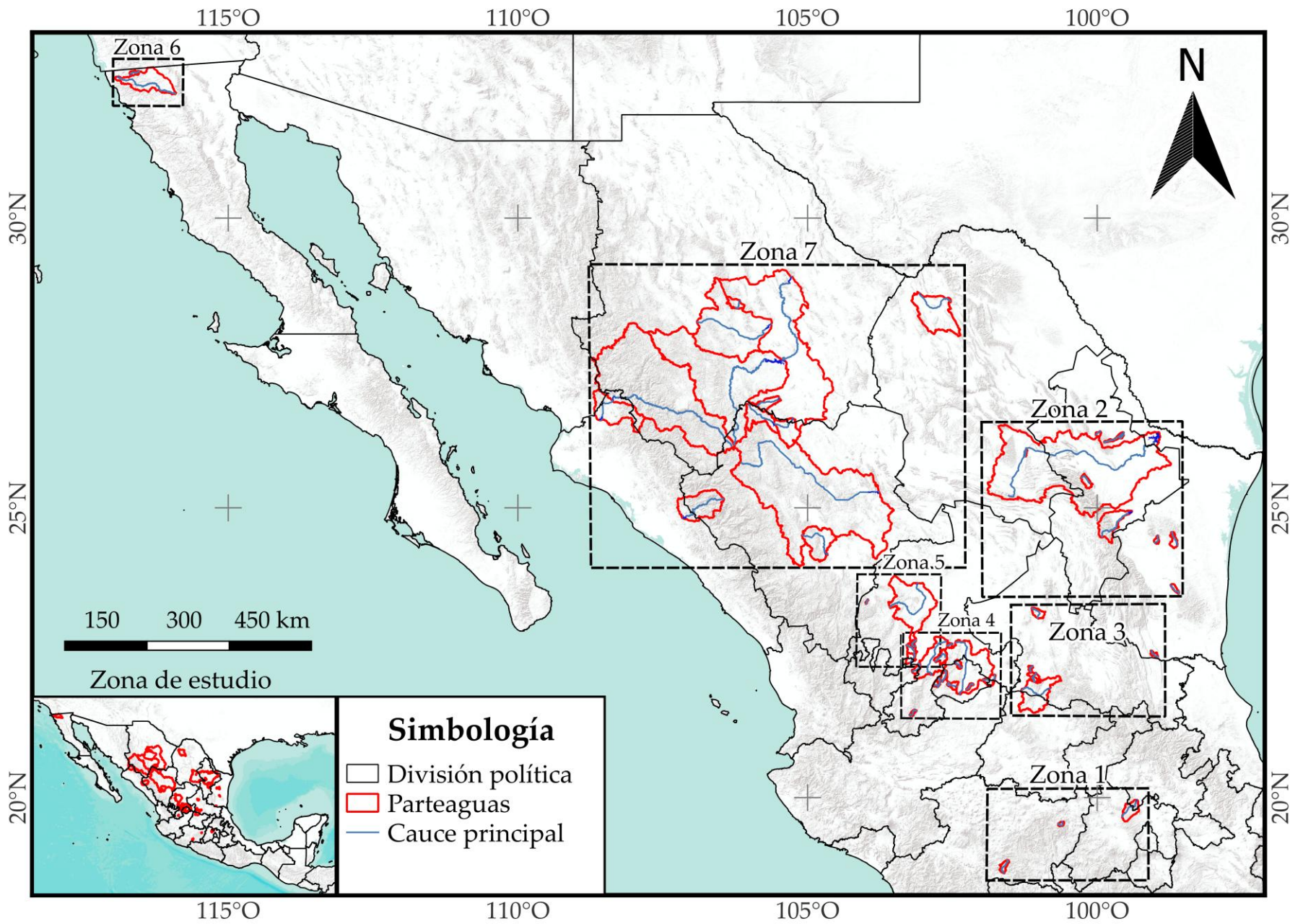


Figura 15. Ubicación general de las presas de estudio.

Tabla 12. Presas en cada zona de estudio.

Zona	Número	Presas pertenecientes	Zona	Número	Presas pertenecientes
1	1	Agostitlan	4	31	Laguna Bañuelos
	11	El Cueramal		38	Ordeña Vieja
	45	Requena		39	Palomas
2	2	Agualeguas		40	Peña Blanca
	3	Alto de Norias		43	Pilotos
	26	José López Portillo	51	Ternasco	
	29	La Lajilla	5	7	Dolores
	30	La Loba		9	El Cazadero
	32	Loma Larga		44	Presa Grande
	34	María Soto La Marina		50	Susticacan
	35	Mariano Escobedo	52	Vaqueros	
	36	Marte R. Gómez	6	8	El Carrizo
46	Rodrigo Gómez	47		Rodríguez	
3	4	Álvaro Obregón	7	6	Chihuahua
	5	Álvaro Obregón (Mexquitic)		12	El Durazno
	18	Gonzalo N. Santos		15	Federalismo Mexicano
	23	Ing. Valentín Gama		16	Francisco I. Madero
	25	José Bernardo Gutiérrez de Lara		17	Francisco Zarco
	48	San José		22	Ing. Luis L. León
4	10	El Cedazo		24	Integración Latinoamericana
	13	El Niagara		27	La Boquilla
	14	El Saucillo		33	Luis Donaldo Colosio
	19	General Abelardo Rodríguez		37	Miguel Hidalgo y Costilla
	20	Ing. Adolfo Orive de Alba		41	Peña del Águila
	21	Ing. Julián Adame Alatorre		42	Pico del Águila
	28	La Codomiz		49	Sanalona

2.2 Topografía

La elevación en la zona de estudio se obtuvo con la información topográfica del Continuo de Elevaciones Mexicano, CEM (INEGI, 2013), en formato ráster con una resolución espacial de 15 metros. En la **Figura 16** y en la **Tabla 13** se muestran los rangos de elevaciones de las cuencas de cada zona de estudio.

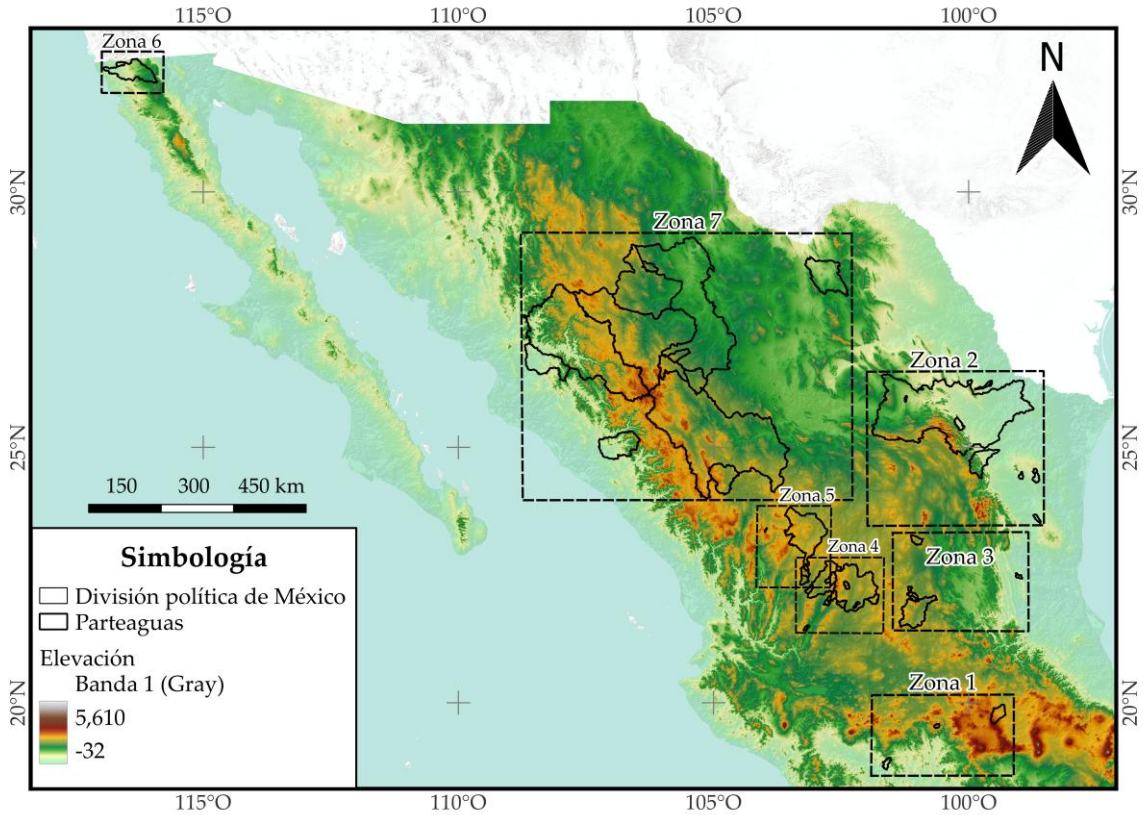


Figura 16. Topografía de la zona de estudio

Tabla 13. Rango de elevaciones de la zona de estudio.

Zona	Elevación mínima (msnm)	Elevación máxima (msnm)
1	220	3,586
2	69	3,688
3	195	2,861
4	1,363	3,030
5	1,809	2,955
6	96	1,850
7	93	3,277

2.3 Clima

La clasificación climática de Köppen (Köppen, 1936) utiliza ecuaciones empíricas y datos climáticos para generar 5 grandes grupos de clima y sus respectivas subdivisiones. Cada grupo es asignado de acuerdo a la temperatura, precipitación media mensual y precipitación media anual (E. García, 1998). En México, los cambios de clima además de ser asignados respecto a los parámetros mencionados, pueden cambiar de acuerdo a grandes variaciones de altitud. E. García (1998) propuso una modificación a la clasificación de Köppen adaptándose

mejor a las condiciones del país. Así, los climas identificados en la zona de estudio según la clasificación de Köppen modificada por García se muestran en la **Figura 17**, se sintetizan en la **Tabla 14** y se describen a continuación:

- Grupo A (Clima cálido): tropical lluvioso con temperatura media del mes más frío mayor a 18°C.
 - Clima cálido (AX): temperatura media anual entre 22 y 26°C y del mes más frío mayor a 18°C.
 - Semicálido (AC): temperatura media anual entre 18 y 22°C y del mes más frío mayor a 18°C.
- Grupo B (Clima seco): temperaturas diversas y la evaporación excede la precipitación.
 - Seco cálido (BS): temperatura media anual mayor a 22°C y coeficiente PT (precipitación media anual/temperatura media anual) menor a 22.9.
 - Semiseco (BS1): temperatura media anual mayor a 22°C y coeficiente PT mayor a 22.9.
 - Muy seco (BW): régimen de lluvias de verano.
- Grupo C (Clima templado): clima templado húmedo con temperatura media del mes más frío entre -3 y 18°C y del mes más caliente mayor a 6.5°C
 - Templado (Ca y Cb): temperatura media anual entre 12 y 18°C y en el mes más frío entre -3 y 18°C.
 - Semifrío (Cb' y Cc): temperatura media anual entre 5 y 12°C y en el mes más frío entre -3 y 18°C.
- Grupo E (Clima frío): temperatura media anual entre -2 y 5°C y en el mes más caliente entre 0 y 6.5°C
 - Frío (ETC y ET): temperatura media anual entre -2 y 5°C y del mes más frío mayor a 0°C.

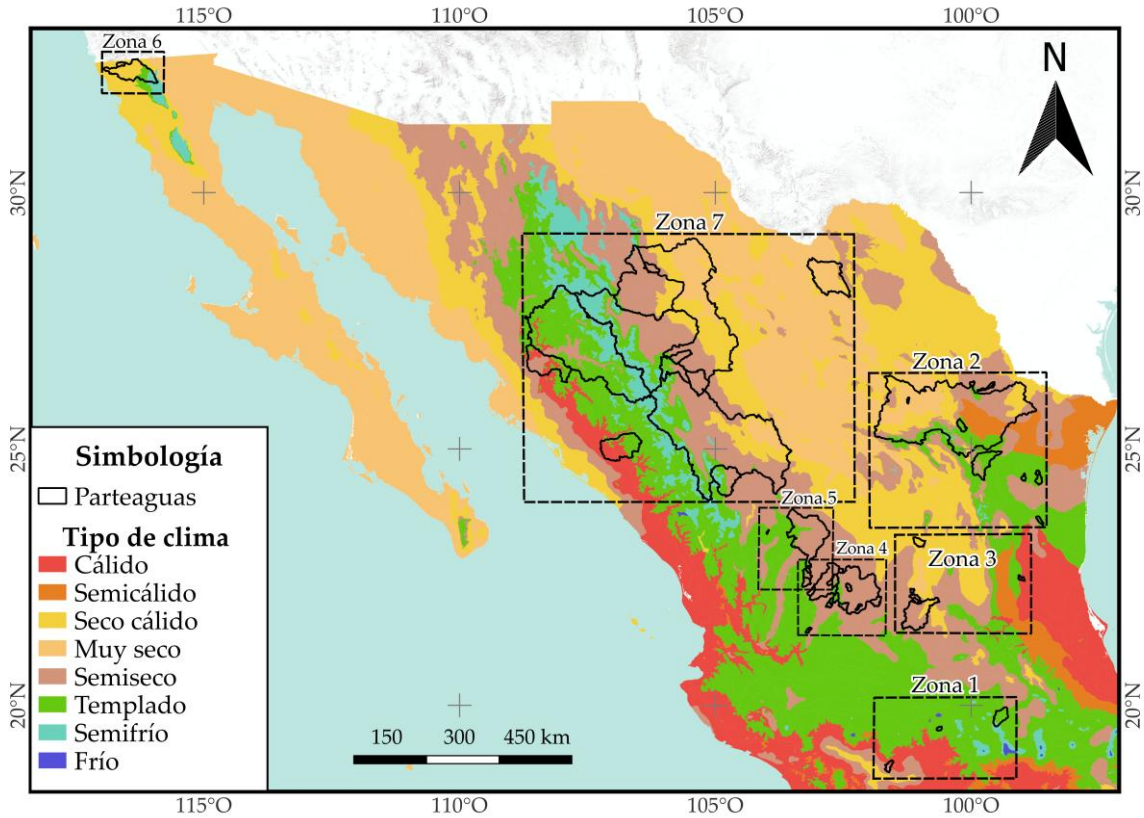


Figura 17. Clima de la zona de estudio, según la clasificación de Köppen.

Tabla 14. Clasificación climática en las zonas de estudio

Zona	Climas
1	Cálido, semicálido, seco, semiseco, templado, semifrío y frío.
2	Cálido, semicálido, muy seco, seco, semiseco, templado y semifrío.
3	Cálido, semicálido, muy seco, seco, semiseco y templado.
4	Seco, semiseco y templado.
5	Cálido, seco, semiseco y templado.
6	Muy seco, seco, templado y semifrío.
7	Muy seco semicálido, seco semicálido, semiseco templado, semiseco templado y semifrío subhúmedo.

2.4 Uso de suelo y vegetación

El uso de suelo y vegetación, al igual que los climas, es muy variado en la zona de estudio. En general, se distinguen zonas agrícolas, bosques y selvas, vegetación secundaria correspondiente, matorrales y pastizales, el cual se obtuvo a partir de la carta de uso de suelo y vegetación serie VII del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI (INEGI 2018); en ella se representa la ubicación y extensión de los distintos tipos de vegetación, agricultura y erosión presentes en el territorio mexicano; así como información útil acerca de

actividades agrícolas en las cuencas en estudio. De acuerdo a la información analizada (INEGI, 2023), se identificaron los siguientes usos de suelo (**Figura 18**):

Área Agrícola

Área destinada a labores agrícolas. Su clasificación se puede dividir de acuerdo a la forma en que los cultivos reciben agua durante el periodo de cosecha: humedad, riego, riego eventual, temporal y riego suspendido. Se clasifican de acuerdo al sistema agropecuario, el cual se define como las áreas cuya cubierta vegetal se ha modificado con el objetivo de facilitar su manejo y explotación:

- **Agrícola:** destinada a la realización de actividades agrícolas productoras de alimentos y materias primas.
- **Acuícola:** destinada a la cría y engorda de especies que se desarrollan en agua salada o dulce

Bosque

Vegetación arbórea ubicada en zonas templadas, semifrías y climas húmedos a subhúmedos. Se clasifican de acuerdo a factores de: dominancia, fisonomía y/o factores ecológicos.

Matorral

Vegetación arbustiva menor a 1 metro de altura con composición florística y densidad variable. Ubicada principalmente en regiones áridas y semiáridas. Se clasifican de acuerdo a factores climáticos y fisonómicos.

Pastizal

Comunidades vegetales caracterizadas por la presencia de gramíneas o graminoides. Considera los pastizales generados naturalmente e inducidos por actividades humanas. Se clasifica de acuerdo a factores de clima, suelo e inducidos.

Selva

Vegetación arbórea ubicada en climas cálidos húmedos a cálidos semisecos; predominan las especies de origen tropical. Se clasifica de acuerdo a la altura de vegetación y la permanencia del follaje a lo largo del año.

Vegetación secundaria

Estado que señala la eliminación o perturbación de la vegetación original, de forma que ha sufrido una modificación profunda.

Otro tipo de vegetación

Clasificación de grupos de vegetación con características ecológicas especiales como fisonomía y origen (suelos, fuego, agua). De acuerdo a las características mencionadas se clasifican en:

- **Chaparral:** vegetación arbustiva, densa y asociada al fuego.
- **Manglar:** vegetación formada por varias especies leñosas, densas y arbustivas denominadas mangle. Se ubica en esteros, lagunas costeras y estuarios.

- **Mezquital:** vegetación arbórea formada por leguminosas con ramas espinosas denominadas mezquites. Se ubica en zonas semiáridas con suelos planos y profundos.
- **Palmar:** vegetación formada por palmas. Se ubica en zonas tropicales.
- **Popal:** vegetación herbácea que crece en las zonas someras de los cuerpos de agua. Se ubica en zonas costeras.
- **Sabana:** Se conforma principalmente por gramíneas y ciperáceas, con árboles dispersos. Ubicada en suelos con drenaje deficiente e incendios periódicos, en zonas áridas.
- **Tular:** vegetación acuática formada por plantas de 1 a 3 metros de altura. Se ubica en zonas tropicales y zonas templadas.

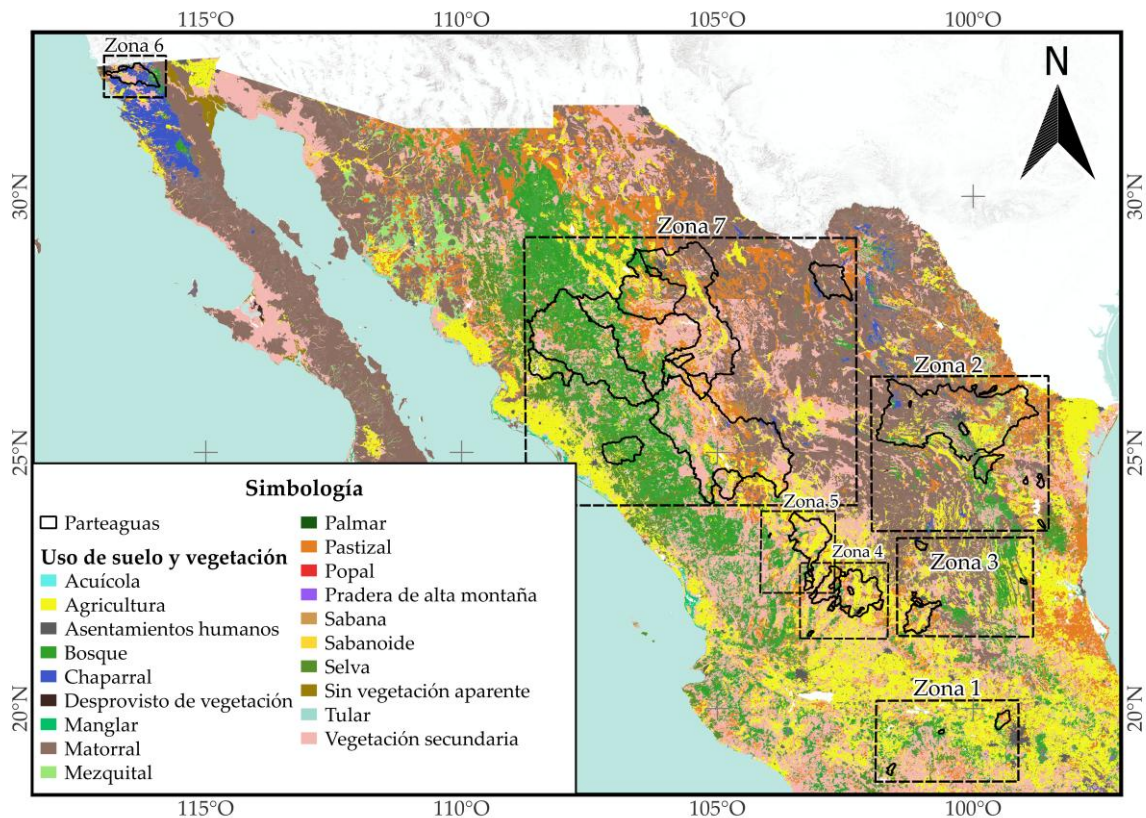


Figura 18. Uso de suelo y vegetación en la zona de estudio.

2.5 Edafología

La edafología proporciona información sobre la extensión territorial de los diferentes tipos de suelo, así como sus atributos físicos, químicos y sus limitantes. La clasificación edafológica de la zona de estudio se realizó a partir del conjunto nacional de información edafológica Serie III, escala de 1:250,000 (INEGI, 2024). De acuerdo a la información utilizada, se identificaron 31 tipos de suelos diferentes (**Figura 19**), de los cuáles se identificaron 10 tipos principales (**Tabla 15**).

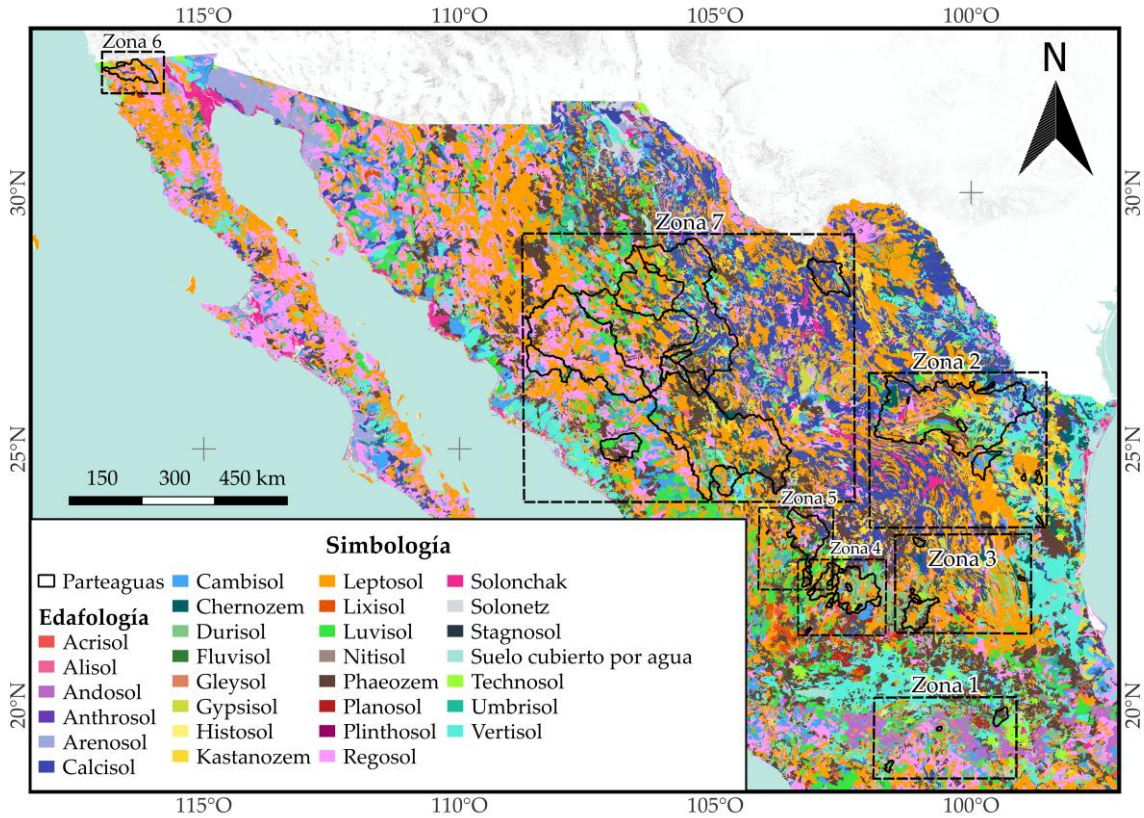


Figura 19. Edafología en la zona de estudio.

