

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**EVALUACIÓN DE LA ACUMULACIÓN DE AZOLVES EN
EMBALSES UBICADOS EN LA RH-24, BRAVO-CONCHOS**

POR:

ING. YAZMIN AZALEA ACOSTA RODRÍGUEZ

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA**

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

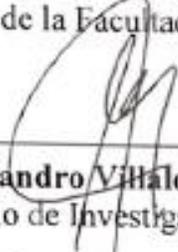
FEBRERO DE 2021



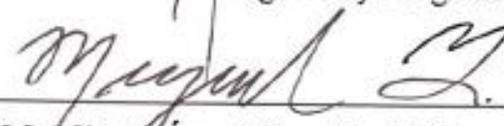
Evaluación de la acumulación de azolves en embalses ubicados en la RH-24, Bravo-Conchos. Tesis presentada por Yazmin Azalea Acosta Rodríguez como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ingeniería en Hidrología, ha sido aprobado y aceptado por:



M.I. Javier González Cantu
Director de la Facultad de Ingeniería



Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado



M.I. Miguel Ángel González Núñez
Coordinador(a) Académico



Dr. Humberto Silva Hidalgo
Director(a) de Tesis

Febrero 2021

Fecha

Comité:

Dr. Humberto Silva Hidalgo
Dra. Guadalupe Irma Graciela Estrada Gutiérrez
M.I. Linda Carolina Ortega Robles
Dr. Adán Pinales Munguía

© Derechos Reservados
**Yazmin Azalea Acosta
Rodríguez**
Circuito Número I S/N Nuevo
Campus Universitario II, C.P.
31125
Chihuahua, Chih. México

Febrero 2021



ING. YAZMÍN AZALEA ACOSTA RODRÍGUEZ

Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de maestría en ingeniería en hidrología, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta dirección, propuesto y dirigido por el director la Dr. Humberto Silva Hidalgo para que lo desarrolle como tesis con el título "Evaluación de la acumulación de azolves en embalses ubicados en la RH-24, Bravo-Conchos."

ÍNDICE DE CONTENIDO

Agradecimientos

Resumen

Capítulo 1: Introducción

- 1.1. JUSTIFICACIÓN
- 1.2. HIPÓTESIS
- 1.3. ALCANCES Y OBJETIVOS
- 1.4. METODOLOGÍA

Capítulo 2: Marco teórico

- 2.1. CONCEPTO DE SEDIMENTACIÓN
- 2.2. CAUSAS QUE ORIGINAN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS
- 2.3. MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE SEDIMENTOS QUE SE DEPOSITAN EN UN EMBALSE
- 2.4. MÉTODOS PARA EVITAR LA ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS
- 2.5. TIPOS DE CUENCAS

Capítulo 3: Descripción del medio físico

- 3.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA
- 3.2. CLIMA
- 3.3. HIDROGRAFÍA
- 3.4. FISIOGRAFÍA
- 3.5. USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL
- 3.6. EDAFOLOGÍA
- 3.7. PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS BÁSICOS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Capítulo 4: Análisis de la acumulación de sedimentos en embalses de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos

- 4.1. PROCEDIMIENTO PARA ESTIMACIÓN DE ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN VASOS DE ALMACENAMIENTO MEDIANTE COMPARACIÓN DE CURVAS ÁREA ELEVACIÓN VOLUMEN
- 4.2. MÉTODOS EMPÍRICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE APOORTE DE SEDIMENTOS
- 4.3. EVOLUCIÓN DEL USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL EN LAS CUENCAS DE EMBALSES DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA 24 BRAVO-CONCHOS

Capítulo 5: Presentación y discusión de resultados

- 5.1. ANÁLISIS DE LA ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN VASOS DE ALMACENAMIENTO A PARTIR DE REGISTROS DE BATIMETRÍA
- 5.2. ANÁLISIS DE LA ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN VASOS DE ALMACENAMIENTO A PARTIR DE MÉTODOS EMPÍRICOS
- 5.3. COMPARACIÓN DE LA ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS ESTIMADOS A PARTIR DE REGISTROS DE BATIMETRÍA Y MÉTODOS EMPÍRICOS

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

- 6.1. CONCLUSIONES
- 6.2. RECOMENDACIONES

Referencias

Anexo Electrónico

Curriculum Vitae

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

ATENTAMENTE
"naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx



Agradecimientos

Mi principal agradecimiento a mis padres y mi familia, por siempre apoyarme.