Tabla 15. Principales tipos de suelo en la zona de estudio.

Zona	Principales tipos de suelo
1	Andosol, lluvisol, phaeozem.
2	Calcisol, cambisol, leptosol, vertisol.
3	Durisol, leptosol, phaeozem.
4	Cambisol, durisol, kastanozem, leptosol, lluvisol, phaeozem.
5	Calcisol, leptosol, lluvisol, phaeozem, regosol.
6	Cambisol, leptosol, phaeozem, regosol, technosol.
7	Calcisol, cambisol, kastanozem, leptosol, luvisol, phaeozem, regosol.

2.6 Precipitación

La precipitación media anual en la zona de estudio (CONABIO, 2001) se muestra en la Figura 20, y en la Tabla 16 los rangos de precipitación de cada zona de estudio.

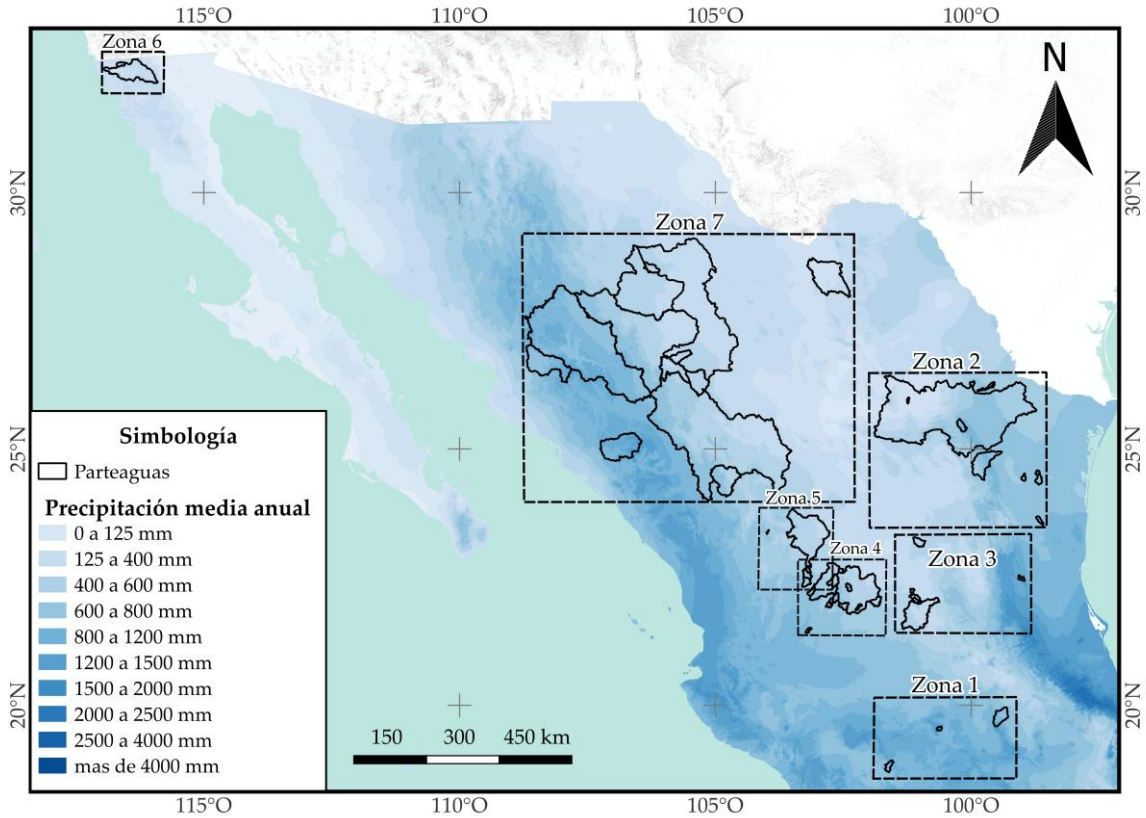


Figura 20. Precipitación media anual en la zona de estudio.

Tabla 16. Precipitación media anual.

Zona	Precipitación media anual (mm)
1	400 a 1,500
2	125 a 1,200
3	125 a 1,500
4	400 a 800
5	125 a 800
6	125 a 600
7	400 a 2,000

2.7 Estaciones hidrométricas

Con el objetivo de conocer el flujo de sedimentos, se consultaron las estaciones hidrométricas pertenecientes al Banco Nacional de Aguas Superficiales, BANDAS (CONAGUA e IMTA, s/f). Las estaciones hidrométricas con datos durante 1 año o más y que se encuentren ubicadas aguas arriba de los embalses en estudio se muestran en la **Tabla 17** y **Figura 21**.

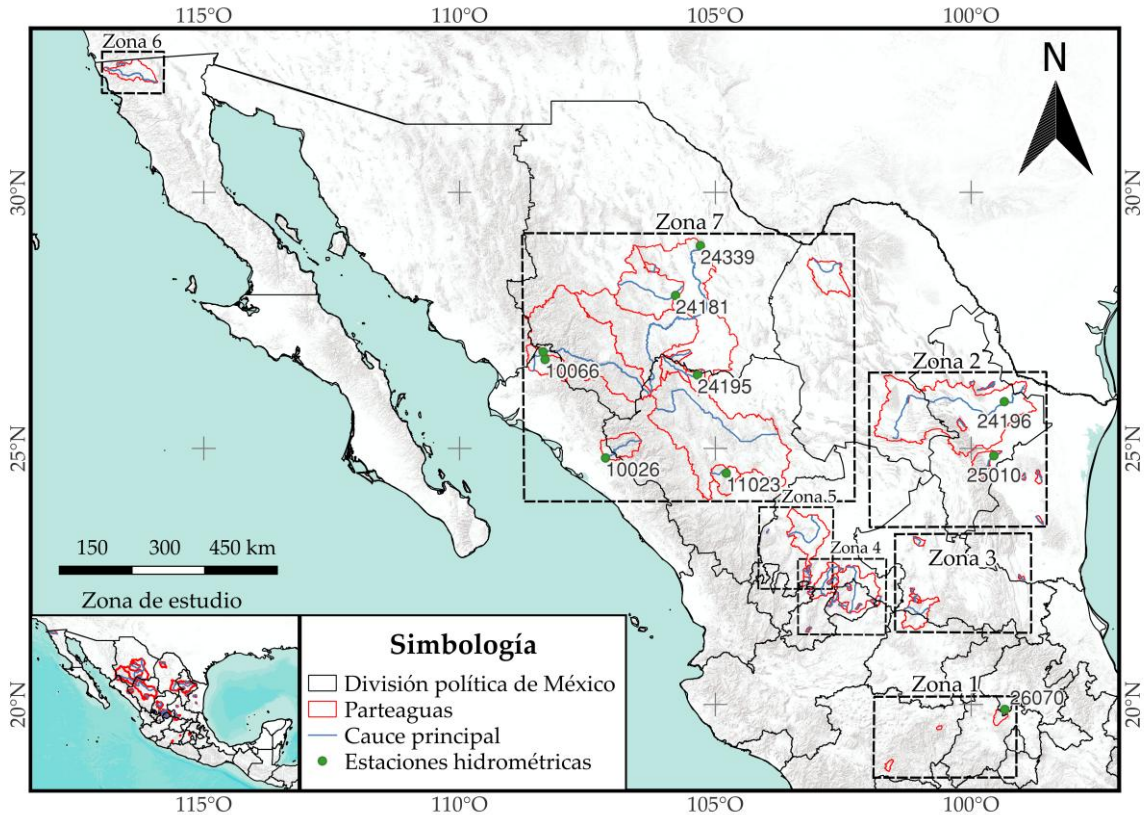


Figura 21. Ubicación de estaciones hidrométricas en la zona de estudio.

Tabla 17. Estaciones hidrométricas en la zona de estudio.

Clave	Nombre la estación	Longitud	Latitud	Presa
26070	Tepeji	-99.339	19.900	Requena
24196	Los Herreras	-99.351	25.913	Marte R. Gómez
25010	Pablillo	-99.556	24.857	José López Portillo
11023	Caboraca	-104.788	24.517	Peña del Águila
10026	Picachos	-107.147	24.813	Sanalona
24195	San Antonio	-105.350	26.433	Pico Del Águila
24181	Villalba	-105.778	27.986	Francisco I. Madero
10066	Choix	-108.329	26.736	Miguel Hidalgo y Costilla
10037	Huites	-108.367	26.883	Luis Donaldo Colosio
24339	El granero	-105.293	28.958	Ing. Luis L. León

2.8 Información disponible

En la literatura existe muy pocas mediciones sobre la sedimentación de embalses, sin embargo, algunos estudios (Acosta, 2021; Campos-Aranda, 2012), han analizado y determinado el volumen de sedimento medio anual de algunos embalses de México. En la

Tabla 18 y **Tabla 19** se resume el volumen medio anual medido para distintos embalses en el país según dichos estudios.

Tabla 18. Volumen de sedimentos medio anual medido (Acosta, 2021).

Número	Nombre oficial	VSMA (hm ³)
6	Chihuahua	0.07
15	Federalismo Mexicano	2.5
16	Francisco I. Madero	2.59
27	La Boquilla	5.12
46	Rodrigo Gómez	0.05

Tabla 19. Volumen de sedimentos atrapado medio anual medido (Campos-Aranda, (2012).

Número	Nombre oficial	VSMA (hm ³)	Número	Nombre oficial	VSMA (hm ³)
2	Agualeguas	0.0368	28	La Codorniz	0.0317
3	Alto De Norias	0.0439	29	La Lajilla	0.0173
4	Álvaro Obregón	0.0301	30	La Loba	0.0647
5	Álvaro Obregón	0.0030	31	Laguna Bañuelos	0.0036
7	Dolores	0.0447	32	Loma Larga	0.0113
9	El Cazadero	0.2852	34	María Soto La Marina	0.0216
10	El Cedazo	0.0330	35	Mariano Escobedo	0.0351
12	El Durazno	0.0282	38	Ordeña Vieja	0.0086
13	El Niagara	0.0518	39	Palomas	0.1006
14	El Saucillo	0.0114	40	Peña Blanca	0.0193
18	Gonzalo N. Santos	0.0538	43	Pilotos	0.0117
19	Gral. Abelardo Rodríguez	0.1262	44	Presa Grande	0.0110
20	Ing. Adolfo Orive De Alba	0.0650	46	Rodrigo Gómez	0.0431
21	Ing. Julián Adame Alatorre	0.0372	48	San José	0.0400
23	Ing. Valentín Gama	0.0476	50	Susticacán	0.0056
24	Integración Latinoamericana	0.2592	51	Tenasco	0.0615
25	José Bernardo Gutiérrez de Lara	0.0391	52	Vaqueros	0.0259

CONAGUA y SEMARNAT (2012) también disponen de datos de sedimentación a partir de batimetrías, los cuales, más adelante se utilizan para contrastar los resultados obtenidos de la aplicación de métodos empíricos y de los registros de las estaciones hidrométricas. Dicha información consiste en curvas capacidad-elevación obtenidas en al menos dos años distintos, con las cuales se calcula el volumen de sedimentos medio anual a partir de la pérdida de almacenamiento. En el presente trabajo se utilizó la información disponible de 14 presas de la zona de estudio (**Tabla 20**). Los gráficos se encuentran disponibles en el ANEXO B.

3 Estimación de la sedimentación

En este apartado se describen tanto la metodología aplicada como los resultados obtenidos. Posteriormente se analizan, comparan e interpretan. Se realizaron estimaciones con los métodos descritos en el capítulo 1 y se compararon con las observaciones existentes en las 52 presas descritas en el capítulo 2. Los métodos se aplican indistintamente a todas las cuencas de estudio determinando la cantidad de sedimento que llega al embalse en función de la erosión en la cuenca correspondiente; enseguida se comparan y analizan.

3.1 Registros de sedimentación en los embalses

El portal digital del Sistema de Seguridad de Presas (CONAGUA & SEMARNAT, 2012) y el estudio de Moreno (2014) disponen de curvas elevaciones-capacidad calculadas a partir de estudios batimétricos en dos años distintos. A partir de tales curvas, (López-Basilio, (2024) determinó la pérdida de capacidad y el volumen de sedimento medio anual (**Tabla 20**). Las curvas correspondientes se encuentran disponibles en el ANEXO B.

Además, de los embalses de estudio seleccionados, se identificó aquellos que cuenta con una estación hidrométrica aguas arriba con registros de sedimentos; a partir de estas, se determinó el volumen de sedimento medio anual (**Tabla 21**). En algunos casos (por ejemplo, las presas 22, 45 y 49), los datos de CONAGUA indican que el volumen de sedimentos es igual a 0 hectómetros cúbicos, en contraste, los registros de las estaciones hidrométricas analizadas, indican un volumen de sedimentos mayor a cero.

Tabla 20. Pérdida de capacidad a partir de CONAGUA & SEMARNAT (2012).

Número	Nombre oficial	Pérdida de capacidad (hm ³)	VSMA (hm ³)
1	Agostitlán	0.1810	0.0027
8	El Carrizo	0.9900	0.0707
11	El Cueramal	2.6093	0.0900
16	Francisco I. Madero	20.5565	1.2848
17	Francisco Zarco	62.3572	1.5209
19	Gral. Abelardo Rodríguez	16.6200	0.0000
22	Ing. Luis L. León	0.0000	0.0000
26	José López Portillo	12.1964	0.2595
33	Luis Donaldo Colosio	37.2148	0.9542
37	Miguel Hidalgo y Costilla	0.0000	0.0000
41	Peña del Águila	3.5026	0.0574
42	Pico del Águila	0.0000	0.0000
45	Requena	0.1340	0.0033
49	Sanalona	0.0000	0.0000

Tabla 21. Volumen de sedimento medio anual estimado con las estaciones hidrométricas (CONAGUA & IMTA, s/f).

Clave	Nombre la estación	Longitud	Latitud	Número	Presa	VSMA (hm ³)
24181	Villalba	-105.778	27.986	16	Francisco I. Madero	1.2486
24339	El granero	-105.293	28.958	22	Ing. Luis L. León	1.5060
25010	Pablillo	-99.556	24.857	26	José López Portillo	0.0981
10037	Huites	-108.367	26.883	33	Luis Donald Colosio	8.9156
24196	Los Herreras	-99.351	25.913	36	Marte R. Gómez	1.9936
10066	Choix	-108.329	26.736	37	Miguel Hidalgo y Costilla	0.4368
11023	Caboraca	-104.788	24.517	41	Peña del Águila	0.0154
24195	San Antonio	-105.350	26.433	42	Pico del Águila	0.3515
26070	Tepeji	-99.339	19.900	45	Requena	0.1097
10026	Picachos	-107.147	24.813	49	Sanalona	1.9832

3.2 Caracterización de las cuencas de aportación

Los métodos para calcular la erosión hídrica, aportación o producción de sedimentos de una cuenca requieren de algunas de sus características fisiográficas. Para ello, con el uso del software QGIS (QGIS project, 2002) y SAGA GIS (Conrad et al., 2015), se obtuvieron los parámetros: área, pendiente de la cuenca, elevación máxima y mínima, red de drenaje, longitud y pendiente media del cauce principal de las cuencas de aportación de las presas de estudio.

Para la obtención de dichas características se definió el punto de salida de la cuenca en la sección transversal donde se ubica la cortina de la presa. Posteriormente se delimitó la cuenca de aportación y las características correspondientes utilizando el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) del INEGI; como resultado se obtuvo el parteaguas y el área de cada cuenca (**Figura 15**). También, se determinaron las elevaciones máximas y mínimas, así como la pendiente media. Esta última empleando el algoritmo que QGIS dispone para ello. Además, con SAGA GIS, se determinó la red de drenaje, el orden de la misma y se identificó el cauce principal; para este último se calculó la longitud y pendiente media. Los resultados del proceso descrito anteriormente se sintetizan en la **Tabla 22**.

Tabla 22. Características fisiográficas de las cuencas de estudio.

Número	Área (km ²)	Sm [%]	Elevación Mínima [msnm]	Elevación Máxima [msnm]	L [m]
1	70.30	18.40	2,359	2,920	18,906.88
2	112.93	1.73	175	1,043	47,291.06
3	34.28	7.35	900	1,154	14,715.33
4	304.75	8.78	1,890	2,786	31,857.98
5	59.00	23.19	1,979	2,630	17,717.24
6	385.99	24.67	1,220	2,845	21,102.02
7	12.62	33.64	2,229	2,762	10,279.02
8	112.60	18.20	273	1,103	22,592.63
9	5,390.65	10.90	1,910	2,911	157,820.05
10	61.41	5.77	1,899	2,070	21,059.57
11	220.41	39.19	220	1,784	40,918.83
12	604.65	16.61	1,679	2,778	49,619.60
13	6,323.05	9.89	1,820	3,030	133,815.26
14	120.40	13.86	1,978	2,481	24,615.40
15	1,539.02	25.85	1,728	2,999	76,492.20
16	10,728.05	15.82	1,187	2,784	186,365.03
17	35,983.65	22.59	1,178	3,204	405,516.68
18	81.03	29.61	2,023	2,841	20,394.77
19	190.70	17.28	1,940	2,704	27,852.84
20	68.30	38.34	1,363	2,602	26,323.42
21	2,563.07	16.13	1,720	3,007	105,798.49
22	58,920.51	15.20	1,030	3,277	630,619.84
23	2,754.25	14.88	1,770	2,866	78,019.82
24	3,879.68	12.48	819	2,622	89,288.54
25	82.88	8.16	195	826	23,417.30
26	1,675.35	36.01	269	3,160	108,046.85
27	20,759.53	21.58	1,294	2,891	366,326.25
28	172.18	27.60	1,818	2,757	30,039.55
29	111.68	3.38	156	448	26,494.42
30	238.94	12.93	212	863	30,156.92
31	71.45	6.77	2,269	2,613	12,858.41
32	28.19	3.92	167	261	11,220.10
33	26,260.48	42.56	179	3,136	358,363.66
34	85.96	12.46	259	1,450	18,509.73
35	64.98	36.88	308	1,401	11,940.93
36	32,480.73	17.09	69	3,688	485,313.97
37	29,581.45	41.04	93	3,136	414,677.64
38	75.27	27.41	1,799	2,803	18,262.30
39	351.25	24.05	2,020	2,956	38,553.13
40	91.47	20.61	1,710	2,610	18,501.50
41	2,404.78	19.10	1,883	2,961	98,054.43
42	3,046.62	19.60	1,600	2,998	128,595.99
43	273.44	11.44	2,023	2,520	35,980.93
44	230.62	23.57	1,909	2,906	33,998.51
45	756.51	21.32	2,113	3,586	54,976.49
46	267.95	34.46	443	2,344	26,891.60
47	2,493.00	16.72	96	1,850	152,951.13
48	265.50	32.18	1,904	2,860	30,810.81
49	3,303.33	41.14	117	2,977	140,980.16
50	92.13	30.28	2,077	2,940	22,990.87
51	149.85	17.13	1,779	2,383	29,691.71
52	463.64	19.03	1,809	2,955	52,039.44

3.3 Resultados

En algunos casos, la cuenca de aportación de una presa, incluye una o más presas aguas arriba del embalse (por ejemplo, la presa Ing. Luis L. León), por lo tanto, solo una parte de ese sedimento continuará hacia aguas abajo. Si lo anterior se considera, conduce a la sobrestimación del azolvamiento de la presa bajo análisis. Debido a esto, se realizaron correcciones en 18 presas en las que presentó esta situación. El procedimiento de corrección consistió en utilizar el método correspondiente sin considerar la cuenca perteneciente a la(s) presa(s) ubicada(s) aguas arriba. Es decir, se aplicó la metodología en la subcuenca entre la cortina aguas arriba y la de análisis. De las 18 presas, 8 presas tienen en total 16 presas aguas arriba que forman parte del estudio (**Tabla 23**) y 10 presas tienen en total 16 presas aguas arriba, pero no forman parte del estudio, es decir, no cuentan con mediciones del volumen de sedimento (**Tabla 24**).

Tabla 23. Presas de la zona de estudio con presas aguas arriba también en estudio.

Número	Nombre oficial	Presas aguas arriba
13	El Niagara	10, 14, 19
21	Ing. Julián Adame Alatorre	39
22	Ing. Luis L. León	6, 12, 15, 16, 27, 42
36	Marte R. Gómez	3, 46
37	Miguel Hidalgo y Costilla	33
42	Pico Del Águila	15
48	San José	18
52	Vaqueros	44

Tabla 24. Presas de la zona de estudio con presas aguas arriba que no se encuentran en estudio.

Número	Nombre oficial	Presas aguas arriba	ID
45	Requena	Taxhimay	1664
36	Marte R. Gómez	El Cuchillo	2689
23	Ing. Valentín Gama	Los Dolores	80
23		La Chirimoya	1273
41	Peña del Águila	Caboraca	981
43	Pilotos	Dolores	3758
43		Tanque el Rosario	5015
21	Ing. Julián Adame Alatorre	Malpaso	3797
21		Valentín Gómez Farías	3876
13	El Niagara	San Marcos	3852
13		San Pedro Piedra Gorda	3857
13		Plutarco Elías Calles	49
9	El Cazadero	Gob. Leobardo Reynoso	3790
9		Lic. Adolfo López Mateos	3791
44	Presa Grande	Ing. Antonio Campuzano Duarte	3773
17	Francisco Zarco	Lázaro Cárdenas	1084

A continuación, se describen los resultados obtenidos con cada método sin considerar las áreas pertenecientes a las cuencas aguas arriba.

3.3.1 Erosión hídrica, aporte y volumen de sedimentos

En este apartado se describen los resultados obtenidos con cada método empírico y se explica el proceso de transformación a volumen de sedimentos medio anual.

USLE

La ecuación del método USLE requiere de 5 factores para obtener la pérdida de suelo. La obtención de los factores se realizó de la forma siguiente:

- Factor R: primero se identificó la región a la que pertenece cada cuenca de aportación (**Figura 10**) según Loredó et al. (2007) y posteriormente se aplicó la ecuación correspondiente indicada en la **Tabla 1**, empleando la precipitación media anual (**Figura 20**).
- Factor K: se utilizó la clasificación edafológica serie I, escala 1:1,000,000 para determinar los tipos de suelo presentes en cada cuenca (**Figura 19**). Debido a que se presentan distintos tipos de suelo en cada cuenca, se realizó un promedio ponderado en función del área de cada tipo de suelo. Enseguida se seleccionó el valor correspondiente según la **Tabla 2**.
- Factor LS: este factor se determinó como el producto de los coeficientes L (Ecuación 6) y S (Ecuación 5), calculados mediante QGIS.
- Factor C: Se asignó el factor C (**Tabla 4**) a los distintos tipos de uso de suelo y vegetación (INEGI, 2018) presentes en cada cuenca (**Figura 18**) (INEGI, 2018) y se realizó un promedio ponderando con el área correspondiente.
- Factor P. Se asigna de acuerdo a las prácticas mecánicas (**Tabla 5**), cuando se desea analizar un escenario futuro; para las condiciones actuales, generalmente, se utiliza un factor igual a 1.

De esta forma, se obtuvo la pérdida de suelo (Ecuación 2 y **Tabla 25**).

La cantidad de sedimento o aporte de sedimento de la cuenca que llega a la salida de la cuenca (embalse) es menor a la erosión hídrica, entre otras cosas debido a que se puede depositar sobre la cuenca; en este trabajo el aporte de sedimento (**Tabla 25**) se estimó con el criterio de Roeh (Ecuación 9, Ecuación 10 y **Tabla 6**).

Tabla 25. Pérdida de suelo y aporte de sedimento utilizando el método USLE.

Número	Region	Pm (mm)	R	K	LS	C	P	A [ton/ha/año]	As [ton/km ² *año]
1	V	1,487.69	4,772.98	0.039	1.412	0.270	1	70.46	3,320.93
2	IV	754.36	3,882.12	0.057	1.278	0.362	1	101.57	4,475.63
3	IV	600.00	2,811.44	0.055	0.734	0.369	1	42.21	2,202.82
4	IV	600.00	2,811.44	0.060	0.623	0.485	1	51.05	1,953.98
5	IV	600.00	2,811.44	0.061	2.019	0.173	1	60.01	2,899.66
6	IV	595.66	2,783.40	0.045	2.245	0.221	1	62.32	2,306.68
7	III	800.00	1,839.33	0.040	3.179	0.010	1	2.38	143.42
8	II	456.88	2,929.32	0.024	1.482	0.612	1	64.25	2,832.36
9	IV	721.82	3,644.53	0.041	1.082	0.355	1	56.82	1,446.60
10	IV	760.66	3,928.80	0.079	0.251	0.507	1	39.45	1,895.39
11	V	1,386.22	4,473.87	0.028	4.242	0.430	1	225.41	9,033.96
12	IV	673.49	3,303.46	0.035	1.512	0.129	1	22.54	782.74
13	IV	733.36	3,728.07	0.070	0.881	0.484	1	110.98	2,762.43
14	IV	769.88	3,997.60	0.078	1.018	0.233	1	74.08	3,235.02
15	III	743.02	1,781.14	0.029	2.416	0.055	1	6.91	210.18
16	IV	611.99	2,889.51	0.036	1.546	0.221	1	35.48	819.35
17	III	695.37	1,723.90	0.028	2.391	0.377	1	43.63	848.60
18	IV	600.00	2,811.44	0.035	2.820	0.087	1	23.91	1,104.52
19	VII	798.58	4,274.60	0.050	1.436	0.294	1	89.80	3,673.58
20	VII	891.52	5,323.95	0.020	3.898	0.187	1	79.49	3,761.84
21	IV	790.31	4,151.82	0.042	1.360	0.432	1	101.56	2,873.59
22	IV	641.15	3,082.97	0.041	1.571	0.415	1	82.18	1,490.34
23	IV	603.04	2,831.13	0.024	1.435	0.322	1	31.76	889.56
24	IV	530.52	2,375.92	0.053	1.154	0.064	1	9.36	249.68
25	XIII	1,471.31	13,623.79	0.027	0.408	0.557	1	82.99	3,821.18
26	IV	988.67	5,778.92	0.021	5.304	0.210	1	134.88	4,053.69
27	IV	722.96	3,652.75	0.034	2.412	0.113	1	33.73	709.19
28	VII	800.00	4,289.74	0.030	2.578	0.214	1	71.72	2,976.89
29	IV	1,199.23	7,762.94	0.020	0.166	0.523	1	13.65	602.42
30	IV	976.74	5,674.45	0.025	0.953	0.370	1	50.75	2,010.84
31	IV	667.80	3,264.23	0.070	0.390	0.532	1	47.38	2,227.75
32	IV	735.36	3,742.64	0.079	0.183	0.428	1	23.18	1,244.01
33	VI	1,061.84	8,992.25	0.026	6.272	0.452	1	651.86	13,257.29
34	IV	1,123.27	7,016.67	0.026	1.098	0.353	1	70.46	3,227.53
35	IV	800.00	4,225.87	0.020	4.036	0.301	1	102.52	4,886.02
36	IV	712.10	3,574.87	0.040	2.616	0.340	1	125.98	2,486.03
37	VI	1,060.00	8,973.45	0.026	5.973	0.443	1	620.14	12,400.96
38	VII	800.00	4,289.74	0.032	2.637	0.276	1	99.76	4,656.36
39	IV	797.30	4,205.21	0.046	2.179	0.193	1	81.11	3,042.82
40	VII	800.00	4,289.74	0.029	1.856	0.346	1	80.05	3,634.47
41	III	679.02	1,702.48	0.028	2.300	0.333	1	36.61	1,045.14
42	III	705.52	1,736.76	0.027	1.945	0.076	1	6.99	192.94
43	IV	701.91	3,502.31	0.076	0.892	0.306	1	72.68	2,825.03
44	VII	800.00	4,289.74	0.039	2.229	0.425	1	157.23	6,261.12
45	V	1,209.95	3,945.08	0.039	1.959	0.478	1	144.62	4,865.33
46	IV	992.47	5,812.41	0.020	4.206	0.196	1	94.73	3,692.65
47	II	520.79	3,554.41	0.029	1.366	0.573	1	80.49	2,286.37
48	IV	600.00	2,811.44	0.035	3.176	0.065	1	20.20	788.29
49	X	963.93	7,055.80	0.029	6.501	0.260	1	351.44	9,592.16
50	VII	792.37	4,208.57	0.038	2.999	0.281	1	133.01	6,032.96
51	VII	806.78	4,362.51	0.040	1.379	0.606	1	145.36	6,153.56
52	VII	800.00	4,289.74	0.036	1.760	0.475	1	129.02	4,653.05

Namba

El aporte de sedimentos mediante la fórmula de Namba (Ecuación 11). Se muestra en la **Tabla 26**.

Tabla 26. Aporte de sedimentos calculado con el método Namba.

Número	Pm (mm)	H [m]	F [%]	As [m ³ /km ² *año]	Número	Pm (mm)	H [m]	F [%]	As [m ³ /km ² *año]
1	1,487.69	561	0.01	702.77	27	722.96	1,597	0.001	970.53
2	754.36	868	0.00	634.16	28	800.00	939	0.002	681.14
3	600.00	254	0.00	298.05	29	1,199.23	292	0.000	491.04
4	600.00	896	0.00	602.36	30	976.74	651	0.000	596.24
5	600.00	651	0.00	486.23	31	667.80	344	0.006	360.51
6	595.66	1,625	0.00	946.63	32	735.36	94	0.000	261.73
7	800.00	533	0.00	488.69	33	1,061.84	2,957	0.001	1,714.13
8	456.88	830	0.14	529.26	34	1,123.27	1,191	0.000	894.98
9	721.84	991	0.01	687.70	35	800.00	1,093	0.009	754.13
10	760.66	171	0.24	305.59	36	657.21	3,311	0.045	1,925.79
11	1,386.22	1,564	0.00	1,148.56	37	1,046.66	2,492	0.002	1,754.35
12	673.49	1,099	0.00	720.04	38	800.00	1,004	0.000	711.95
13	725.84	1,161	0.04	790.13	39	797.30	936	0.000	678.93
14	769.88	503	0.00	465.68	40	800.00	900	0.000	662.65
15	743.02	1,271	0.00	821.87	41	650.50	975	0.007	711.70
16	611.99	1,597	0.00	938.13	42	600.00	757	0.002	871.12
17	601.95	1,831	0.00	1,165.82	43	600.00	489	0.010	442.99
18	600.00	818	0.00	565.38	44	800.00	882	0.004	708.63
19	798.58	764	0.00	597.77	45	1,118.22	1,472	0.018	1,053.96
20	891.52	1,239	0.00	850.06	46	992.47	1,901	0.264	1,193.30
21	801.58	1,287	0.01	843.26	47	520.79	1,754	0.493	985.86
22	641.15	1,768	0.01	1,254.75	48	600.00	935	0.019	630.79
23	600.00	1,093	0.02	698.04	49	963.93	2,860	0.007	1,639.56
24	530.52	1,803	0.01	1,011.99	50	792.37	863	0.000	642.89
25	1,471.31	631	0.00	731.17	51	806.78	604	0.004	524.33
26	988.67	2,891	0.01	1,661.48	52	800.00	779	0.008	779.26

Owen y Branson

El aporte de sedimentos con el método de Owen y Branson (Ecuación 12) se presenta en la **Tabla 27**. En algunas cuencas, el aporte de sedimento calculado con el método de Owen y Branson es negativo, por lo tanto, sólo se presentan los resultados positivos.

Tabla 27. Aporte de sedimentos calculado con el método Owen y Branson.

Número	H [m]	L [m]	Ps [%]	As [m ³ /km ² *año]	Número	H [m]	L [m]	Ps [%]	As [m ³ /km ² *año]
1	561	18,906.88	0.000	-27.24	27	1,597	366,326.25	0.001	-519.93
2	868	47,291.06	0.000	-247.53	28	939	30,039.55	0.000	3.65
3	254	14,715.33	0.000	-268.82	29	292	26,494.42	0.000	-390.27
4	896	31,857.98	0.000	-57.35	30	651	30,156.92	0.000	-184.61
5	651	17,717.24	0.000	110.42	31	344	12,858.41	0.000	-84.05
6	1,625	21,102.02	0.000	894.14	32	94	11,220.10	0.000	-441.73
7	533	10,279.02	0.000	404.52	33	2,957	358,363.66	0.042	-443.58
8	830	22,592.63	0.093	111.63	34	1,191	18,509.73	0.000	647.67
9	1,001	157,820.05	0.000	-481.34	35	1,093	11,940.93	0.000	1,176.91
10	171	21,059.57	0.000	-446.75	36	3,619	485,313.97	0.128	-457.83
11	1,564	40,918.83	0.000	139.19	37	3,043	414,677.64	0.043	-461.34
12	1,099	49,619.60	0.000	-173.68	38	1,057	18,262.30	0.000	521.81
13	1,211	133,815.26	0.310	-424.22	39	936	38,553.13	0.000	-132.23
14	503	24,615.40	0.000	-207.05	40	916	18,501.50	0.000	358.90
15	1,271	76,492.20	0.000	-281.37	41	1,078	98,054.43	0.142	-388.77
16	1,597	186,365.03	0.111	-436.41	42	1,398	128,595.99	0.000	-393.19
17	2,026	405,516.68	0.043	-506.93	43	497	35,980.93	0.000	-335.93
18	818	20,394.77	0.000	175.91	44	997	33,998.51	0.000	-33.99
19	764	27,852.84	0.000	-70.88	45	1,473	54,976.49	0.000	-83.27
20	1,239	26,323.42	0.000	311.39	46	1,901	26,891.60	0.000	771.20
21	1,287	105,798.49	0.000	-368.02	47	1,754	152,951.13	0.094	-380.23
22	2,247	630,619.84	0.073	-534.40	48	956	30,810.81	0.000	-0.84
23	1,086	78,019.82	0.046	-333.20	49	2,860	140,980.16	0.596	-201.40
24	1,803	89,288.54	0.555	-203.82	50	863	22,990.87	0.000	125.85
25	631	23,417.30	0.000	-80.30	51	604	29,691.71	0.000	-208.84
26	2,891	108,046.85	0.000	-83.98	52	1,146	52,039.44	0.000	-176.15

USBR

El aporte de sedimentos empleando el método USBR (Ecuación 14) da lugar a los resultados que se encuentran en la **Tabla 28**.

Tabla 28. Aporte de sedimentos calculado con el método USBR.

Número	Ac [km ²]	As [m ³ /km ² *año]	Número	Ac [km ²]	As [m ³ /km ² *año]
1	70.30	536.89	27	20,759.53	145.95
2	112.93	481.66	28	172.18	437.32
3	34.28	632.87	29	111.68	482.90
4	304.75	383.72	30	238.94	405.71
5	59.00	558.86	31	71.45	534.90
6	385.99	363.51	32	28.19	661.89
7	12.62	795.66	33	26,260.48	138.30
8	112.60	481.99	34	85.96	512.73
9	3,812.94	215.14	35	64.98	546.65
10	61.41	553.77	36	23,801.69	141.45
11	220.41	413.28	37	3,314.70	222.16
12	604.65	328.00	38	75.27	528.56
13	4,439.55	207.78	39	351.25	371.44
14	120.40	474.65	40	91.47	505.48
15	1,539.02	264.83	41	1,780.29	256.14
16	10,728.05	169.77	42	1,508.77	266.03
17	16,830.50	153.13	43	203.61	420.85
18	81.03	519.70	44	70.29	536.92
19	190.70	427.21	45	397.34	361.10
20	68.30	540.46	46	267.95	395.20
21	1,539.41	264.81	47	2,493.00	237.13
22	23,414.85	141.98	48	184.40	430.51
23	1,679.05	259.60	49	3,303.33	222.33
24	3,879.68	214.29	50	92.13	504.65
25	82.88	517.03	51	149.85	451.45
26	1,675.35	259.73	52	232.63	408.20

Método de Gracia

Finalmente, el volumen anual de sedimento (VSA) según el método de Gracia (Ecuación 15), se indica en la **Tabla 29**.

Tabla 29. Aporte de sedimentos calculado con el método de Gracia.

Número	Ac [m ²]	Volumen [m ³]	Número	Ac [m ²]	Volumen [m ³]
1	70,303,000	18,342	27	20,759,531,000	4,413,343
2	112,933,000	28,966	28	172,177,788	43,496
3	34,279,000	9,178	29	111,677,000	28,655
4	304,754,367	75,422	30	238,938,123	59,654
5	59,004,882	15,492	31	71,452,377	18,631
6	385,985,762	94,716	32	28,185,000	7,600
7	12,616,070	3,502	33	26,260,483,000	5,535,767
8	112,596,000	28,883	34	85,955,000	22,264
9	3,813	861,598	35	64,980,741	17,002
10	61,409,283	16,100	36	23,802	5,035,237
11	220,405,000	55,187	37	3,315	752,797
12	604,646,000	145,995	38	75,269,810	19,590
13	4,440	997,711	39	351,247,158	86,485
14	120,404,000	30,811	40	91,469,000	23,639
15	1,539,017,211	359,313	41	1,780	413,470
16	10,728,053,000	2,335,566	42	1,509	352,502
17	16,830	3,605,184	43	204	51,127
18	81,033,535	21,034	44	70	18,338
19	190,698,870	47,998	45	397	97,400
20	68,296,771	17,837	46	267,948,000	66,621
21	1,539	359,402	47	2,493,001,000	572,019
22	23,415	4,956,323	48	184	46,469
23	1,679	390,779	49	3,303,332,000	750,309
24	3,879,681,000	876,132	50	92,130,833	23,804
25	82,876,814	21,495	51	149,848,000	38,045
26	1,675,347,000	389,948	52	233	58,136

3.3.2 Volumen de sedimento medio anual

Con los resultados obtenidos, se determinó el volumen de sedimento medio anual (VSMA); para ello, se utilizan distintas ecuaciones: la Ecuación 16 para el método USLE y la Ecuación 17 para los métodos NAMBA, USBR, Owen y Branson. El resumen de los resultados anteriores se presenta en la **Figura 232**. En general los métodos empíricos sobrestiman el sedimento. Se puede identificar que el volumen de sedimentos calculado con el método de Gracia suele ser el de mayor semejanza respecto a los datos medidos.

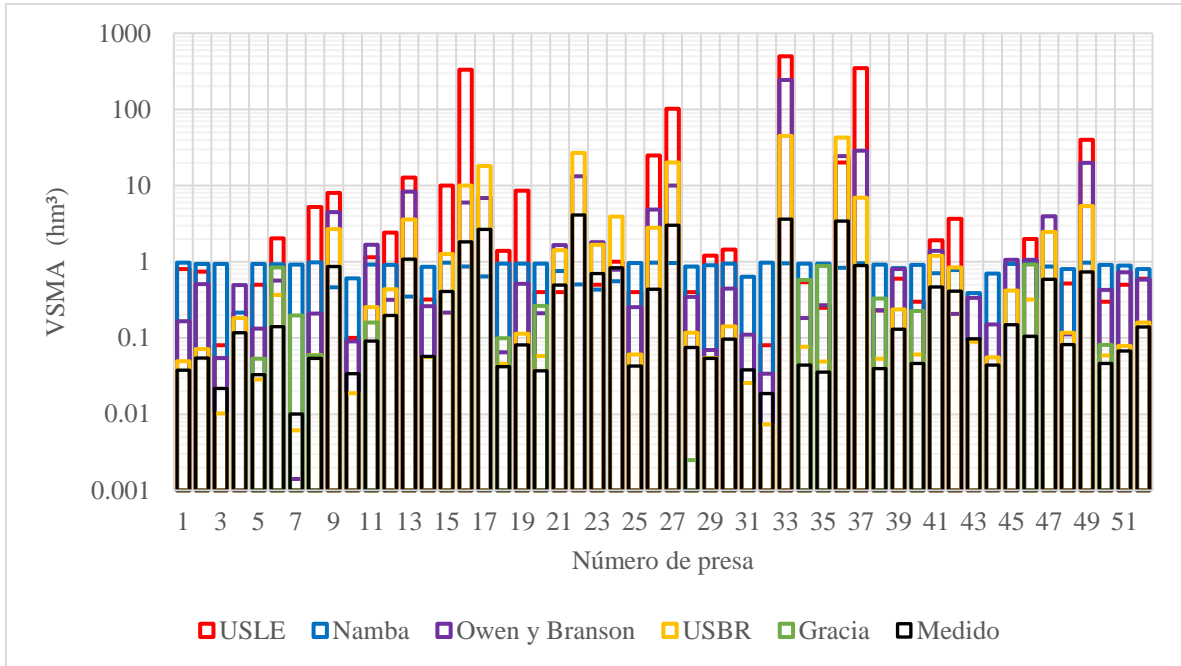


Figura 22. VSMA calculado (con métodos empíricos) y medido.

3.3.3 Volumen de sedimento atrapado

Del volumen de sedimento que llega al embalse (aporte de sedimento), una parte importante se queda en el mismo y otra parte continúa aguas abajo. El sedimento que se deposita en el embalse (sedimento atrapado) se determinó con Ecuación 19; coeficiente de atrapamiento se calculó con la Ecuación 18; de esta forma, el sedimento atrapado se muestra en la **Figura 23**.

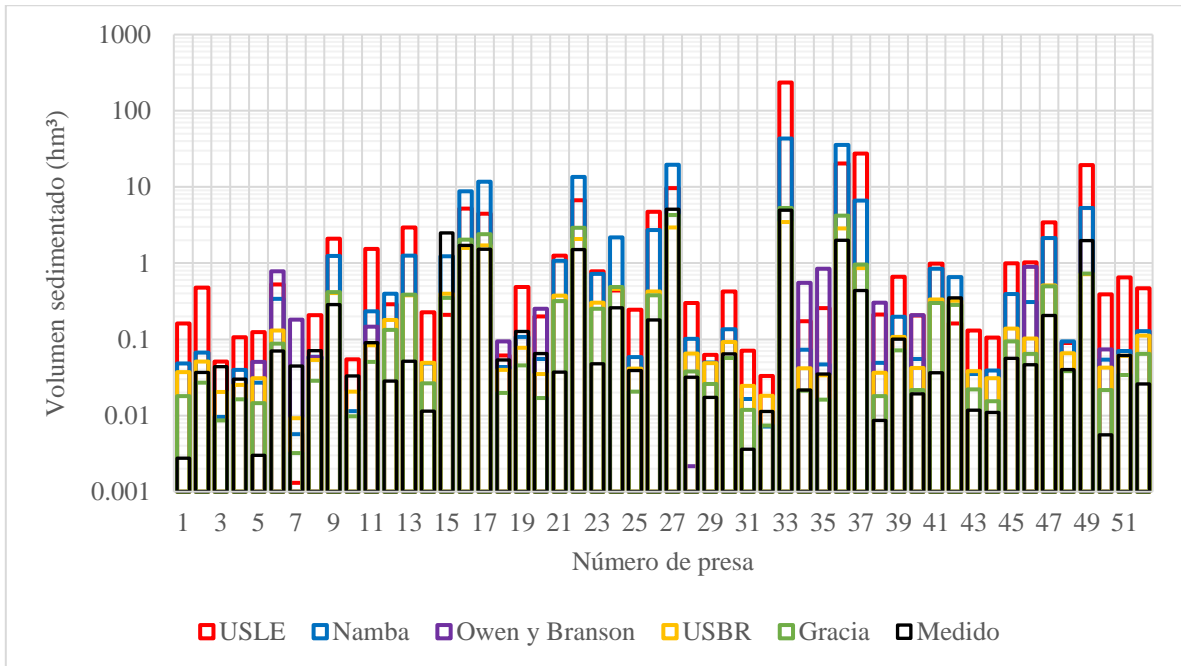


Figura 23. Volumen sedimentado calculado (con métodos empíricos) y medido.

3.3.4 Pérdida de capacidad de los embalses

Para determinar la pérdida de capacidad, se comparó el volumen de sedimentos estimado desde la fecha de construcción hasta el año 2024 utilizando cada método empírico y los datos medidos, respecto a los siguientes volúmenes de almacenamiento.

Los resultados se presentan en porcentaje, que indica la cantidad de volumen de agua que una presa pierde debido a la acumulación de sedimentos. De este modo, cuando este valor supera el 100%, la presa no puede almacenar más agua debido a la sedimentación en el embalse.

Volumen al NAME

De acuerdo con resultados obtenidos (**Figura 24**), el número de presas que sobrepasaron la capacidad de almacenamiento al NAME son: 4 con los datos medidos, 31 con el método USLE, 15 con el método Namba, 9 con el método Owen y Branson (considerando 14 presas en las que el método se utilizó), 6 con el método USBR y 3 con el método de Gracia.

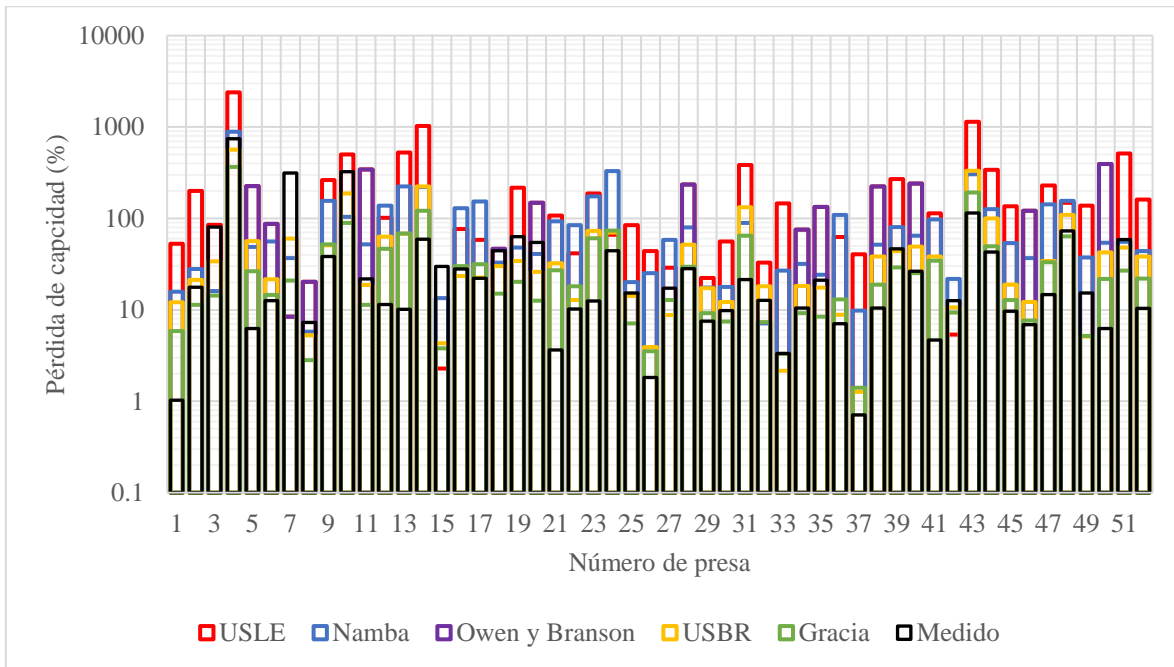


Figura 24. Pérdida de capacidad de almacenamiento respecto al NAME, estimada para el año 2024.