A Dios, porque depositar mi confianza en él me ha hecho concluir proyectos que a simple vista podrían parecer inalcanzables.

A Alejandro Arizmendi, por estar y permanecer, por el apoyo brindado durante este proceso.

Infinitas gracias al Dr. Humberto Silva Hidalgo, porque gracias a esa clase de obras hidráulicas en licenciatura, forjé metas y objetivos, decidí caminar más allá cursando esta maestría y encontré el tema que más me apasiona en la vida, el agua. Le agradezco sus valiosas enseñanzas, el compartirme conocimiento invaluable y la atención que siempre mostró ante el proceso de la elaboración de este trabajo.

Le agradezco a los miembros del comité revisor, la Dra. Guadalupe Estrada Gutiérrez, M.I. Linda Carolina Ortega Robles y Dr. Adán Pinales Munguía por tomarse el tiempo de participar en el desarrollo del presente trabajo, por siempre estar atentos a mis dudas.

Gracias al M.I. Miguel Ángel González Núñez por el apoyo y la atención en todo momento al atravesar el proceso de titulación.

Si hay magia en este planeta, está contenida en el agua

-Loren Eiseley



Resumen

Los embalses representan un aspecto fundamental para la gestión de los recursos hídricos ya que permiten realizar su distribución espacial de acuerdo a las necesidades de consumo. Se estima que alrededor de un 0.5-1% de la capacidad de almacenamiento global se pierde cada año a causa de la sedimentación, situación que significa que, en los próximos 25 años, se podría perder el 25% de la capacidad total de almacenamiento de agua dulce debido a la falta de medidas de control de sedimentos (Comisión Mundial De Represas, 2000).

Se puede definir a la pérdida de capacidad útil a causa de la sedimentación como uno de los retos más grandes para el manejo sustentable de los embalses, por lo que el evaluar las tasas de aporte de sedimentos es una herramienta fundamental para la gestión de los recursos hídricos en zonas áridas y semi áridas, donde este fenómeno tiene mayor impacto.

Las tasas de aporte de sedimentos son variables a nivel global y a nivel regional debido a que dependen de factores como el clima, la edafología, la topografía, el uso de suelo y la cobertura vegetal, la erosión natural y la ocasionada por efectos antropogénicos, entre otros. Sus valores dependen también de sí una presa cuenta con otros embalses aguas arriba que detengan una parte de los sedimentos, por lo que identificar si la cuenca de un embalse es de cabecera, intermedia o de emisión permitirá determinar patrones de comportamiento para cada uno de estos grupos.

Es posible conocer las tasas de aporte de sedimentos a partir de información batimétrica disponible. De igual forma, es posible estimarlas a partir de la aplicación de métodos empíricos como la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos, el método de valores promedio de sedimentos para cuencas de diferentes tamaños (Mediciones de E.U.A.), el método del Buró de Reclamación de Suelos de Estados Unidos (USBR), el método de Namba y el método de Owen y Branson.

La Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos, se localiza en las zonas áridas del norte de México, y en ella se encuentran una serie de embalses que represan parte de los escurrimientos superficiales generados en las cuencas de los afluentes principales y permiten un aprovechamiento anual de 5,306.62 hm³ divididos en uso agrícola, público urbano, pecuario, industrial y otros usos, de igual forma, permiten el cumplimiento del Tratado de 1944 entre México y los Estados Unidos de América en materia de agua.



La tasa de aporte de sedimentos promedio para cuencas de cabecera en la RH 24 es de 211.97 $\text{m}^3/\text{km}^2\text{-año}$, misma que resulta ser por lo menos dos veces mayor que la tasa de aporte de sedimentos definida en la literatura para esta zona, la cual es de 50 a 100 $\text{m}^3/\text{km}^2\text{-año}$. En cuencas intermedias, se tiene un valor de esta tasa promedio de 35.69 $\text{m}^3/\text{km}^2\text{-año}$, lo cual expresa que el contar con embalses aguas arriba permite que la mayoría de los sedimentos generados en el sistema hidrológico se depositen en las presas que se localizan en las cabeceras.

La degradación de la vegetación y los cambios de uso de suelo en la zona de estudio son factores que impactaron directamente en el aumento de las tasas de aporte de sedimentos, lo que reafirma que una de las mejores maneras de evitar la sedimentación son prácticas adecuadas de control de suelos, así como la mitigación de la deforestación.