Volumen al NAMO

Respecto a la capacidad de almacenamiento al NAMO (**Figura 25**), la cantidad de presas que sobrepasaron su capacidad de almacenamiento son: 5 con los datos medidos, 38 con el método USLE, 20 con el método Namba, 11 con el método Owen y Branson, 10 con el método USBR y 7 con el método de Gracia.

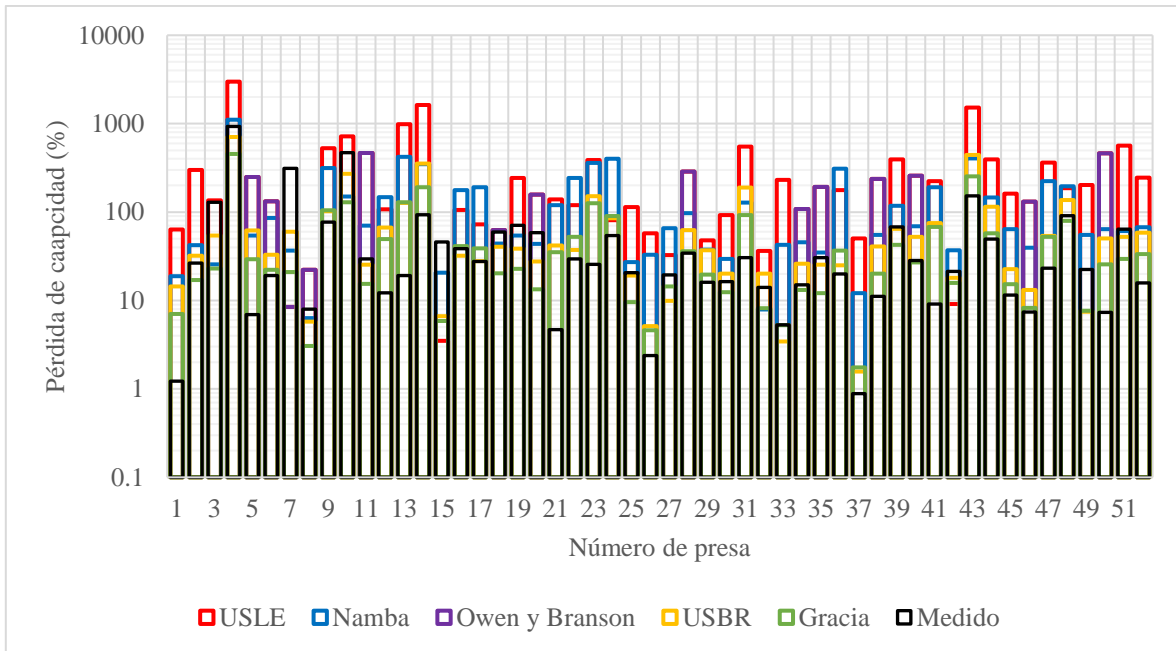


Figura 25. Pérdida de capacidad de almacenamiento respecto al NAMO, estimada para el año 2024.

Volumen de azolve

De acuerdo con información publicada por CONAGUA & SEMARNAT (2012), se recopiló información del volumen de azolve de 44 de las presas de estudio (**Figura 26**), la cantidad de presas que sobrepasaron dicho volumen son: 34 con los datos medidos, 42 con el método USLE, 42 con el método Namba, 13 con el método Owen y Branson, 37 con el método USBR y 35 con el método de Gracia.

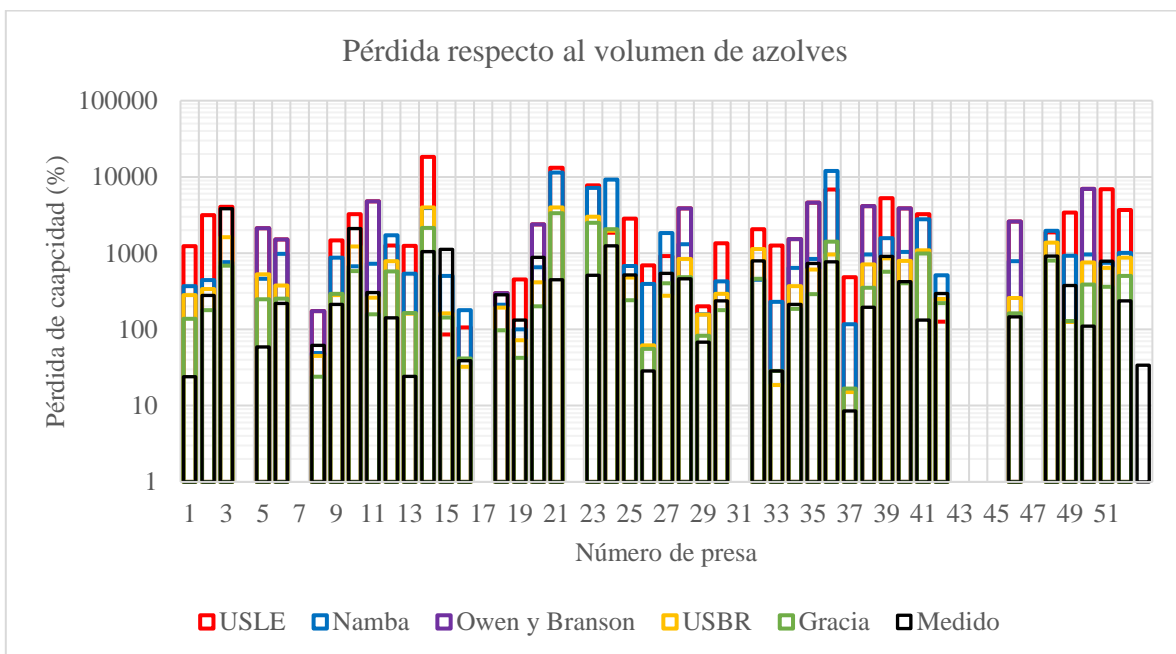


Figura 26. Pérdida de capacidad de volumen de azolves de diseño, estimada para el año 2024.

En resumen, la pérdida de capacidad de almacenamiento refleja una diferencia entre los valores calculados y los medidos. No obstante, en el siguiente capítulo se plantea identificar el método cuyo resultado de volumen de sedimentos sea el más cercano a los valores medidos.

4 Análisis de resultados

En este apartado se realiza un análisis de los resultados con la finalidad de identificar el método que mejor se ajusta a los datos de sedimentación medidos. Con los resultados obtenidos, se proponen algunas ecuaciones para estimar el volumen de sedimentos en función de distintos parámetros de la cuenca. Finalmente, se presentan la aplicabilidad y limitaciones de dichas ecuaciones y de los métodos empíricos utilizados.

4.1 Datos medidos vs datos calculados

Con la finalidad de analizar el volumen de sedimento atrapado medio anual calculado con métodos empíricos, a partir de las características fisiográficas de las cuencas principalmente, se realizó una comparación con los datos obtenidos de distintas fuentes (Acosta, 2021; Campos-Aranda, 2012; CONAGUA & IMTA, s/f), estimados con curvas elevación-capacidad (CONAGUA & SEMARNAT, 2012; Moreno, 2014) y calculados en este trabajo a partir de los datos de sedimento registrados en estaciones hidrométricas.

En primer lugar, se compararon los pares de datos medidos (VM) y calculados (VC) graficándolos a escala “uno a uno”, como se muestra en la **Figura 27**, donde se incluye la recta que representa esta relación, con una pendiente de 45° .

Se observa una sobrestimación del volumen de sedimento en la mayoría de las presas y una subestimación en 21; en ambos casos, con todos los métodos empíricos (**Tabla 30**). Destaca el caso de las presas Dolores (7) y Federalismo Mexicano (15), en las cuales el volumen es menor al medido. La primera con un área de $12.62 [km^2]$, precipitación media de $800 [mm]$, pendiente media de 33.64% y ubicada en el Estado de Zacatecas; la segunda con un área de $1,539.02 [km^2]$, precipitación media de $743.02 [mm]$, pendiente media de 25.85% y ubicada en el Estado de Durango.

Los puntos más cercanos a la recta de 45° , indican que los valores calculados son similares a los medidos, en cambio, los puntos más alejados indican lo contrario. Este análisis se realizó considerando tres rangos de diferencia: $\pm 25\%$, $\pm 50\%$ y $\pm 75\%$ en la relación entre VC y VM.

Tabla 30. Aporte de sedimentos calculado con el método de Gracia.

		±25%				
Rango		USLE	Namba	Owen y Branson	USBR	Gracia
No. de presas	Sobrestimación	47	43	12	35	29
	Subestimación	3	5	1	8	14
	Dentro del rango	2	4	1	9	9
		±50%				
Rango		USLE	Namba	Owen y Branson	USBR	Gracia
No. de presas	Sobrestimación	47	41	12	32	25
	Subestimación	2	2	1	4	10
	Dentro del rango	3	9	1	16	17
		±75%				
Rango		USLE	Namba	Owen y Branson	USBR	Gracia
No. de presas	Sobrestimación	47	40	12	29	24
	Subestimación	2	2	1	2	3
	Dentro del rango	3	10	1	21	25

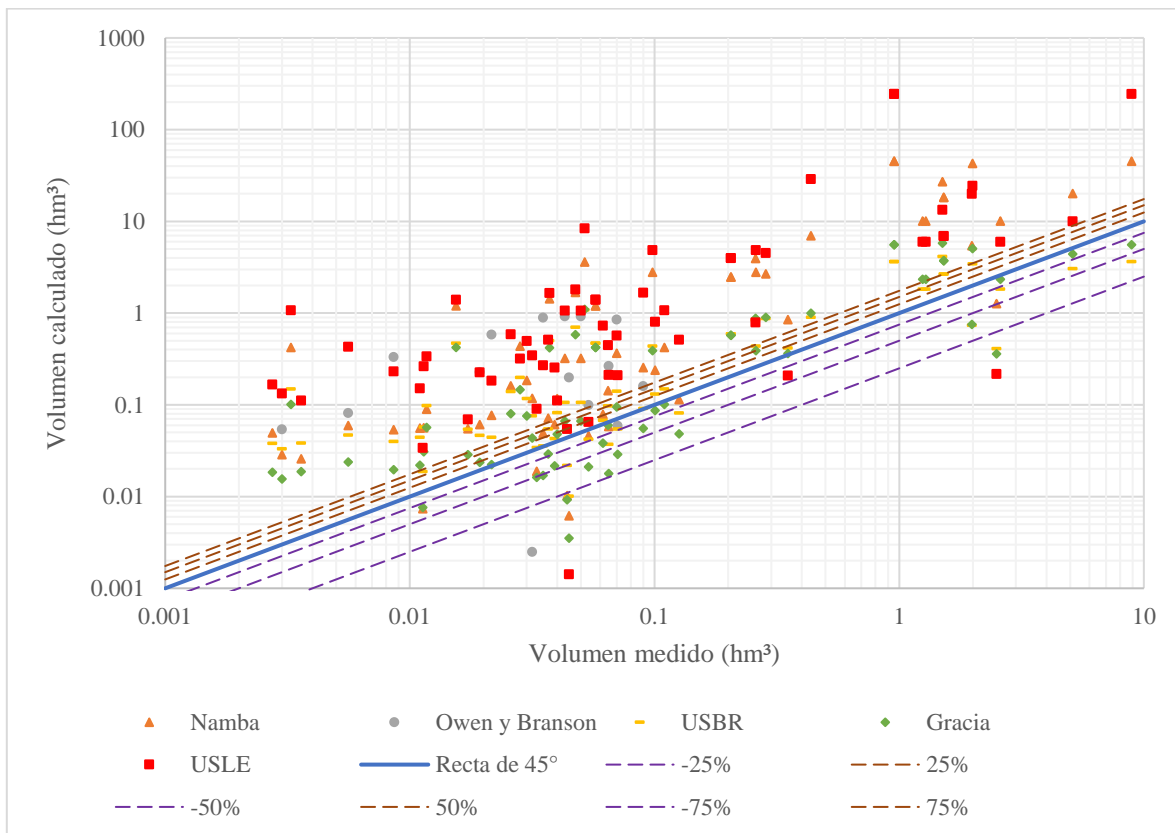


Figura 27. Relación entre el volumen de sedimento atrapado medido y calculado.

Los resultados indican que los métodos Namba y USLE sobreestiman el volumen de sedimentos generado como efecto de la erosión en las cuencas, mientras que los resultados de los métodos del USBR y Gracia, son similares a los medidos.

4.1.1 Error relativo

Con el objetivo de conocer una métrica que indique la precisión de los métodos empleados, se calculó el error relativo del resultado obtenido con cada método (**Figura 28**), mediante la Ecuación 24. Cuando el error es cercano a cero indica que los resultados son similares a los valores medidos y en medida que el porcentaje aumenta, se presenta una mayor diferencia respecto a los datos medidos. Cuando una presa tenía datos de 2 o más fuentes distintas, el VM de comparación se consideró como el promedio de ambas.

$$\% \text{ error} = \frac{|Vol. medido - Vol. Calculado|}{Vol. medido} * 100 \quad \text{Ecuación 24}$$

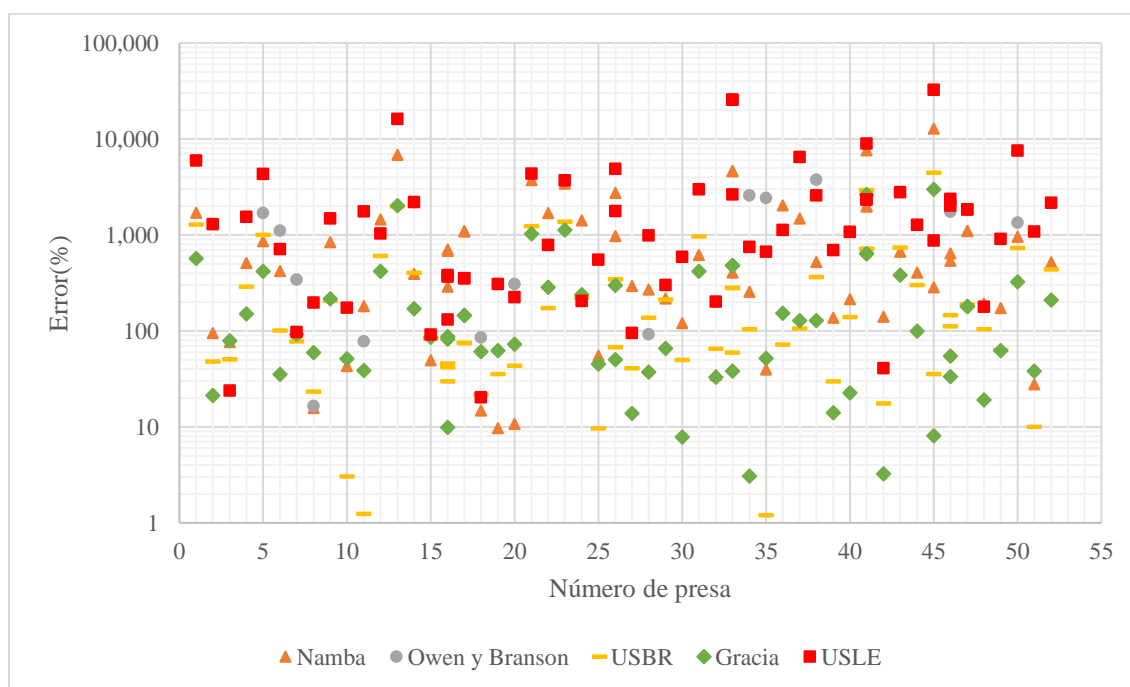


Figura 28. Error de los métodos empleados.

De forma general, se observan errores grandes (mayores al 50 %) a muy grandes (mayores al 500 %); en la **Tabla 31** se el número de presas que presentan esto rangos de error, de acuerdo a cada método. Los métodos con mayores errores corresponden a los métodos USLE y Namba y con los menores errores a los métodos USBR y Gracia.

Tabla 31. Aporte de sedimentos calculado con el método de Gracia.

Error (%)	USLE	Namba	Owen y Branson	USBR	Gracia
Menor a 50	3	9	1	16	17
Entre 50 y 500	13	19	5	26	30
Mayor a 500	36	24	8	10	5

Se identificó que en las presas con datos de VM provenientes de distintas fuentes (presas Francisco I. Madero, José López Portillo, Luis Donaldo Colosio, Peña del Águila y Requena) presentan diferencias significativas. Esta situación evidencia que la comparación entre VM y VC está sujeta a cierta incertidumbre.

4.2 Ajuste de modelos

A partir de la información recopilada y estimada del volumen de sedimento atrapado medio anual, se ajustaron distintas ecuaciones con una y dos variables independientes relacionando el volumen de sedimentos con las características más relevantes: área de la cuenca, pendiente media de la cuenca, precipitación media anual y capacidad de almacenamiento al NAMO. Estas fueron seleccionadas para evaluar su influencia en el proceso de erosión y fueron calculadas durante la aplicación de algunos métodos presentados en los capítulos anteriores.

4.2.1 Una variable

Se realizaron 4 ajustes distintos (lineal, exponencial, logarítmico y polinómico) y el mejor de acuerdo con el coeficiente de correlación, R^2 (0.6055), corresponde a la variable independiente capacidad al NAMO (**Figura 29**), como:

$$VSMA = -1 \times 10^{-6} (V_{NAMO})^2 + 0.0052 V_{NAMO} - 0.054 \quad \text{Ecuación 25}$$

Considerando que:

$$10.4054 < V_{NAMO} < 5,189.59 \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde VSMA es el volumen de sedimentos medio anual [hm^3] y V_{NAMO} es la capacidad de almacenamiento al NAMO [hm^3].

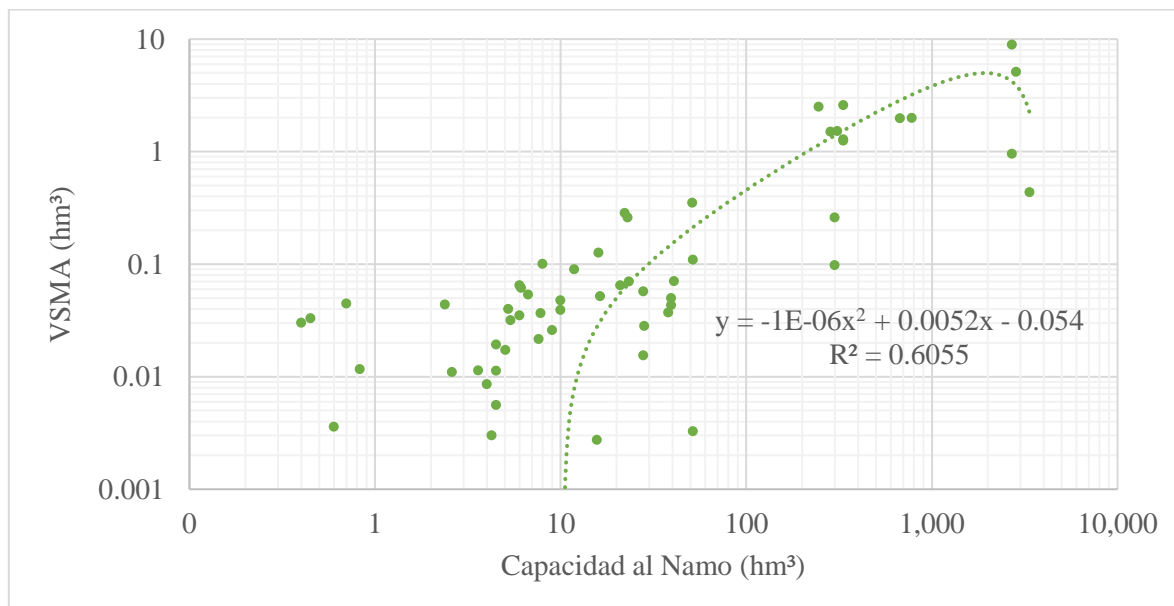


Figura 29. Mejor ajuste considerando una variable independiente.

Indistintamente de la característica utilizada en el ajuste, se observa una dispersión importante en los datos.

Con el objetivo de mejorar el ajuste y considerando que el área sea la característica fisiográfica más importante, se propusieron 3 rangos de áreas de la cuenca: áreas menores a 100 km^2 , de 100 a $1,000 \text{ km}^2$ y mayores a $1,000 \text{ km}^2$.

- Área de la cuenca menor a 100 km^2 :
El mejor ajuste ($R^2 = 0.3651$) corresponde la pendiente media con el modelo polinomial de segundo grado (Ecuación 27 y **Figura 30**)

$$VSMA = 0.0001(S_m)^2 - 0.0036S_m + 0.0438 \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde S_m es la pendiente media de la cuenca [%].

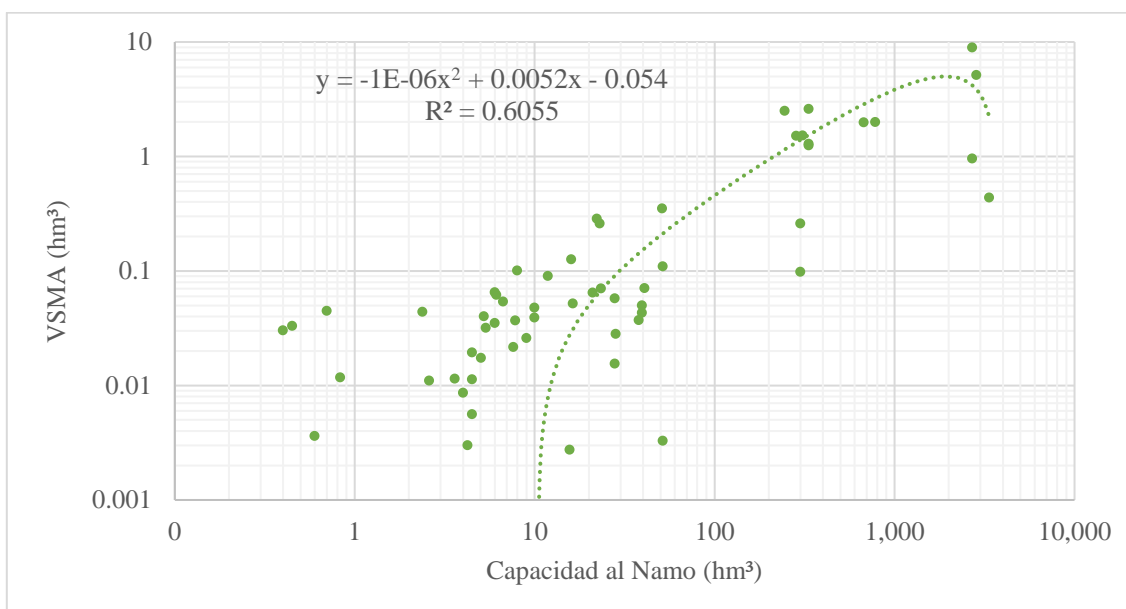


Figura 30. Mejor ajuste considerando una variable y áreas menores a 100 km^2 .

- Área de cuenca entre 100 y $1,000 \text{ km}^2$:
En este rango, el mejor ajuste ($R^2 = 0.1951$) corresponde a la capacidad al NAMO con el modelo polinómico de segundo grado, descrito como:

$$VSMA = 0.0106 \ln(V_{NAMO}) + 0.025 \quad \text{Ecuación 28}$$

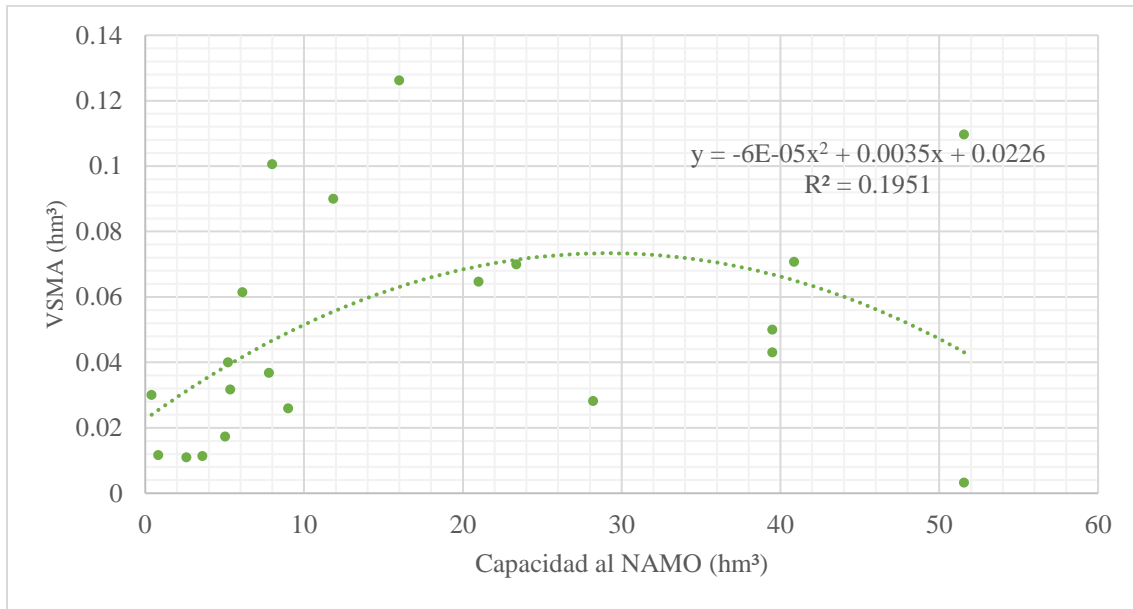


Figura 31. Mejor ajuste considerando una variable y áreas menores a 100 km².

- Área de cuenca mayor a 1,000 km²:
Finalmente, para las cuencas más grandes, el mejor ajuste ($R^2 = 0.4937$) corresponde a la capacidad de almacenamiento al NAMO con el modelo polinómico de segundo grado, de la forma:

$$VSMA = 0.0106 \ln(V_{NAMO}) + 0.025 \quad \text{Ecuación 29}$$

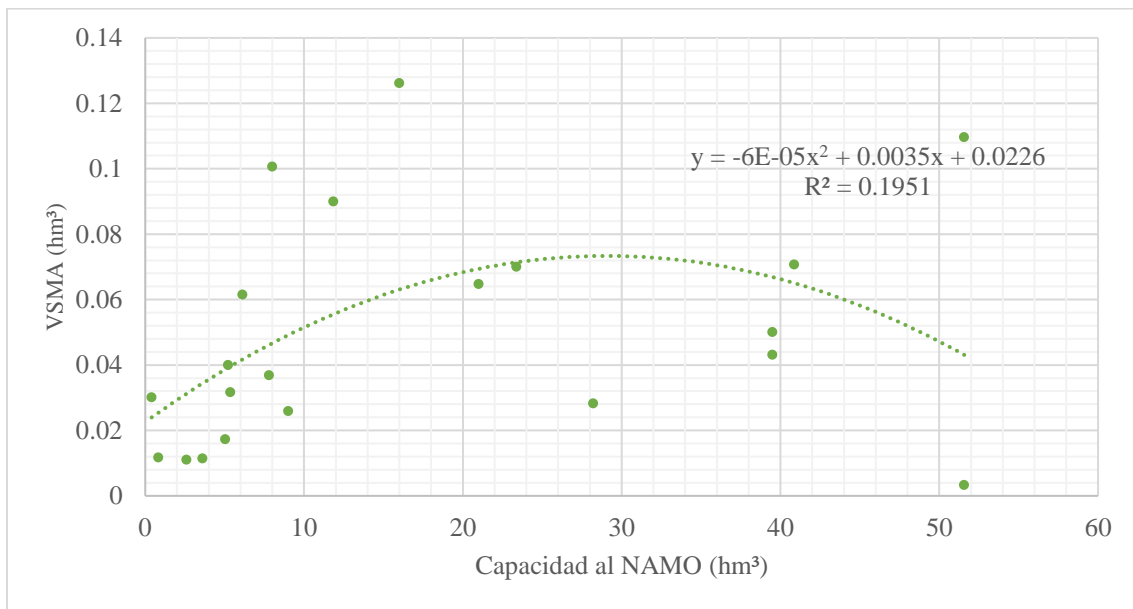


Figura 32. Mejor ajuste considerando una variable y áreas mayores a 100 km².

4.2.2 Dos o más variables

Los resultados anteriores indican que no existe una correlación adecuada entre el VSMA y cada una de las variables consideradas. Por lo tanto, para mejorarlos, se utilizó regresión múltiple considerando dos variables independientes y se consideró el mejor ajuste como aquel que minimiza el número de variables, maximiza R^2 y estima valores positivos para VSMA. En el caso del área, también se siguió la metodología del apartado anterior, esto es, utilizar los mismos rangos. De esta forma, el mejor ajuste de todos los datos y para cada rango se indica en la **Tabla 32**.

Tabla 32. Mejor ajuste de acuerdo a distintos rangos de área.

Rango	Variables independientes	Coefficiente de correlación múltiple	Coefficiente de determinación R^2	R^2 ajustado	Error típico	Observaciones
Todas las A_C	A_C - V_{NAMO}	0.6770	0.4584	0.4387	1.0743	58
$A_C < 100 \text{ km}^2$	A_C - S_m	0.3927	0.1543	0.0133	0.0203	15
$100 < A_C < 1,000 \text{ km}^2$	S_m - V_{NAMO}	0.3188	0.1017	0.0018	0.0350	21
$A_C > 10,000 \text{ km}^2$	Pm - V_{NAMO}	0.5749	0.3305	0.2600	1.7875	22

Estos ajustes están representados por las ecuaciones siguientes:

Todas las áreas:

$$VSMA = 0.1428 + 2.558 * 10^{-5} * A_C + 0.00104 * V_{NAMO} \quad \text{Ecuación 30}$$

Área de la cuenca menor a 100 km^2 :

$$VSMA = 0.02779 - 0.00020A_C + 0.00057S_m \quad \text{Ecuación 31}$$

Considerando que:

$$S_m > \frac{0.0002A_C - 0.02779}{-0.00247} \quad \text{Ecuación 32}$$

Área de la cuenca de 100 km^2 a $1,000 \text{ km}^2$:

$$VSMA = 0.02746 + 0.00075S_m + 0.00037V_{NAMO} \quad \text{Ecuación 33}$$

Área de la cuenca mayor a $1,000 \text{ km}^2$:

$$VSMA = 2.09145 - 0.00204Pm + 0.00128V_{NAMO} \quad \text{Ecuación 34}$$

Considerando que:

$$V_{NAMO} > \frac{0.00204Pm - 2.09145}{0.00128} \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde VSMA es el volumen de sedimentos medio anual [hm^3], A_C es el área de la cuenca [km^2], S_m es la pendiente media de la cuenca (%), Pm es precipitación media anual [mm] y V_{NAMO} es la capacidad de almacenamiento al NAMO [hm^3].

4.2.3 Mejor formulación

De acuerdo al análisis realizado, se observó que el comportamiento de volumen de sólidos que llega a una presa varía de acuerdo a diferentes factores y no existe una característica predominante.

Comparando los resultados obtenidos (**Tabla 33**), se observa que el mejor ajuste ($R^2 = 0.6045$) corresponde a un modelo polinomial de una variable, siendo la variable independiente la capacidad de almacenamiento al NAMO representado por la Ecuación 25, pero con restricciones de aplicación.

El segundo mejor ($R^2 = 0.4937$) corresponde a un modelo polinomial de segundo grado considerando la capacidad al NAMO como la variable independiente (Ecuación 29), válido en cuencas con área mayor a 1,000 [km^2].

Debido a que las dos ecuaciones anteriores no son aplicables en ciertas condiciones, también se dispone de la Ecuación 30, generada a partir de la relación lineal múltiple de dos variables, representadas por el área de la cuenca y la capacidad al NAMO. Esta ecuación presenta un menor coeficiente que las 2 ecuaciones anteriores ($R^2 = 0.4937$), pero puede ser utilizada para cualquier valor de área y capacidad al NAMO. La agrupación de las áreas en rangos, no ayudó a mejorar el coeficiente de correlación.

Tabla 33. Mejor ecuación de ajuste de acuerdo al área de la cuenca.

Todas las areas		Areas<100		Area de 100-1,000		Areas>1,000	
Variable(s)	R ²	Variable(s)	R ²	Variable(s)	R ²	Variable(s)	R ²
Ac	0.4329	Ac	0.0516	Ac	0.0042	Ac	0.2678
S _m	0.0864	S _m	0.3651	S _m	0.0814	S _m	0.1178
Pm	0.0118	Pm	0.0140	Pm	0.0472	Pm	0.0736
V _{NAMO}	0.6055	V _{NAMO}	0.0736	V _{NAMO}	0.1951	V _{NAMO}	0.4937
Ac-S _m	0.3035	Ac-S _m	0.1543	Ac-S _m	0.0727	Ac-S _m	0.2069
Ac-Pm	0.2725	Ac-Pm	0.0398	Ac-Pm	0.0152	Ac-Pm	0.1653
Ac-V _{NAMO}	0.4584	Ac-V _{NAMO}	0.0399	Ac-V _{NAMO}	0.0819	Ac-V _{NAMO}	0.3243
S _m -Pm	0.0675	S _m -Pm	0.1005	S _m -Pm	0.0761	S _m -Pm	0.1379
S _m -V _{NAMO}	0.4322	S _m -V _{NAMO}	0.1128	S _m -V _{NAMO}	0.1017	S _m -V _{NAMO}	0.3147
Pm-V _{NAMO}	0.4416	Pm-V _{NAMO}	0.0086	Pm-V _{NAMO}	0.0628	Pm-V _{NAMO}	0.3305
Mejor ajuste		Mejor ajuste		Mejor ajuste		Mejor ajuste	
V _{NAMO}	0.6055	S _m	0.3651	V _{NAMO}	0.1951	V _{NAMO}	0.4937

4.3 Volumen de sedimentos vs características de la cuenca y del embalse

En este apartado se realiza una comparación entre el VM, VC y con las ecuaciones propuestas (Ecuación 25 y Ecuación 30), en la cual, se analiza la fuente de información y las características fisiográficas correspondientes.

Los valores calculados con los métodos empíricos fueron representados con símbolos, mientras que los calculados con las ecuaciones propuestas y los datos medidos se representaron por medio de una recta; esta representación permite observar la precisión de los métodos empíricos y el comportamiento de las fórmulas propuestas.

La comparación del volumen de sedimentos medido se realizó de acuerdo a la fuente de información contra el área (**Figura 33**), pendiente media (**Figura 34**), precipitación media anual (**Figura 35**) y capacidad de almacenamiento al NAMO (**Figura 36**).

Volumen de sedimentos vs área de la cuenca:

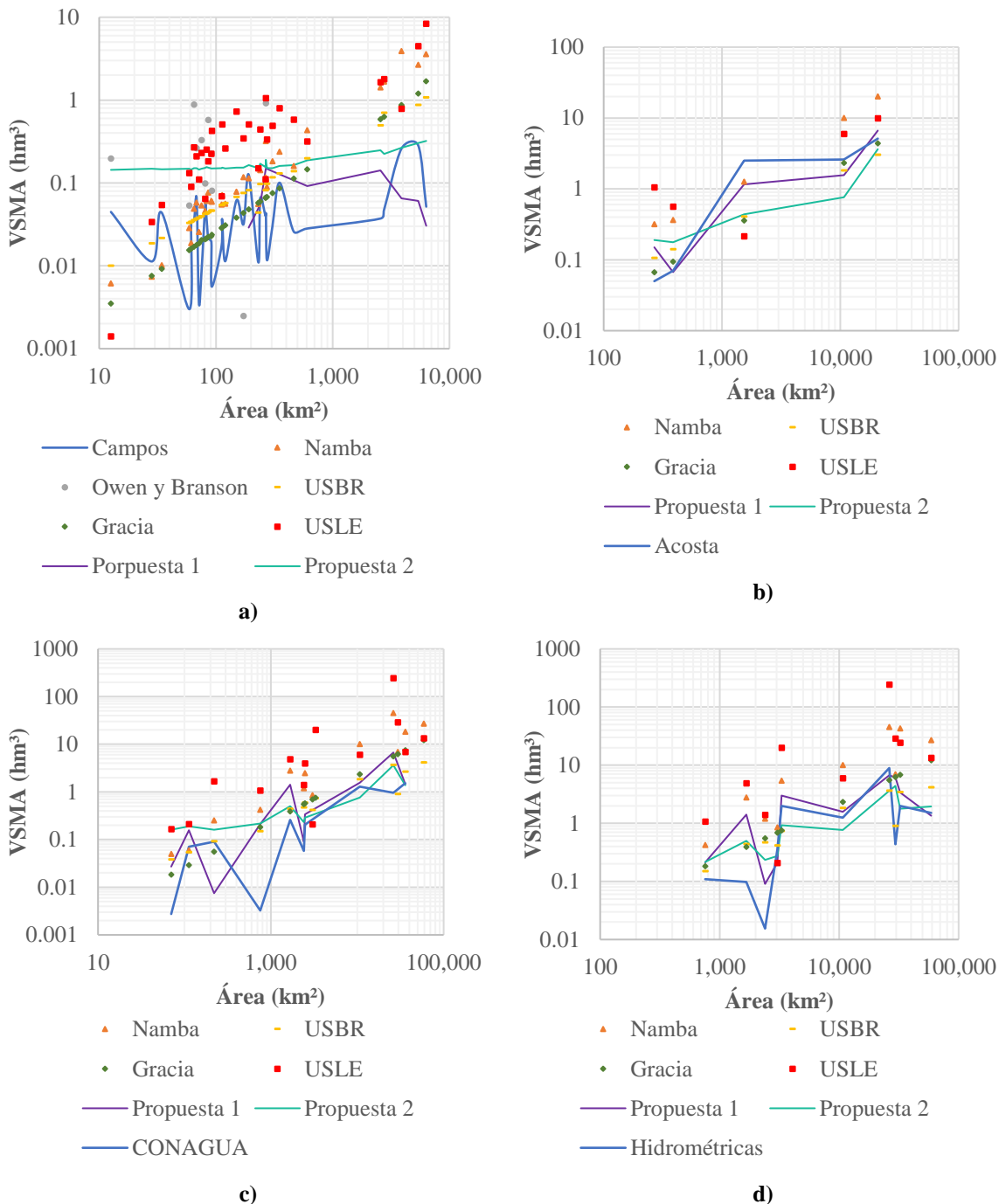
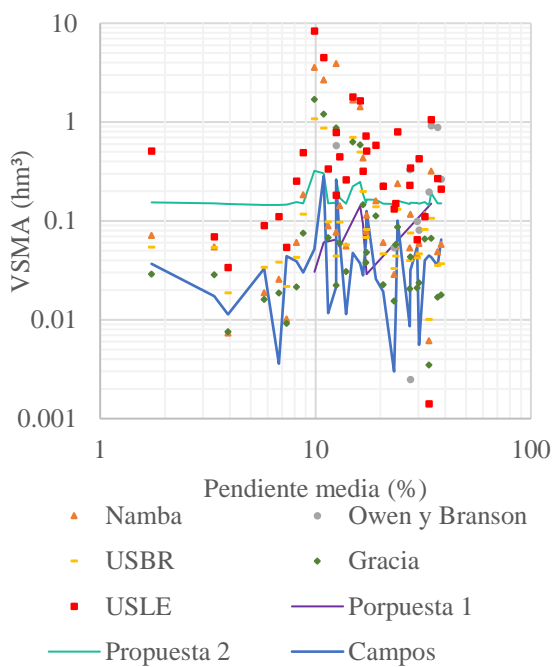
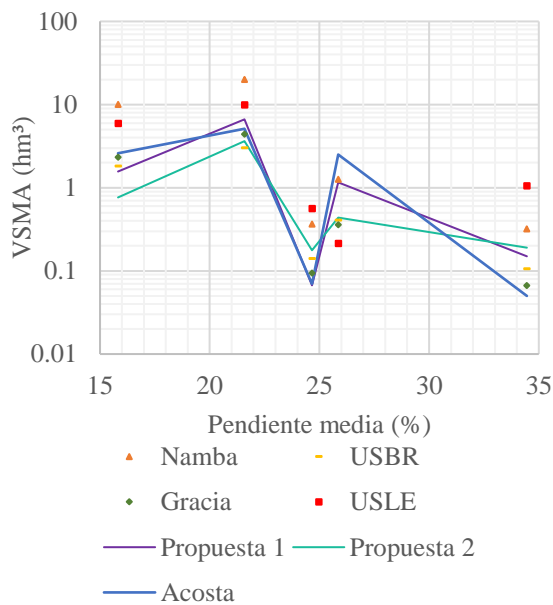


Figura 33. Relación de volumen de sedimentos-área entre métodos empíricos y datos medidos por Campos-Aranda (2012) (a), Acosta (2021) (b), CONAGUA & SEMARNAT (2012) (c) y CONAGUA & IMTA (s/f) (d).

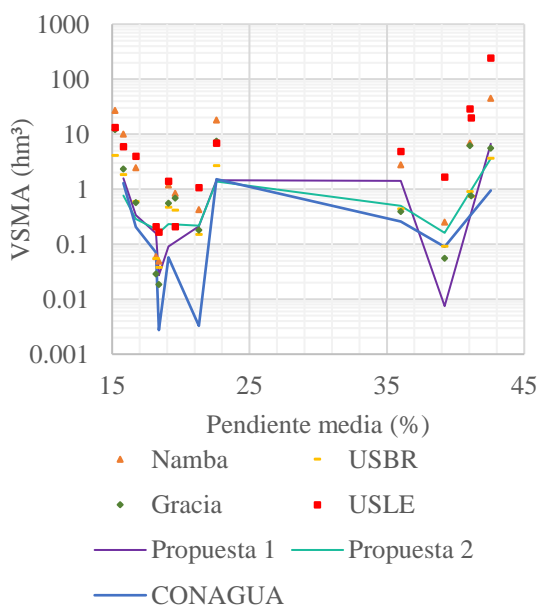
Volumen de sedimentos vs pendiente media



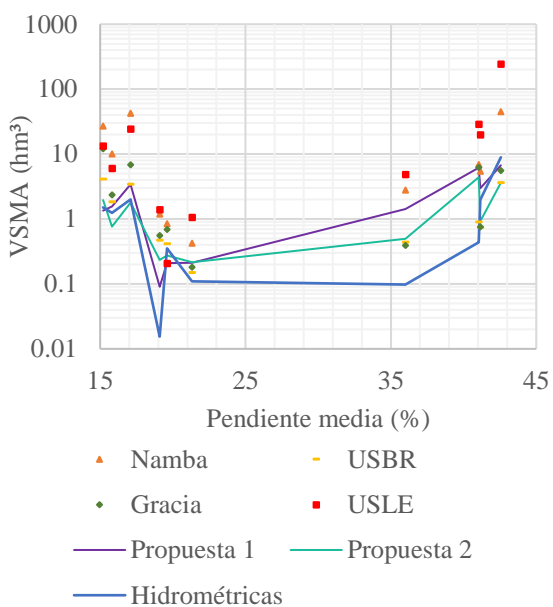
a)



b)



c)



d)

Figura 34. Relación de volumen de sedimentos-pendiente media entre métodos empíricos y datos medidos por Campos-Aranda (2012) (a), Acosta (2021) (b), CONAGUA & SEMARNAT (2012) (c) y CONAGUA & IMTA (s/f) (d).

Volumen de sedimentos vs precipitación media anual

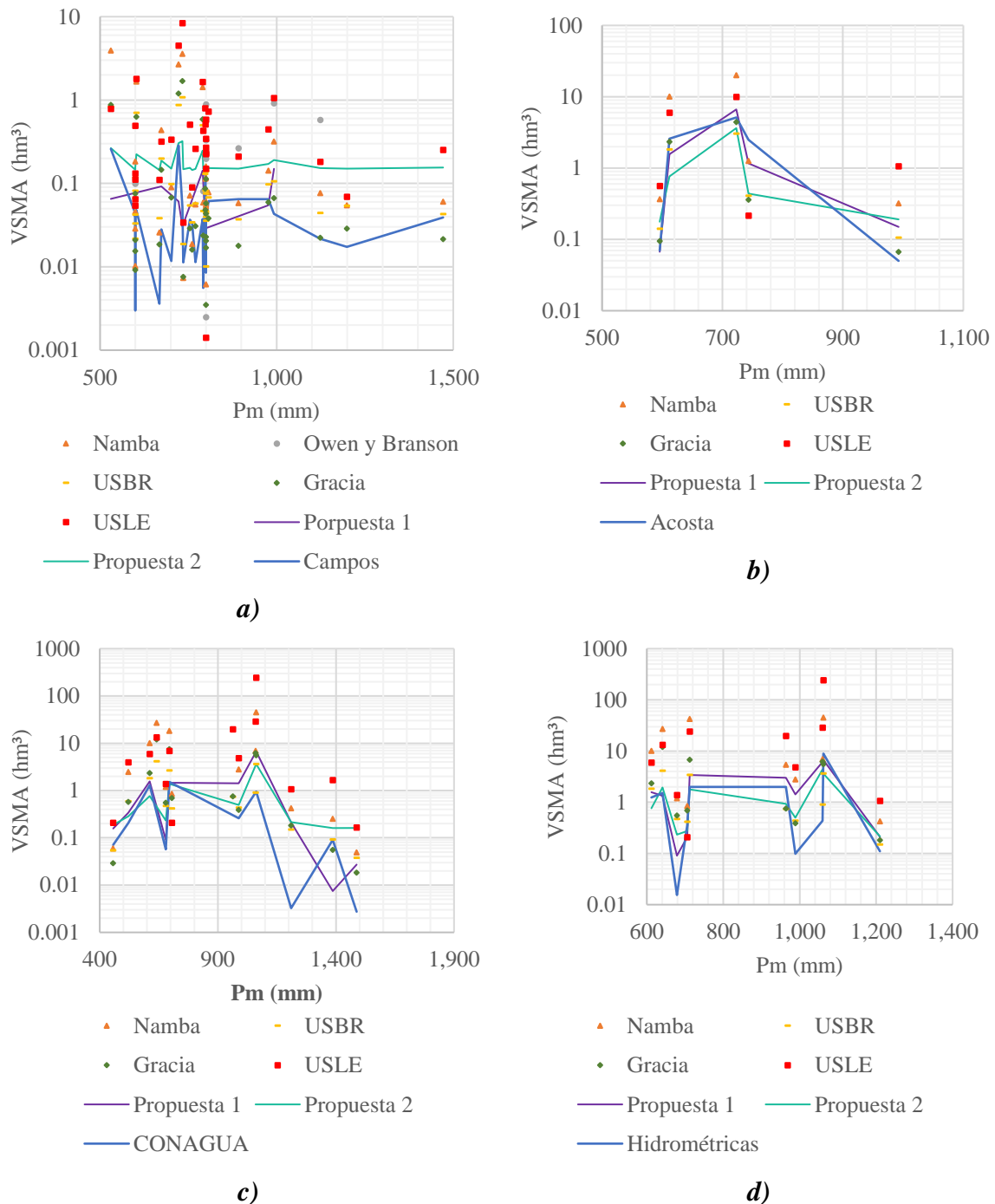


Figura 35. Relación de volumen de sedimentos-precipitación media anual entre métodos empíricos y datos medidos por Campos-Aranda (2012) (a), Acosta (2021) (b), CONAGUA & SEMARNAT (2012) (c) y CONAGUA & IMTA (s/f) (d).