Los métodos empíricos no pueden ser aplicados en cuencas intermedias o de emisión ya que ninguno de estos considera la existencia de estructuras aguas arriba, otorgando resultados altamente distintos de la producción de sedimentos real para estos grupos de cuencas en la zona de estudio.

En cuencas de cabecera, se puede observar una discrepancia en los resultados en la mayoría de los métodos, resaltando que, a pesar de considerar variables climáticas, de uso de suelo y cobertura vegetal, edafológicas y topográficas, al no encontrarse calibrados para zonas áridas o semi áridas, los resultados difieren de la producción de sedimentos real para las cuencas analizadas.

Una vez dimensionada la problemática que tienen los embalses a causa de la sedimentación en la RH 24, resulta necesario el implementar acciones de manejo de cuencas, que propicien la reforestación, la construcción de estructuras de control de sedimentos y la generación de políticas públicas para llevar a cabo la regulación de sedimentos, considerándolas como un aspecto fundamental dentro de la gestión de los recursos hídricos.



Índice de Contenido

Agradecimientos.....	iii
Resumen	iv
Índice de Contenido.....	1
Índice de Tablas.....	4
Índice de Figuras	7
Índice de Gráficas.....	9
Capítulo 1: Introducción.....	10
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	12
1.2. HIPÓTESIS.....	15
1.3. ALCANCES Y OBJETIVOS	15
1.3.1. Objetivo general.....	15
1.3.2. Objetivos particulares	15
1.4. METODOLOGÍA	16
Capítulo 2: Marco teórico.....	20
2.1. CONCEPTO DE SEDIMENTACIÓN	20
2.2. CAUSAS QUE ORIGINAN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS	24
2.3. MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE SEDIMENTOS QUE SE DEPOSITAN EN UN EMBALSE	25
2.4. MÉTODOS PARA EVITAR LA ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS	27
2.5. TIPOS DE CUENCAS	29
Capítulo 3: Descripción del medio físico	31
3.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	31
3.2. CLIMA	32
3.3. HIDROGRAFÍA.....	37
3.4. FISIOGRAFÍA	39
3.5. USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL.....	41
3.6. EDAFOLOGÍA	46
3.7. PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS BÁSICOS	50



Capítulo 4: Análisis de la acumulación de sedimentos en embalses de la Región

Hidrológica 24 Bravo-Conchos 55

4.1. PROCEDIMIENTO PARA ESTIMACIÓN DE ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN VASOS DE ALMACENAMIENTO MEDIANTE COMPARACIÓN DE CURVAS ÁREA ELEVACIÓN VOLUMEN 60

4.1.1. Análisis en cuencas de cabecera 62

4.1.1.1. Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel) 62

4.1.1.2. Presa La Boquilla (Lago Toronto) 64

4.1.1.3. Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes) 65

4.1.1.4. Presa Chihuahua 66

4.1.1.5. Presa Rodrigo Gómez (La Boca) 67

4.1.2. Análisis en cuencas intermedias y de emisión 68

4.1.2.1. Presa Pico del Águila 68

4.1.2.2. Presa Luis L. León (El Granero) 69

4.1.2.3. Presa Internacional La Amistad 70

4.1.2.4. Presa Marte R. Gómez 71

4.2. MÉTODOS EMPÍRICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE APOORTE DE SEDIMENTOS 72

4.2.1. Valores promedio de aporte de sedimentos para cuencas de diferentes tamaños (Mediciones de E.U.A.) 72

4.2.1.1. Análisis en cuencas de cabecera 73

4.2.1.2. Análisis en cuencas intermedias y de emisión 73

4.2.2. Método del USBR (United States Bureau of Reclamation) 74

4.2.2.1. Análisis en cuencas de cabecera 74

4.2.2.2. Análisis en cuencas intermedias y de emisión 74

4.2.3. Método de Namba 75

4.2.3.1. Análisis en cuencas de cabecera 75

4.2.3.2. Análisis en cuencas intermedias y de emisión 77

4.2.4. Método de Owen y Branson 78

4.2.4.1. Análisis en cuencas de cabecera 79

4.2.4.2. Análisis en cuencas intermedias y de emisión 80

4.2.5. Fórmula Universal de Pérdida de Suelos (Universal Soil Loss Equation USLE) 81

4.2.5.1. Análisis en cuencas de cabecera 88

4.2.5.2. Análisis en cuencas intermedias y de emisión 99

4.3. EVOLUCIÓN DEL USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL EN LAS CUENCAS DE EMBALSES DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA 24 BRAVO-CONCHOS 105