Volumen de sedimentos vs capacidad de almacenamiento al NAMO

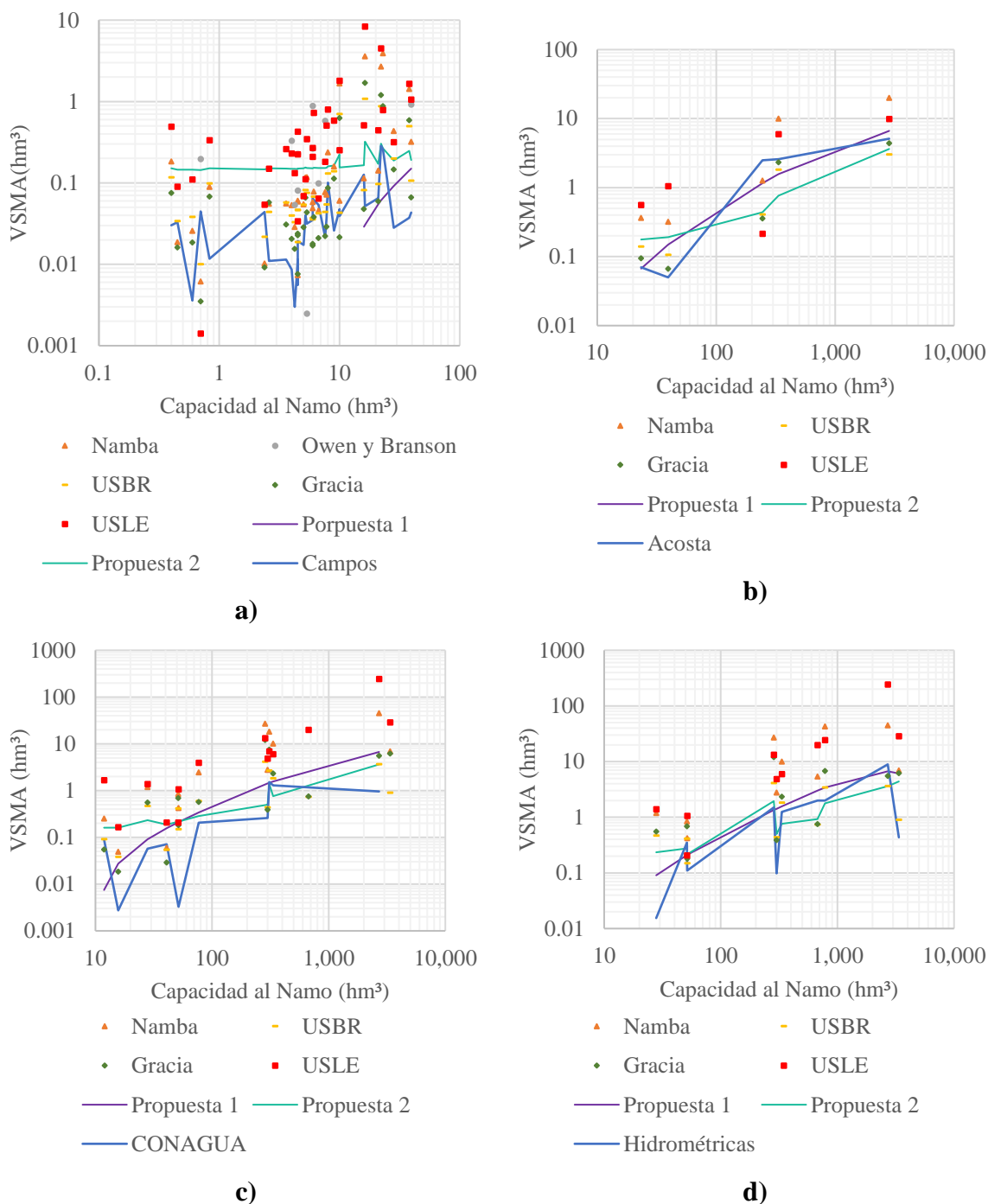


Figura 36. Relación entre volumen de sedimento-capacidad de almacenamiento al NAMO utilizando métodos empíricos y datos medidos por Campos-Aranda (2012) (a), Acosta (2021) (b), CONAGUA & SEMARNAT (2012) (c) y CONAGUA & IMTA (s/f) (d).

De la gráficas anteriores, se identificó lo siguiente:

- El volumen de sedimentos medido no sigue un comportamiento lineal de acuerdo a las características analizadas.

- El método de Owen y Branson presenta una mayor diferencia con los datos medidos cuando el área de la cuenca es menor a 100.
- Los métodos que solo consideran el área de la cuenca (USBR y Gracia) tienen resultados más cercanos a los datos medidos, cuando el área es menor a 1,000 km^2 .
- Las ecuaciones propuestas se acercan más a los datos medidos cuando el área de la cuenca es mayor a 1,000 km^2 .
- El volumen calculado con los métodos Namba y USLE presentan una mayor diferencia respecto al volumen medido. Se observó que estos métodos suelen sobrestimar el volumen de sedimentos medido.
- Los valores no incrementan o disminuyen proporcionalmente de acuerdo al área de la cuenca, pendiente media, precipitación media y capacidad de almacenamiento al NAMO.
- No se identificó una relación entre las características seleccionadas y el volumen de sedimentos.

5 Conclusiones

En este trabajo se estimó el volumen medio anual de sedimento atrapado en 52 presas localizadas en las regiones centro y norte de México mediante cuatro métodos empíricos (USLE, Namba, USBR y Gracia); uno más, el método de Owen y Branson sólo se aplicó en 14 de ellas. De forma general, el cálculo de la erosión en la cuenca, transporte y volumen de sedimentos genera variaciones que no siguen un patrón específico.

Es importante señalar que ninguno de los métodos empíricos utilizados fue capaz de simular todos los factores que intervienen en los procesos que dan lugar a la sedimentación de embalses. Sin embargo, un mayor número de mediciones puede ayudar a comprender dichos procesos, mejorar los modelos existentes o a generar nuevos, que representen de mejor forma dicho comportamiento. Se identificó que las presas con datos de dos fuentes o más, no coinciden entre sí, por tanto, existe incertidumbre en el volumen de sedimento atrapado, valores con los cuales se compararon los resultados obtenidos con los métodos empíricos.

El análisis de resultados indica que los métodos del USBR y Gracia son los que tuvieron un mejor desempeño bajo las condiciones existentes de la zona de estudio. Las presas donde el error relativo fue menor al 100% son: 6 utilizando método USLE, 13 con Namba, 4 con Owen y Branson, 23 con USBR y 30 con Gracia.

La metodología USLE representa una mayor diferencia con los VM, no obstante, se puede deber a la incertidumbre existente en el cálculo de los factores de la misma.

A partir de la información de volumen de sedimento atrapado disponible, se propusieron tres modelos para estimar dicho volumen a partir de las características más relevantes; las dos primeras (Ecuación 25 y Ecuación 29) tienen restricciones de aplicación, en función del valor del área de la cuenca y la capacidad de almacenamiento al NAMO. No obstante, la tercera ecuación (Ecuación 30) no tiene restricción alguna.

El método de Gracia mostró una mayor similitud con los datos medidos cuando las áreas de la cuenca son menores a $1,000 \text{ km}^2$. Las presas con cuencas mayores a $1,000 \text{ km}^2$ de superficie fueron mejor representados por las dos ecuaciones propuestas.

La forma en que se depositan los sedimentos a lo largo del tiempo y las políticas de operación de la presa, deben considerarse al calcular el volumen de sedimentos en el embalse, esto, debido a que los cambios en la densidad afectan más a las presas de mayor tamaño.

Finalmente, la diferencia entre los valores calculados y medidos influyó directamente en el cálculo de la pérdida de almacenamiento en los embalses.

Referencias

- Acosta, 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.
- Aparicio, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie* (1a ed.). LIMUSA.
- ArcGIS Insights. (s/f). *Análisis de regresión*. Recuperado el 16 de marzo de 2025, de <https://doc.arcgis.com/es/insights/latest/analyze/regression-analysis.htm>
- Arnoldus, H. M. J. (1977). Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. En *FAO Soils Bulletin 34. Assessing Soil Degradation*. FAO.
- Arreguín, F. (2021). *Obras Hidráulicas*. Instituto de Ingeniería UNAM.
- Arreguín, F., Preciado, M. E., Val, R., & Arganis, M. L. (2021). Capítulo 7. Perspectivas del estado de los sedimentos en México. En *Perspectivas de la gestión actual de sedimentos en nueve países de las Américas* (UNESCO, pp. 97–106).
- Arreguín-Cortés, F. I., & Marengo-Mogollón, H. (2013). Inventario nacional de presas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(4), 179–185. <https://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/issue/view/30>
- BANXICO. (2022). *Informe Trimestral Abril-Junio 2022*.
- Barragán, M. del C. (2000). *Remoción de sedimentos en embalses con la ayuda de la modelación física* [Tesis de Maestría en Ingeniería Hidráulica]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Berezowsky, M., & Vilchis, R. (2000). *Protección y control de cauces*. CONAGUA.
- Bribiesca, M. Á. (2017). *Análisis de la factibilidad del empleo del método de desazolve “flushing” en una presa mexicana con problemas de sedimentación en su embalse, mediante el uso de un modelo bidimensional* [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Brune, & Gunnar, M. (1953). Trap Efficiency of Reservoirs. *Transactions of American Geophysical Union*, 34(3).
- Calinski, T., Moore, D. S., & McCabe, G. P. (1990). Introduction to the Practice of Statistics. *Biometrics*, 46(3). <https://doi.org/10.2307/2532120>
- Camargo, J. E., & Franco, V. (2005). Equipos de medición. Fundamentos. En *La medición de sedimentos en México* (1a ed., Vol. 1, pp. 17–33). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- 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 Zhide Zhou.

Tecnología y Ciencias del Agua, 3(3), 163–173.
<https://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/issue/view/23>

- Chow, V. Te. (2000). *Hidrología aplicada* (M. E. Suárez, Ed.; Primera). McGraw-Hill.
- Churchill, M. A. (1948). Discussion of “Analysis and Use of Reservoir Sedimentation Data”. En *Proceedings of Federal Interagency Sedimentation Conference* (pp. 139–140).
- CONABIO. (2001, agosto 22). *Precipitación media anual*.
http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/clima/precip/preci4mgw
- CONAGUA, & IMTA. (s/f). *SIG BANDAS v 1.0*. Recuperado el 19 de noviembre de 2024, de <http://hidrosuperf.imta.mx/bandas/>
- CONAGUA, & SEMARNAT. (2012). *Sistema de Seguridad de Presas*.
<http://presas.conagua.gob.mx/inventario/>
- CONAGUA, & SEMARNAT. (2023). *Atlas del Agua en México 2023*. CONAGUA.
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8(7). <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- Domínguez, J. (2019). La construcción de presas en México. *Gestión y Política Pública*, 28(1).
- Escalante, C. A. (2004). *Efecto de la estimación del factor erosivo de la lluvia en el aporte de sedimentos*. Facultad de Ingeniería.
- FAO. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*.
- FAO. (1993). *Erosión de suelos en América Latina*.
<https://www.fao.org/4/t2351s/T2351S00.htm#Contents>
- Flores, J. A. (2016). *Manejo sustentable de sedimentos en embalses* [Tesis de maestría].
<http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/9905>
- García, E. (1998). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen, Adaptado para las Condiciones de la República Mexicana. En *Instituto de Geografía*.
- García, M. H. (2008). *Sedimentation Engineering* (M. Garcia, Ed.). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784408148>
- Gracia, J. (1997a). *Pérdida de suelo en cuencas. Capítulo 17 del manual de Ingeniería en Ríos*. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Gracia, J. (1997b). *Sedimentación en embalses. Capítulo 18 del manual de Ingeniería en Ríos*. Instituto de Ingeniería, UNAM.

- Harsányi, E., Bashir, B., Alsilibe, F., Farhan, M., Moazzam, U., Ratonyi, T., Alsalman, A., Széles, A., Nyeki, A., Takács, I., & Mohammed, S. (2022). Predicting Modified Fournier Index by Using Artificial Neural Network in Central Europe. *Public Health*, 19, 10653. <https://doi.org/10.3390/ijerph191710653>
- Hernández, L. A. (2022). *Análisis espacio-temporal de variables climatológicas en la cuenca del río Piaxtla* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/SXPS2D6759D4JCT1Q51SD1ENF5I7DD2MSH92V NVL4UXKVR5M4Q-27264?func=full-set-set&set_number=017582&set_entry=000006&format=999
- Hudson, N. W. (1997). Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y la escorrentía. *Boletín de Suelos de la FAO*.
- INEGI. (2018). *Uso de suelo y vegetación*. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#descargas>
- INEGI. (2023). *Diccionario de datos de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000*.
- INEGI. (2024). *Edafología*. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/#descargas>
- Köppen, W. (1936). *Handbuch der Klimatologie: Das geographische System der Klimate*. En *Verlag von Gebrüder Borntraeger* (Vol. 35).
- Lane, E. W., & Koelzer, V. A. (1943). *Density of Sediments Deposited in Reservoirs. Report No. 9*. Hydraulic Laboratory, University of Iowa City.
- Lara, & Pemberton, E. L. (1963). Initial unit-weight of deposited sediments. *Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, U.S.D.A., USA*.
- López-Basilio, E. (2024). *Estimación de sedimentos en embalses por medio de teledetección y herramientas numéricas*.
- Loredo, C., Beltrán, S., Moreno, F., & Casiano, M. (2007). *Riesgo a la erosión hídrica y proyección de acciones de manejo y conservación del suelo en 32 microcuencas de San Luis Potosí* (Primera). INIFAP.
- Maza, J. A., & García, M. (1996). *Transporte de sedimentos. Capítulo 10 del manual de Ingeniería en Ríos*. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- McCuen, R. H. (1989). *Hydrologic Analysis and Design* (2a ed.). Prentice Hall.
- Mendivil, K., Amábilis, L. E., Roé, A., & Hermosillo, J. J. (2023). Gestión de presas para el abastecimiento del sector agroalimentario ante el fenómeno de sequía. *Impluvium*, 22, 44–51.
- Miller, C. R. (1953). *Determination of the Unit Weight of Sediment for Use in Sediment Volume Computations*. U.S. Bureau of Reclamation.

- Montes-León, M. A. L., Uribe-Alcántara, E. M., & García-Celis, E. (2011). Mapa Nacional de Erosión Potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(1), 05–17. <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/223>
- Moreno, J. T. (2014). *Levantamiento aerofotogramétrico y topobatimétrico de la Presa Cazadero, municipio San Alto Zacatecas* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ochoa-García, S. A. (2021). Aplicación de una metodología simplificada para estimar las curvas de capacidad de embalses. *Revista de Teledetección*, 58, 105. <https://doi.org/10.4995/raet.2021.15303>
- Ongley, E. D. (1997). *Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos*. FAO.
- Palmieri, A., Shah, F., Annandale, G. W., & Dinar, A. (2003). *Reservoir Conservation Volume I: The RESCON Approach Economic and engineering evaluation of alternative strategies for managing sedimentation in storage reservoirs* (Vol. 1). The International Bank for Reconstruction and Development. <http://documents.worldbank.org/curated/en/819541468138875126/RESCON-approach>
- Perera, D., Williams, S., & Smakhtin, V. (2022). Present and Future Losses of Storage in Large Reservoirs Due to Sedimentation: A Country-Wise Global Assessment. *Sustainability*, 15(1), 219. <https://doi.org/10.3390/su15010219>
- QGIS project. (2002). *Guía de usuario de QGIS*. https://docs.qgis.org/3.34/es/docs/user_manual/index.html
- Ramírez-León, J. M., & Aparicio, J. (2009). Estimación de producción de sedimentos en cuencas. Aplicación al río Apulco, México. *Ingeniería hidráulica en México*, 14(4), 145–157.
- Rojas, T. (2009). Las obras hidráulicas en las épocas prehispánica y colonial. En *Semblanza histórica del agua en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Strand, R. I., & Pemberton, E. L. (1987). Reservoir Sedimentation. En *DESIGN OF SMALL DAMS* (3a ed., pp. 529–564). UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION.
- Wang, Z. Y., & Hu, C. (2009). Strategies for managing reservoir sedimentation. *International Journal of Sediment Research*, 24(4). [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(10\)60011-X](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(10)60011-X)
- White, R. (2001). Evacuation of sediments from reservoirs. En *Evacuation of sediments from reservoirs*. <https://doi.org/10.1680/eosfr.29538>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*.
- Zhu, J., Hu, P., Zhao, L., Gao, L., Qi, J., Zhang, Y., & Wang, R. (2020). Determine the Stumpf 2003 Model Parameters for Multispectral Remote Sensing Shallow Water

Bathymetry. *Journal of Coastal Research*, 102(sp1). <https://doi.org/10.2112/SI102-007.1>

Índice de figuras

Figura 1. Componentes principales de una cuenca (Hernández (2022)).	5
Figura 2. Componentes de una presa. Modificado de Aparicio (1992).	7
Figura 3. Proceso de erosión en cuencas (Gracia, 1997a).	8
Figura 4. Comportamiento general de los sedimentos en un embalse. Modificado de Gracia (1997b)	9
Figura 5. Muestreador horizontal instantáneo de sedimentos en suspensión (Camargo & Franco, 2005).	11
Figura 6. Muestreador integral de punto, US-P-46R (Camargo & Franco, 2005).	11
Figura 7. Muestreador integral de profundidad, botella de Delft (Camargo & Franco, 2005).	12
Figura 8. Trampa de arrastre de fondo (Hudson, 1997).	13
Figura 9. Trampa de panel (Camargo & Franco, 2005).	13
Figura 10. Regiones para estimar el factor R (Loredo et al., 2007)	15
Figura 11. Nomograma para obtener el factor de erodabilidad K (Wischmeier & Smith, 1978).	16
Figura 12. Gráfica para el cálculo del CES utilizando el criterio ASCE (Gracia, 1997a).	19
Figura 13. Curvas de eficiencia de atrapamiento (Strand & Pemberton, 1987).	22
Figura 14. Mapa de la pérdida de capacidad de almacenamiento estimada para cada país (Perera et al., 2022).	26
Figura 15. Ubicación general de las presas de estudio.	29
Figura 16. Topografía de la zona de estudio	31
Figura 17. Clima de la zona de estudio, según la clasificación de Koppen.	33
Figura 18. Uso de suelo y vegetación en la zona de estudio.	35
Figura 19. Edafología en la zona de estudio.	36
Figura 20. Precipitación media anual en la zona de estudio.	37
Figura 21. Ubicación de estaciones hidrométricas en la zona de estudio.	38
Figura 22. VSMA calculado (con métodos empíricos) y medido.	50
Figura 23. Volumen sedimentado calculado (con métodos empíricos) y medido.	50
Figura 24. Pérdida de capacidad de almacenamiento respecto al NAME, estimada para el año 2024.	51
Figura 25. Pérdida de capacidad de almacenamiento respecto al NAMO, estimada para el año 2024.	52
Figura 26. Pérdida de capacidad de volumen de azolves de diseño, estimada para el año 2024.	52
Figura 27. Relación entre el volumen de sedimento atrapado medido y calculado.	55
Figura 28. Error de los métodos empleados.	56
Figura 29. Mejor ajuste considerando una variable independiente.	57
Figura 30. Mejor ajuste considerando una variable y áreas menores a 100 km ² .	58
Figura 31. Mejor ajuste considerando una variable y áreas menores a 100 km ² .	59
Figura 32. Mejor ajuste considerando una variable y áreas mayores a 100 km ² .	59

Figura 33. Relación de volumen de sedimentos-área entre métodos empíricos y datos medidos por Campos-Aranda (2012) (a), Acosta (2021) (b), CONAGUA & SEMARNAT (2012) (c) y CONAGUA & IMTA (s/f) (d).	62
Figura 34. Relación de volumen de sedimentos-pendiente media entre métodos empíricos y datos medidos por Campos-Aranda (2012) (a), Acosta (2021) (b), CONAGUA & SEMARNAT (2012) (c) y CONAGUA & IMTA (s/f) (d).	63
Figura 35. Relación de volumen de sedimentos-precipitación media anual entre métodos empíricos y datos medidos por Campos-Aranda (2012) (a), Acosta (2021) (b), CONAGUA & SEMARNAT (2012) (c) y CONAGUA & IMTA (s/f) (d).	64
Figura 36. Relación entre volumen de sedimento-capacidad de almacenamiento al NAMO utilizando métodos empíricos y datos medidos por Campos-Aranda (2012) (a), Acosta (2021) (b), CONAGUA & SEMARNAT (2012) (c) y CONAGUA & IMTA (s/f) (d).....	65
Figura 37. Ubicación de embalses y cuencas de aportación: Zona 1.	77
Figura 38. Ubicación de embalses y cuencas de aportación: Zona 2.	78
Figura 39. Ubicación de embalses y cuencas de aportación: Zona 3.	79
Figura 40. Ubicación de embalses y cuencas de aportación: Zona 4.	80
Figura 41. Ubicación de embalses y cuencas de aportación: Zona 5.	81
Figura 42. Ubicación de embalses y cuencas de aportación: Zona 6.	82
Figura 43. Ubicación de embalses y cuencas de aportación: Zona 7.	83
Figura 44. Curvas capacidad-elevación de la presa Federalismo Mexicano.	84
Figura 45. Curvas capacidad-elevación de la presa Miguel Hidalgo y Costilla.	84
Figura 46. Curvas capacidad-elevación de la presa El Cazadero.	84
Figura 47. Curvas capacidad-elevación de la presa Rodríguez.	84
Figura 48. Curvas capacidad-elevación de la presa El Carrizo.	85
Figura 49. Curvas capacidad-elevación de la presa Francisco I. Madero.	85
Figura 50. Curvas capacidad-elevación de la presa Pico del Águila.	85
Figura 51. Curvas capacidad-elevación de la presa Francisco Zarco.	85
Figura 52. Curvas capacidad-elevación de la presa Peña de Águila.	86
Figura 53. Curvas capacidad-elevación de la presa Requena.	86
Figura 54. Curvas capacidad-elevación de la presa Agostitlán.	86
Figura 55. Curvas capacidad-elevación de la presa El Cueramal.	86
Figura 56. Curvas capacidad-elevación de la presa José López Portillo.	87
Figura 57. Curvas capacidad-elevación de la presa Luis Donald Colosio.	87