Capítulo 5: Presentación y discusión de resultados.....	124
5.1. ANÁLISIS DE LA ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN VASOS DE ALMACENAMIENTO A PARTIR DE REGISTROS DE BATIMETRÍA.....	125
5.1.1. Cuencas de cabecera.....	125
5.1.2. Cuencas intermedias y de emisión.....	133
5.2. ANÁLISIS DE LA ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN VASOS DE ALMACENAMIENTO A PARTIR DE MÉTODOS EMPÍRICOS	139
5.3. COMPARACIÓN DE LA ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS ESTIMADOS A PARTIR DE REGISTROS DE BATIMETRÍA Y MÉTODOS EMPÍRICOS.....	145
Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones	151
6.1. CONCLUSIONES	151
6.2. RECOMENDACIONES	158
Referencias	160
Anexo Electrónico	166
Currículum Vitae	167



Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Tasas de aporte de sedimentos analizadas a nivel mundial. Fuente: Elaboración propia a partir de (United States Department of Agriculture & National Resources Conservation Service, 1983).....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2. Tabla obtenida de Procesos del Ciclo Hidrológico (Campos Aranda, 1992)</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 3. Tipo de clima en la zona de estudio conforme a la clasificación de Köppen, modificada por García (García & CONABIO, 2001)</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 4. Comparación de curvas área elevación volumen de la presa Federalismo Mexicano (San Gabriel)</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 5. Estimación de acumulación de sedimentos en el vaso de almacenamiento de la presa Federalismo Mexicano (San Gabriel)</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 6. Estimación de acumulación de sedimentos en el vaso de almacenamiento de la presa La Boquilla (Lago Toronto)</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 7. Estimación de acumulación de sedimentos en el vaso de almacenamiento de la presa Francisco I. Madero (Las Virgenes)</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 8. Estimación de acumulación de sedimentos en el vaso de almacenamiento de la presa Chihuahua</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 9. Estimación de acumulación de sedimentos en el vaso de almacenamiento de la presa Rodrigo Gómez (La Boca)</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 10. Estimación de acumulación de sedimentos en el vaso de almacenamiento de la presa Pico del Águila</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 11. Estimación de acumulación de sedimentos en el vaso de almacenamiento de la presa Luis L. León (El Granero)</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 12. Estimación de acumulación de sedimentos en el vaso de almacenamiento de la presa Internacional La Amistad</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 13. Estimación de acumulación de sedimentos en el vaso de almacenamiento de la presa Marte R. Gómez (El Azúcar)</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 14. Aporte de sedimentos por tamaño de cuenca. Fuente: (Gottschalk, 1964)</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 15. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de valores promedio de aporte de sedimentos para cuencas de diferentes tamaños para cuencas de cabecera.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 16. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de valores promedio de aporte de sedimentos para cuencas de diferentes tamaños para cuencas intermedias y de emisión.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 17. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método del USBR para cuencas de cabecera.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 18. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método del USBR para cuencas intermedias y de emisión</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 19. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de Namba para cuencas de cabecera.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 20. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de Namba para cuencas intermedias y de emisión</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 21. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de Owen y Branson para cuencas de cabecera.....</i>	<i>79</i>



Tabla 22. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de Owen y Branson para cuencas intermedias y de emisión	80
Tabla 23. Ecuaciones de erosividad de la lluvia para las diferentes regiones hidrológico-administrativas de México. Fuente: (Cortés T., 1991).....	82
Tabla 24. Valores del Factor de Erosionabilidad (K) en función de la unidad de suelo y su textura superficial. Fuente: (FAO, 1980).....	84
Tabla 25. Valores que toma m en función del grado de pendiente. Fuente: (Wischmeier & Smith, 1978).....	85
Tabla 26. Factor de cobertura vegetal (C). Fuente: (Gracia Sánchez, 1997a).....	86
Tabla 27. Valores de C que se pueden utilizar para estimar pérdidas de suelo en la USLE. Fuente: (INIFAP & CONAFOR, 2007).....	87
Tabla 28. Valores de P que se pueden utilizar para estimar pérdidas de suelo en la USLE. Fuente (INIFAP & CONAFOR, 2007).....	88
Tabla 29. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos para la cuenca de la Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel).....	91
Tabla 30. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos para la cuenca de la Presa La Boquilla (Lago Toronto).....	92
Tabla 31. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos para la cuenca de la Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes).....	94
Tabla 32. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos para la cuenca de la Presa Chihuahua.....	96
Tabla 33. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos para la cuenca de la Presa Rodrigo Gómez (La Boca).....	98
Tabla 34. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos para la cuenca de la Presa Pico del Águila.....	101
Tabla 35. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos para la cuenca de la Presa Luis L. León (El Granero).....	102
Tabla 36. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos para la cuenca de la Presa Internacional La Amistad.....	103
Tabla 37. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos para la cuenca de la Presa Marte R. Gómez.....	104
Tabla 38. Evolución de los grupos de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca propia de la Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel).....	108
Tabla 39. Evolución de los grupos de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Pico del Águila.....	110
Tabla 40. Evolución de los grupos de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca de la Presa La Boquilla (Lago Toronto).....	112
Tabla 41. Evolución de los grupos de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes).....	114
Tabla 42. Evolución de los grupos de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Luis L. León (El Granero).....	116
Tabla 43. Evolución de los grupos de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Chihuahua.....	118
Tabla 44. Evolución de los grupos de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Internacional La Amistad.....	120