Índice de tablas

Tabla 1. Ecuaciones de erosividad en función de la lluvia media anual (Loredo et al., 2007).	16
Tabla 2. Factor K de acuerdo a la clasificación edafológica (Loredo et al., 2007).....	17
Tabla 3. Valor del parámetro m de acuerdo al grado de pendiente (Loredo et al., 2007)....	17
Tabla 4. Factor C de acuerdo a la clasificación de uso de suelo (Montes-León et al., 2011).	18
Tabla 5. Valor de P de acuerdo al tipo de prácticas mecánicas (Loredo et al., 2007).....	18
Tabla 6. Valores para el cálculo del coeficiente CES (Gracia, 1997a).	19
Tabla 7. Valores del coeficiente B para el cálculo de la consolidación (Lane & Koelzer, 1943).....	23
Tabla 8. Tipo de operación del embalse (Strand & Pemberton, 1987)	23
Tabla 9. Densidad del sedimento en función de la operación de mismos (Strand & Pemberton, 1987).....	24
Tabla 10. Distribución estatal de presas de estudio.....	27
Tabla 11. Ubicación geográfica de las presas de estudio. Obtenida de Campos-Aranda (2012) (1), Acosta (2021) (2), CONAGUA & SEMARNAT (2012) (3), CONAGUA & IMTA (s/f) (4) y Moreno (2014)(5).....	28
Tabla 12. Presas en cada zona de estudio.....	30
Tabla 13. Rango de elevaciones de la zona de estudio.....	31
Tabla 14. Clasificación climática en las zonas de estudio.....	33
Tabla 15. Principales tipos de suelo en la zona de estudio.....	36
Tabla 16. Precipitación media anual.....	37
Tabla 17. Estaciones hidrométricas en la zona de estudio.	38
Tabla 18. Volumen de sedimentos medio anual medido (Acosta, 2021).	39
Tabla 19. Volumen de sedimentos atrapado medio anual medido (Campos-Aranda, (2012).	39
Tabla 20. Pérdida de capacidad a partir de CONAGUA & SEMARNAT (2012).	40
Tabla 21. Volumen de sedimento medio anual estimado con las estaciones hidrométricas (CONAGUA & IMTA, s/f).	41
Tabla 22. Características fisiográficas de las cuencas de estudio.....	42
Tabla 23. Presas de la zona de estudio con presas aguas arriba también en estudio.....	43
Tabla 24. Presas de la zona de estudio con presas aguas arriba que no se encuentran en estudio.....	43
Tabla 25. Pérdida de suelo y aporte de sedimento utilizando el método USLE.....	45
Tabla 26. Aporte de sedimentos calculado con el método Namba.....	46
Tabla 27. Aporte de sedimentos calculado con el método Owen y Branson.	47
Tabla 28. Aporte de sedimentos calculado con el método USBR.....	48
Tabla 29. Aporte de sedimentos calculado con el método de Gracia.....	49
Tabla 30. Aporte de sedimentos calculado con el método de Gracia.....	55
Tabla 31. Aporte de sedimentos calculado con el método de Gracia.....	56
Tabla 32. Mejor ajuste de acuerdo a distintos rangos de área.	60
Tabla 33. Mejor ecuación de ajuste de acuerdo al área de la cuenca.	61

Tabla 34. Presas en la zona 1.....	77
Tabla 35. Presas en la zona 2.....	78
Tabla 36. Presas en la zona 3.....	79
Tabla 37. Presas en la zona 4.....	80
Tabla 38. Presas en la zona 5.....	81
Tabla 39. Presas en la zona 6.....	82
Tabla 40. Presas en la zona 7.....	83

Anexos

ANEXO A. Ubicación de embalses y cuencas de aportación

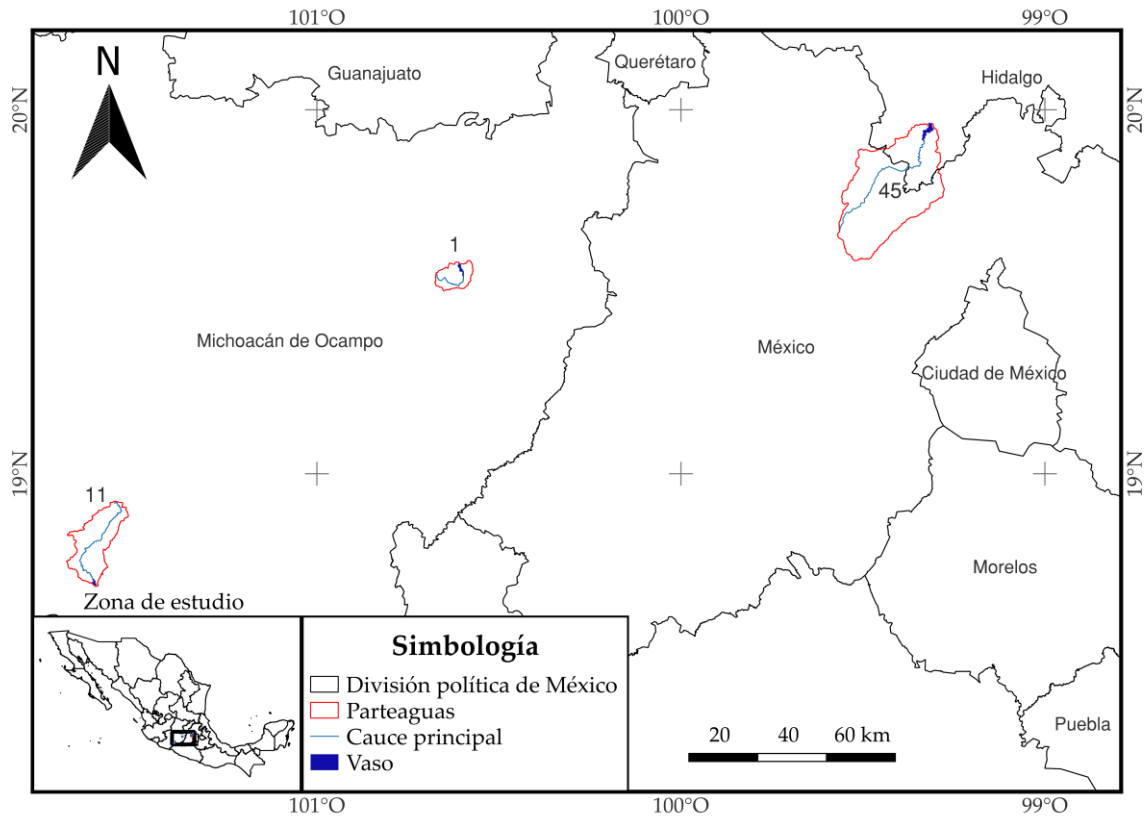


Figura 37. Ubicación de embalses y cuencas de aportación: Zona 1.

Tabla 34. Presas en la zona 1.

Número	Nombre común	Nombre oficial
1	Mata de Pinos	Agostitlán
11	El Cueramal	El Cueramal
45	Requena	Requena

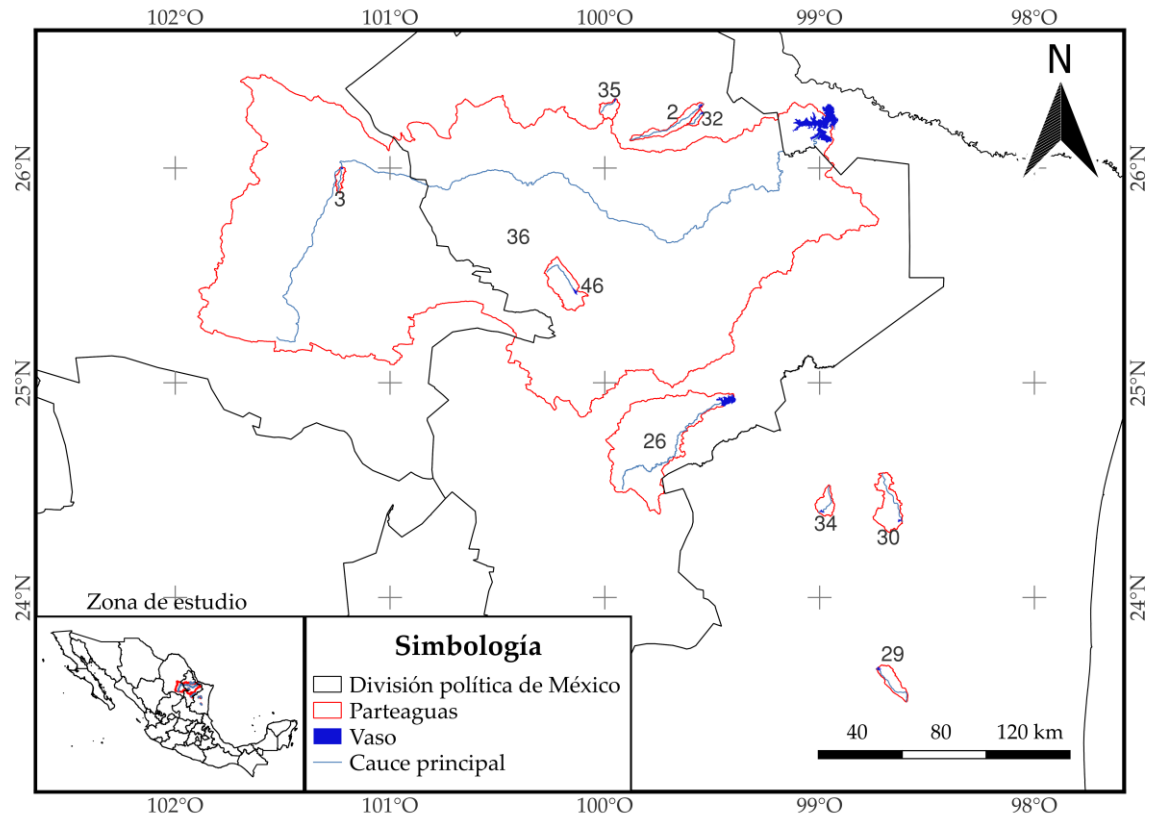


Figura 38. Ubicación de embalses y cuencas de aportación: Zona 2.

Tabla 35. Presas en la zona 2.

Número	Nombre común	Nombre oficial
2	Agualeguas	Agualeguas
3	Alto De Norias	Alto de Norias
26	Cerro Prieto	José López Portillo
29	La Lajilla	La Lajilla
30	La Loba	La Loba
32	Loma Larga	Loma Larga
34	El Chamal	María Soto la Marina
35	Sombreretillo	Mariano Escobedo
36	El Azúcar	Marte R. Gómez
46	La Boca	Rodrigo Gómez

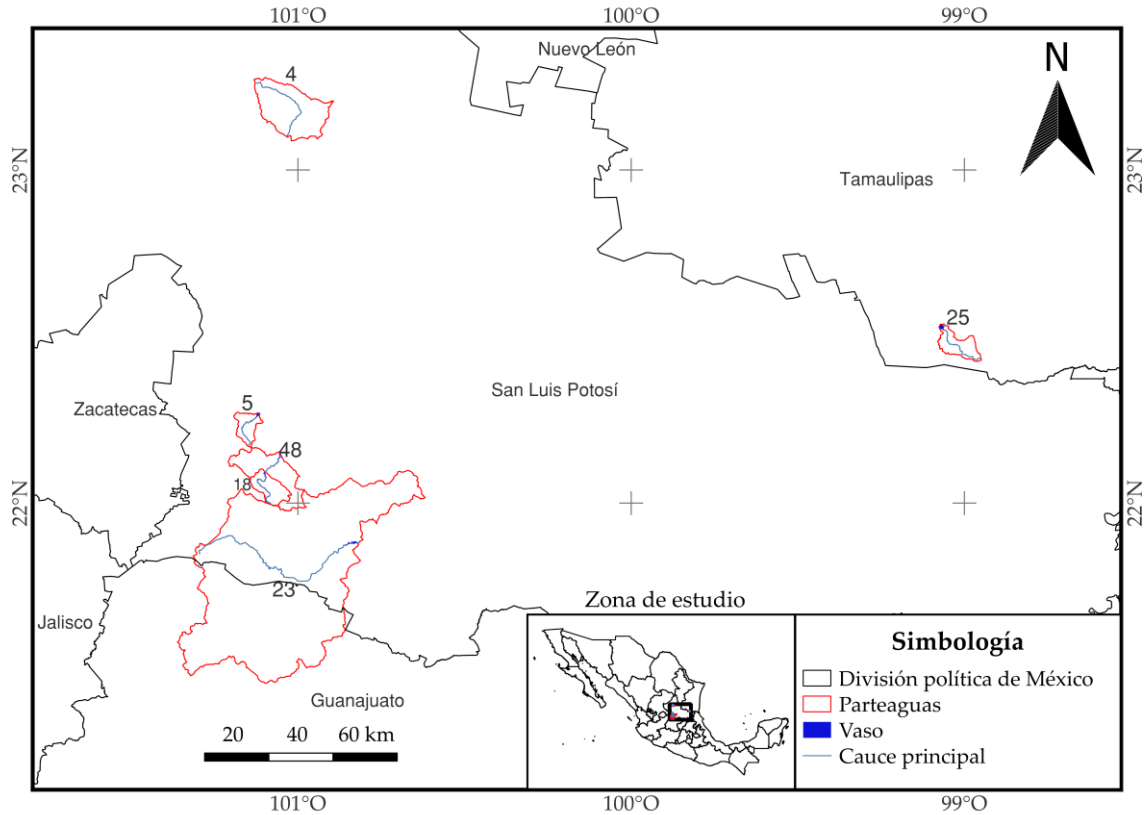


Figura 39. Ubicación de embalses y cuencas de aportación: Zona 3.

Tabla 36. Presas en la zona 3.

Número	Nombre común	Nombre oficial
4	Álvaro Obregón	Álvaro Obregón
5	Mexquitic	Álvaro Obregón
18	El Peaje	Gonzalo N. Santos
23	Ojo Caliente	Ing. Valentín Gama
25	El Oyul	José Bernardo Gutiérrez de Lara
48	San José	San José

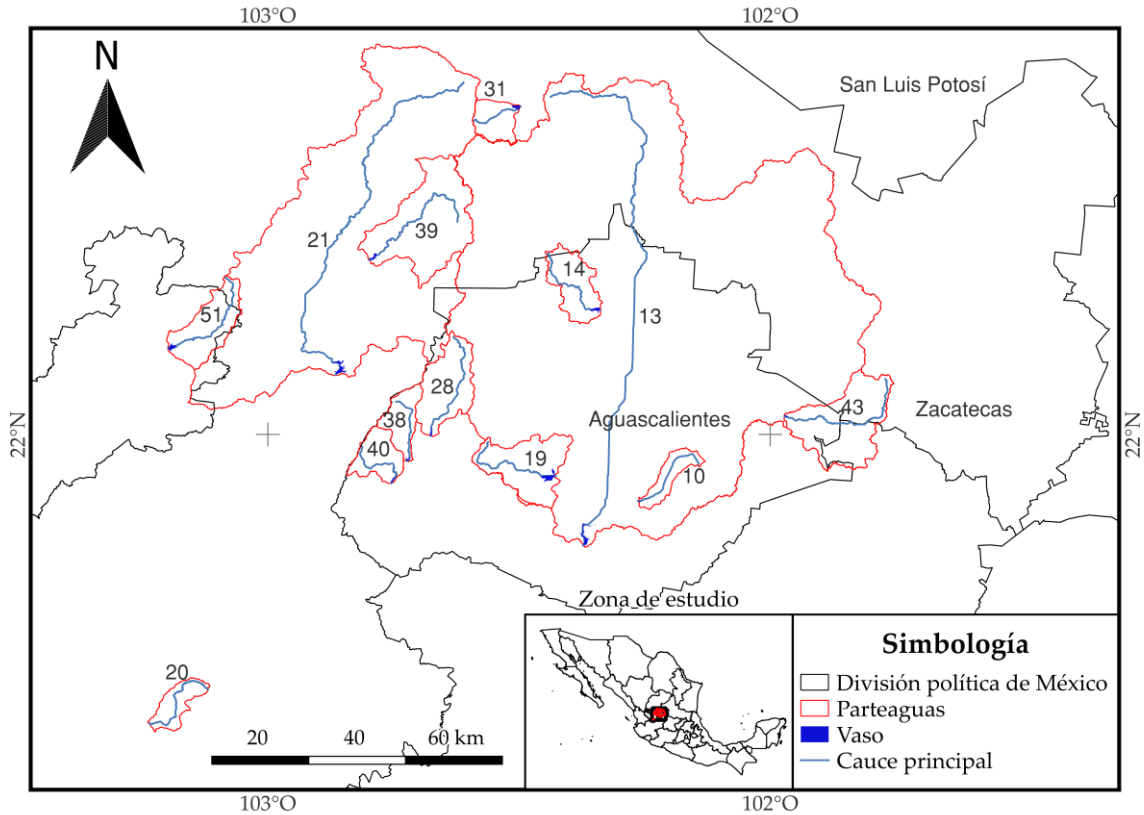


Figura 40. Ubicación de embalses y cuencas de aportación: Zona 4.

Tabla 37. Presas en la zona 4.

Número	Nombre común	Nombre oficial
10	El Cedazo	El Cedazo
13	El Niagara	El Niagara
14	El Saucillo	El Saucillo
19	El Rosario	Gral. Abelardo Rodríguez
20	Chihuahua	Ing. Adolfo Orive De Alba
21	Tayahua	Ing. Julián Adame Alatorre
28	La Codorniz	La Codorniz
31	Santos Bañuelos	Laguna Bañuelos
38	Ordeña Vieja	Ordeña Vieja
39	Palomas	Palomas
40	Peña Blanca	Peña Blanca
43	El Taray	Pilotos
51	Boquilla De Zaragoza	Tenasco

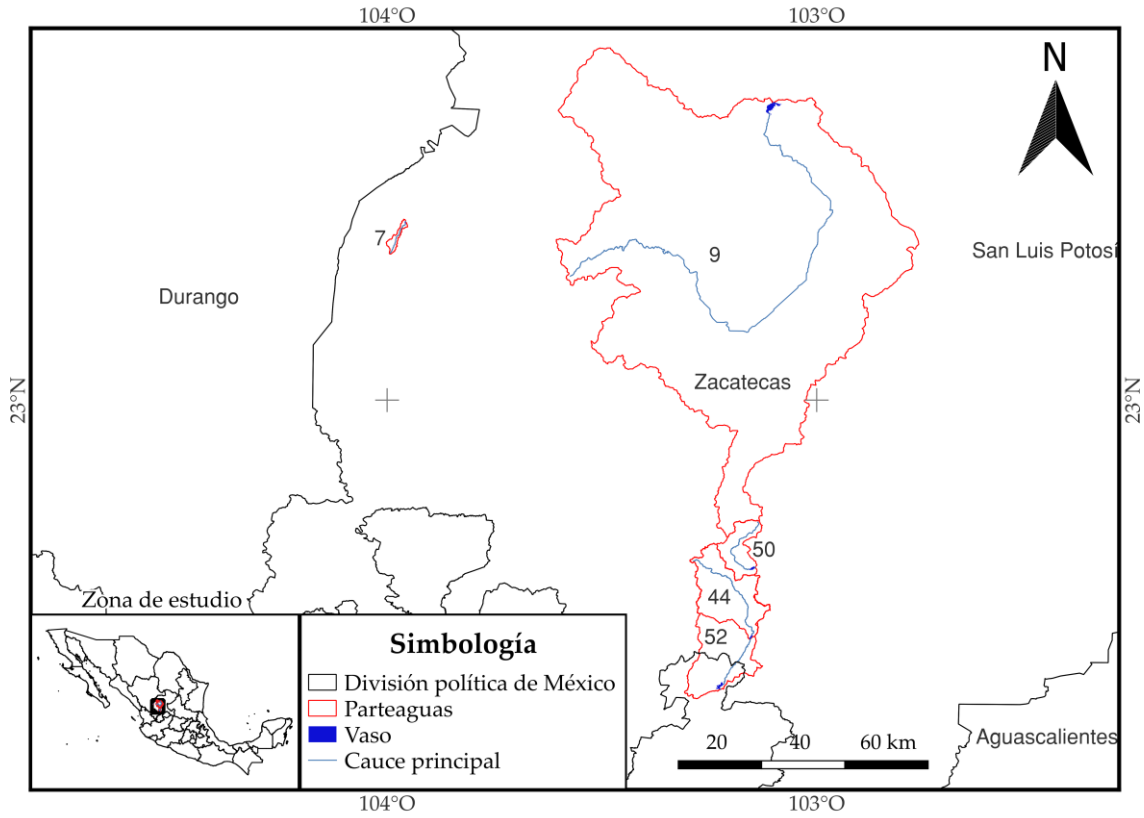


Figura 41. Ubicación de embalses y cuencas de aportación: Zona 5.

Tabla 38. Presas en la zona 5.

Número	Nombre común	Nombre oficial
7	Las Marinas	Dolores
9	El Cazadero	El Cazadero
44	Víboras	Presa Grande
50	Susticacán	Susticacán
52	Achimec II	Vaqueros

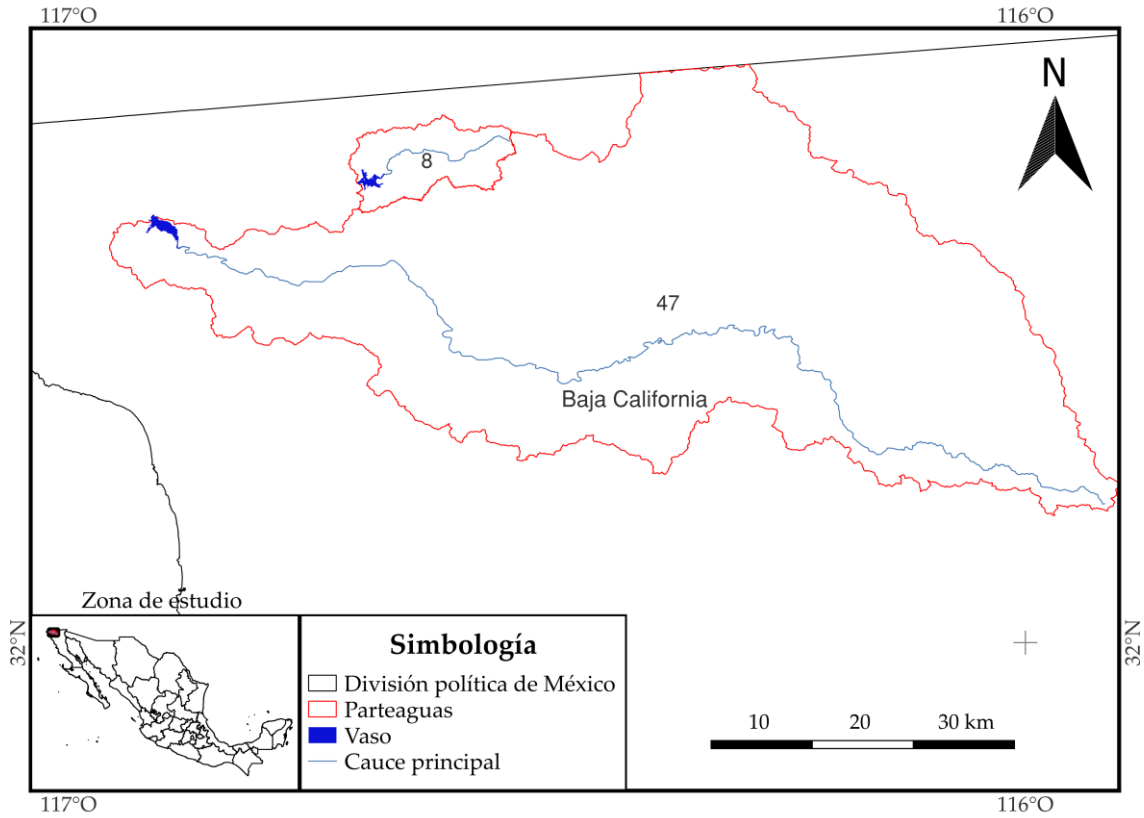


Figura 42. Ubicación de embalses y cuencas de aportación: Zona 6.

Tabla 39. Presas en la zona 6.

Número	Nombre común	Nombre oficial
8	El Carrizo	El Carrizo
47	Tijuana O. Abelardo L. Rodríguez	Rodríguez

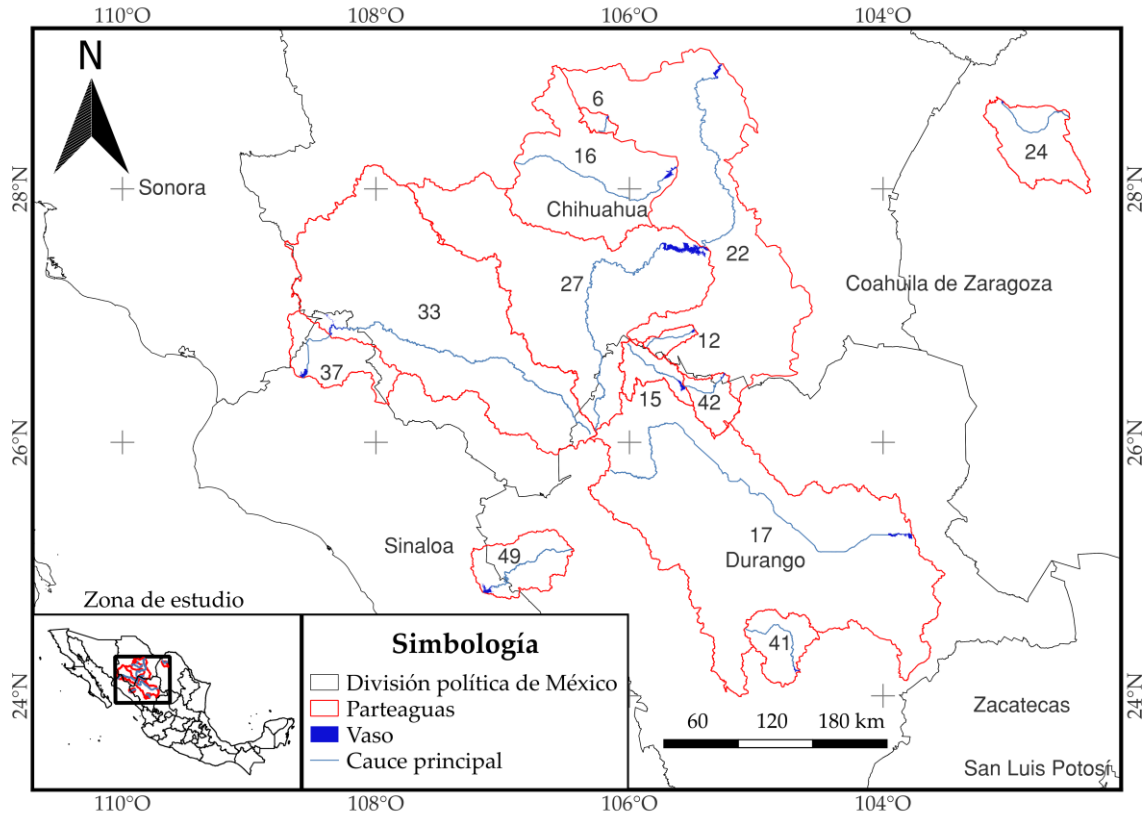


Figura 43. Ubicación de embalses y cuencas de aportación: Zona 7.

Tabla 40. Presas en la zona 7.

Número	Nombre común	Nombre oficial
6	Chihuahua	Chihuahua
12	Talamantes	El Durazno
15	San Gabriel	Federalismo Mexicano
16	Las Vírgenes	Francisco I. Madero
17	Las Tórtolas	Francisco Zarco
22	El Granero	Ing. Luis L. León
24	Piedritas	Integración Latinoamericana
27	Lago Toronto	La Boquilla
33	Huites	Luis Donaldo Colosio
37	El Mahone	Miguel Hidalgo y Costilla
41	Peña del Águila	Peña del Águila
42	Pico del Águila	Pico del Águila
49	Sanalona	Sanalona

ANEXO B. Curvas capacidad-elevación

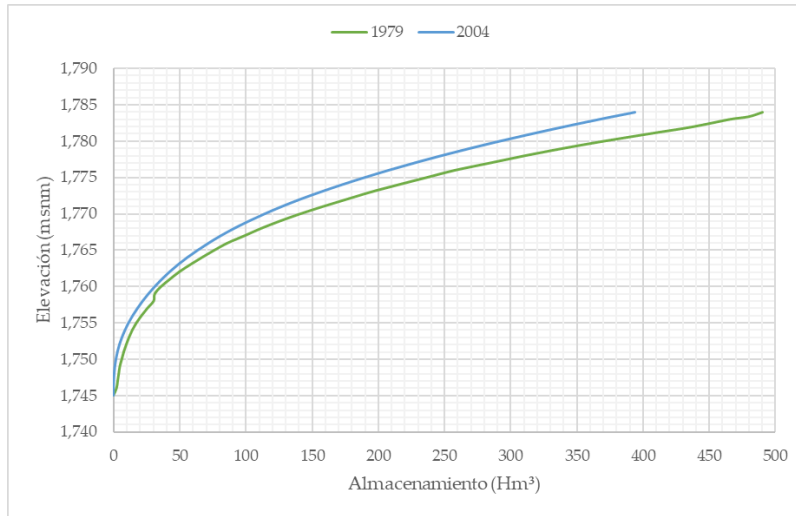


Figura 44. Curvas capacidad-elevación de la presa Federalismo Mexicano.

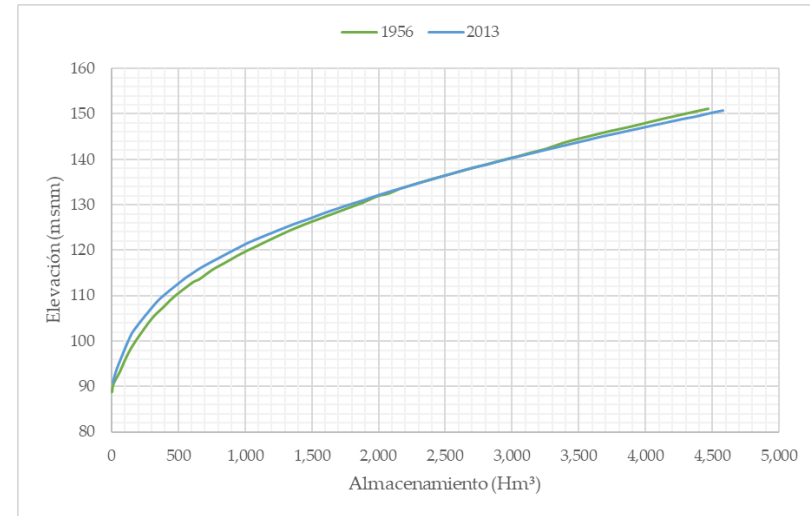


Figura 45. Curvas capacidad-elevación de la presa Miguel Hidalgo y Costilla.

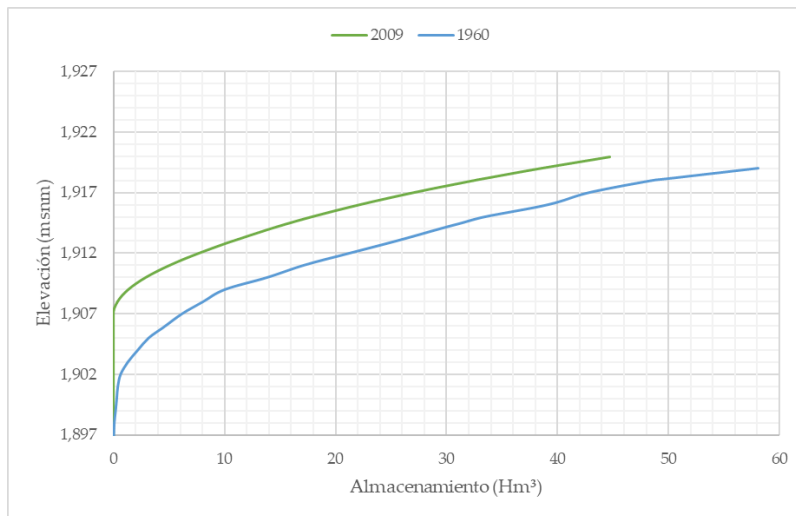


Figura 46. Curvas capacidad-elevación de la presa El Cazadero.

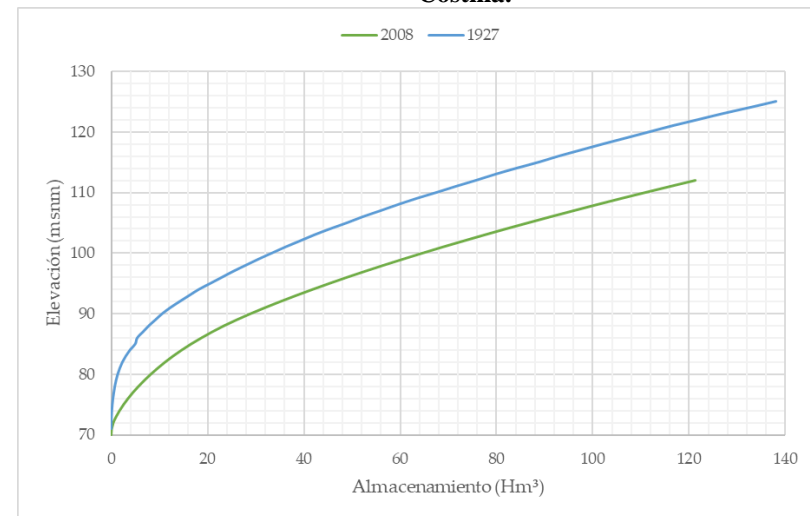


Figura 47. Curvas capacidad-elevación de la presa Rodríguez.

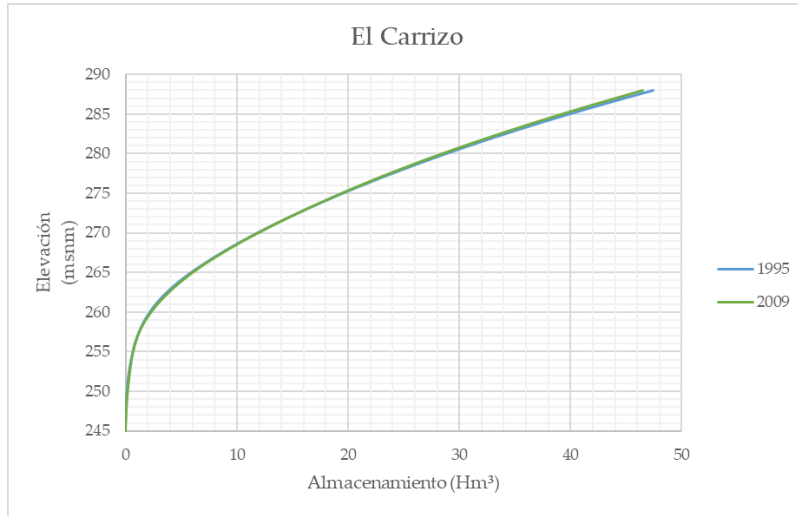


Figura 48. Curvas capacidad-elevación de la presa El Carrizo.

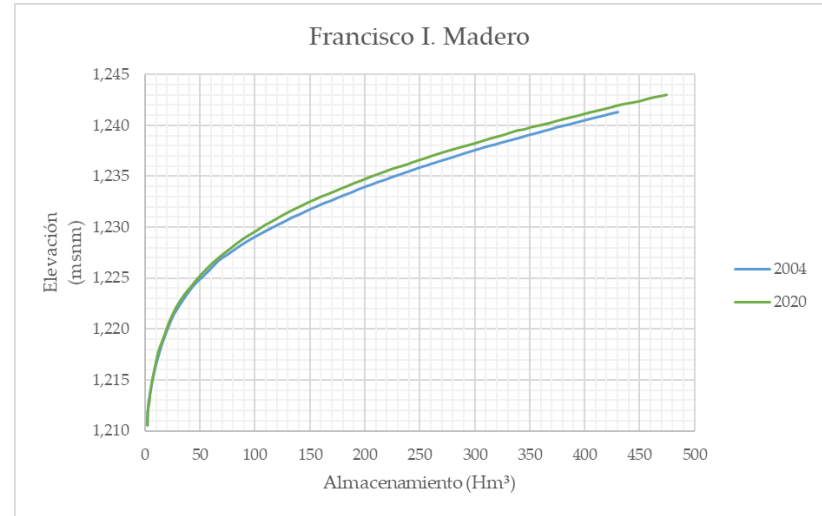


Figura 49. Curvas capacidad-elevación de la presa Francisco I. Madero.

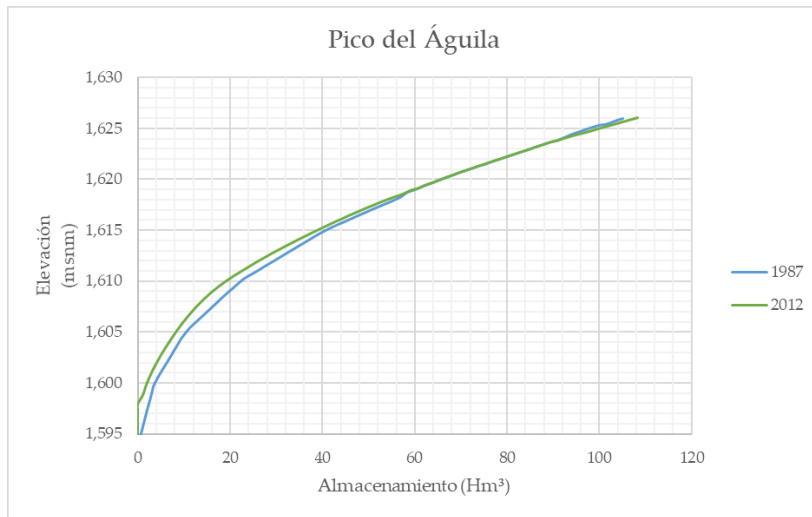


Figura 50. Curvas capacidad-elevación de la presa Pico del Águila.

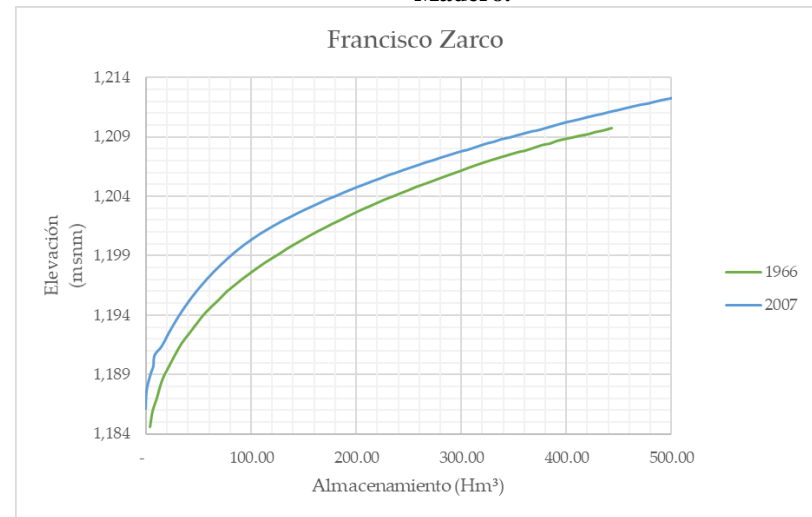


Figura 51. Curvas capacidad-elevación de la presa Francisco Zarco

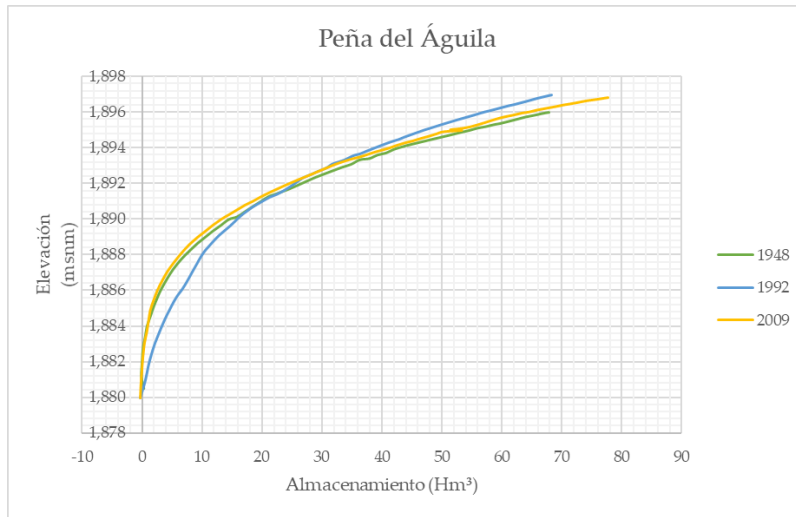


Figura 52. Curvas capacidad-elevación de la presa Peña de Águila.

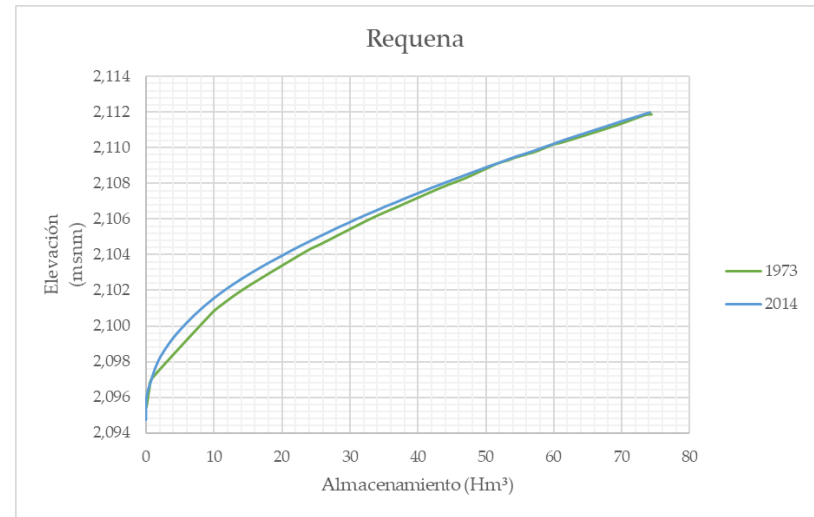


Figura 53. Curvas capacidad-elevación de la presa Requena.

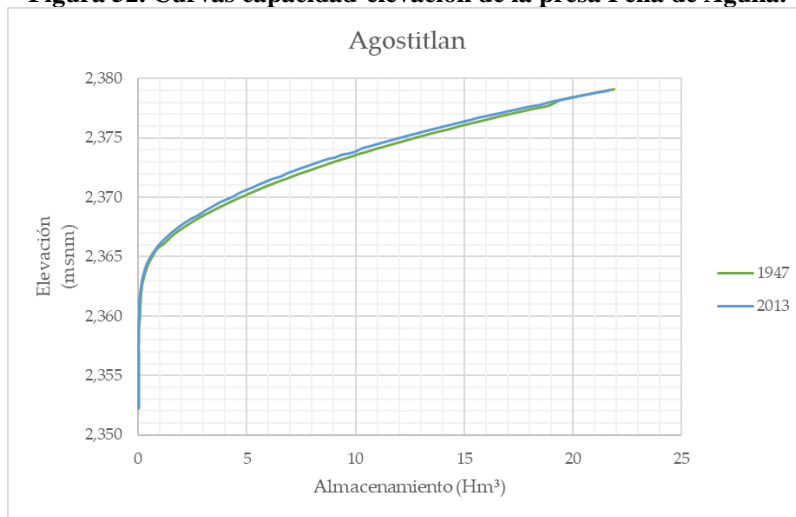


Figura 54. Curvas capacidad-elevación de la presa Agostitlán.

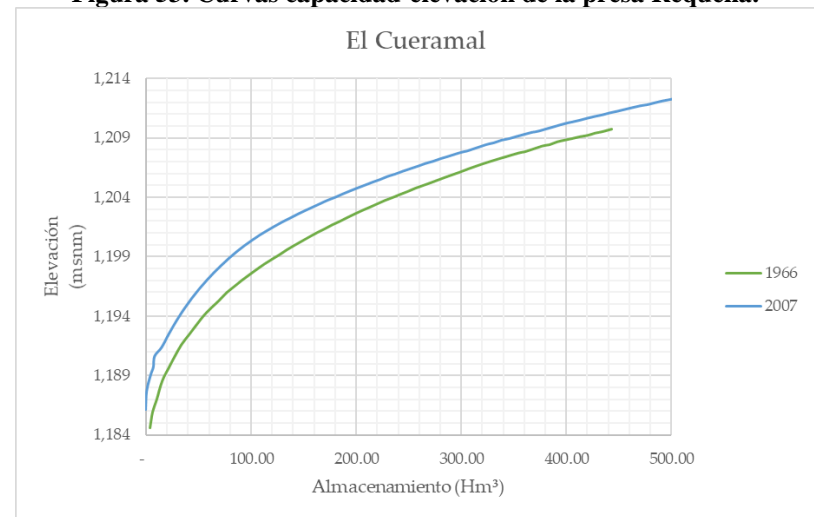


Figura 55. Curvas capacidad-elevación de la presa El Cueramal.

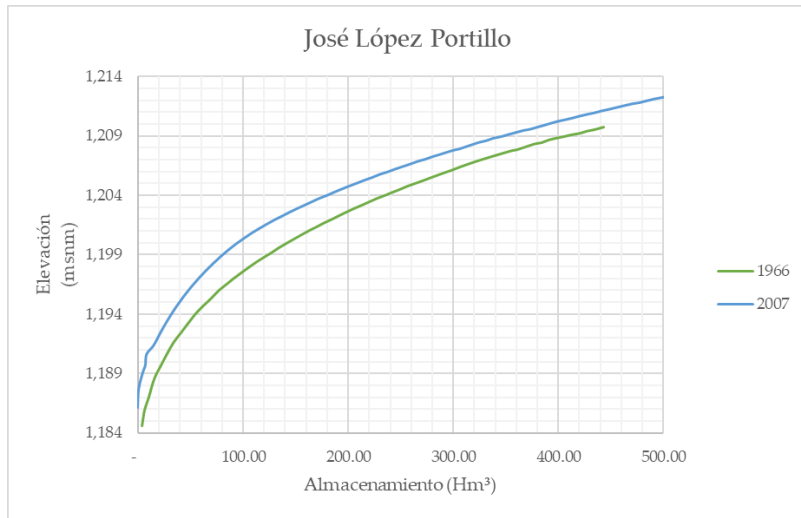


Figura 56. Curvas capacidad-elevación de la presa José López Portillo.

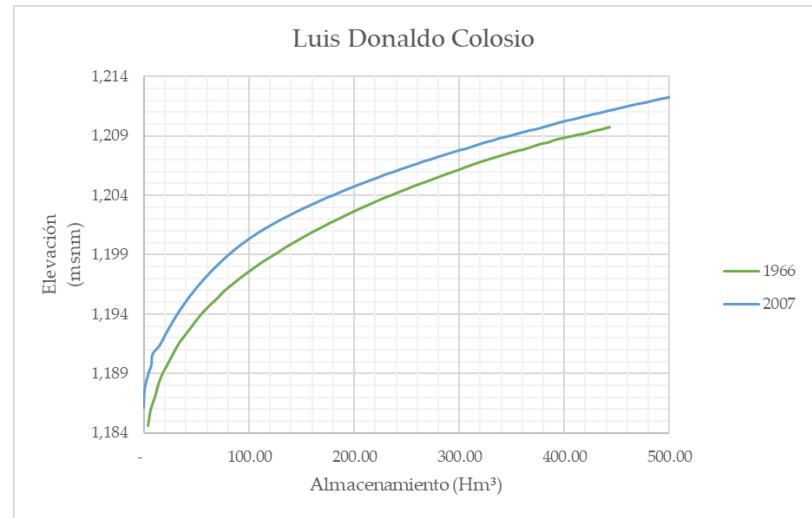


Figura 57. Curvas capacidad-elevación de la presa Luis Donaldo Colosio.