<i>Tabla 45. Evolución de los grupos de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Rodrigo Gómez (La Boca)</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 46. Evolución de los grupos de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Marte R. Gómez (El Azúcar)</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 47. Acumulación de sedimentos en embalses estimada a partir de la comparación de registros de batimetría en cuencas de cabecera</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 48. Acumulación de sedimentos en embalses estimada a partir de la comparación de registros de batimetría en cuencas intermedias y de emisión</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 49. Tasas de aporte de sedimentos estimadas a partir de la aplicación de métodos empíricos</i>	<i>139</i>



Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de tasas de aporte de sedimentos específicas a nivel global realizado por Walling y Webb en 1983. Fuente: (Annandale et al., 2016)	13
Figura 2. Metodología para la evaluación de la acumulación de azolves en la zona de estudio	20
Figura 3. Distribución longitudinal esquemática de la deposición de sedimentos de acuerdo a su granulometría a lo largo del eje de un embalse. Fuente: Elaboración propia a partir de (Palau Ybars, 2004)	22
Figura 4. Clasificación de estrategias para manejo de la sedimentación en embalses Fuente: Elaboración propia a partir de (Auel et al., 2016)	27
Figura 5. Mapa de localización de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos. Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 2019).....	32
Figura 6. Mapa de grupos climáticos de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos. Fuente: Elaboración propia a partir de 'Climas' (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000 de México. (García & CONABIO, 2001).....	37
Figura 7. Mapa de la hidrografía de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos. Fuente: Elaboración propia a partir de (Maderey-R & Torres-Ruata, 1990)	39
Figura 8. Mapa de la fisiografía de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos. Fuente: Elaboración propia a partir de (Cervantes-Zamora et al., 1990)	41
Figura 9. Mapa de uso de suelo y cobertura vegetal de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos. Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 2016).....	46
Figura 10. Mapa de edafología de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos. Fuente: Elaboración propia a partir de (INIFAP & CONABIO, 2001)	50
Figura 11. Mapa de cuencas hidrológicas de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos. Fuente: Elaboración propia a partir de (CONABIO, 2001)	55
Figura 12. Mapa de localización de los embalses de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 2019).....	60
Figura 13. Regiones hidrológico-administrativas de México, donde aplican las ecuaciones de erosividad. Fuente: (Cortés T., 1991).....	83
Figura 14. Evolución del uso de suelo y la cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel). Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 1997b), (INEGI, 2001b) e (INEGI, 2005b)	107
Figura 15. Evolución del uso de suelo y la cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Pico del Águila. Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 1997b), (INEGI, 2001b), (INEGI, 2005b), (INEGI, 2009b) e (INEGI, 2013b)	109
Figura 16. Evolución del uso de suelo y la cobertura vegetal en la cuenca de la Presa La Boquilla (Lago Toronto). Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 1997b), (INEGI, 2001b) e (INEGI, 2005b).....	111
Figura 17. Evolución del uso de suelo y la cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes). Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 1997b), (INEGI, 2001b) e (INEGI, 2005b).....	113
Figura 18. Evolución del uso de suelo y la cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Luis L. León (El Granero). Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 1997b), (INEGI, 2001b) e (INEGI, 2005b).....	115



Figura 19. Evolución del uso de suelo y la cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Chihuahua. Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 1997b), (INEGI, 2001b) e (INEGI, 2005b).....	117
Figura 20. Evolución del uso de suelo y la cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Internacional La Amistad Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 1997b), (INEGI, 2001b) e (INEGI, 2005b).....	119
Figura 21. Evolución del uso de suelo y la cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Rodrigo Gómez (La Boca). Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 1997b), (INEGI, 2001b) e (INEGI, 2005b).....	121
Figura 22. Evolución del uso de suelo y la cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Marte R. Gómez (El Azúcar). Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 1997b), (INEGI, 2001b), (INEGI, 2005b) e (INEGI, 2009b)	123
Figura 23. Mapa de zonificación de las tasas medias de aporte de sedimentos en la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos. Fuente: Elaboración propia	155



Índice de Gráficas

<i>Gráfica 1. Curvas área elevación volumen de la presa La Boquilla (Lago Toronto) para los años 1942 y 2004</i>	127
<i>Gráfica 2. Curvas área elevación volumen de la presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes) para los años 1948 y 2004</i>	128
<i>Gráfica 3. Curvas área elevación volumen de la presa Chihuahua para los años 1958 y 2004</i>	130
<i>Gráfica 4. Curvas área elevación volumen de la presa Rodrigo Gómez (La Boca) para los años 1961 y 2004</i>	130
<i>Gráfica 5. Curvas área elevación volumen de la presa Federalismo Mexicano (San Gabriel) para los años 1979 y 2004</i>	132
<i>Gráfica 6. Curvas área elevación volumen de la presa Pico del Águila para los años 1987 y 2012</i>	135
<i>Gráfica 7. Curvas área elevación volumen de la presa Luis L. León (El Granero) para los años 1968 y 2004</i>	136
<i>Gráfica 8. Curvas área elevación volumen de la presa Internacional La Amistad para los años 1968 y 2005</i>	136
<i>Gráfica 9. Curvas área elevación volumen de la presa Marte R. Gómez (El Azúcar) para los años 1979 y 2004</i>	138
<i>Gráfica 10. Comparación de tasas de aporte de sedimentos estimadas a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos y registros de batimetría</i>	146
<i>Gráfica 11. Comparación de tasas de aporte de sedimentos estimadas a partir del método de valores promedio de aporte de sedimentos y registros de batimetría</i>	148
<i>Gráfica 12. Comparación de tasas de aporte de sedimentos estimadas a partir del método del Buró de Reclamación de Suelos de Estados Unidos y registros de batimetría</i>	149
<i>Gráfica 13. Comparación de tasas de aporte de sedimentos estimadas a partir del método de Namba y registros de batimetría</i>	150
<i>Gráfica 14. Comparación de tasas de aporte de sedimentos estimadas a partir del método de Owen y Branson y registros de batimetría</i>	151



Capítulo 1: Introducción

La estimación de la producción de sedimentos (también denominados azolves) en cuencas y su acumulación en los vasos de almacenamiento de embalses, es un tema que ha recibido mayor atención en los últimos años debido a la drástica pérdida de capacidad para azolves, y en algunos casos, de capacidad útil que han sufrido múltiples presas a nivel mundial (Ramírez León & Aparicio, 2008).

Los embalses representan un aspecto fundamental para el aprovechamiento de los recursos hídricos, lo que permite distribuir el suministro de agua de acuerdo a las necesidades de consumo, sin embargo, a pesar de su importancia, se estima que un 0.5-1% de la capacidad de almacenamiento en el mundo se pierde cada año por la sedimentación, lo que supone que el 25% de la capacidad de almacenamiento de agua dulce puede perderse en los próximos 25 años a causa de la falta de medidas de control de azolves (Comisión Mundial De Represas, 2000), teniéndose un tasa de aporte de sedimentos promedio a nivel mundial del orden de 150 ton/km²-año (Jiménez et al., 2015; U.S. Bureau of Reclamation, 1987).

La pérdida de capacidad a causa de la sedimentación es uno de los retos principales del manejo sustentable de los embalses, es por esto, que se busca realizar la evaluación de la tasa de acumulación de sedimentos en una porción de las zonas áridas del norte de México, de manera que se puedan encontrar patrones de comportamiento en cuencas de cabecera, cuencas intermedias y cuencas de emisión.

Este tipo de análisis tiene un alto grado de importancia para conocer el impacto que ha tenido la acumulación de azolves en un embalse y de qué manera se puede llevar a cabo su manejo, con el objetivo de preservar la capacidad útil, y con ello, la cantidad de agua que puede ser aprovechada.

La tasa de acumulación de sedimentos en un embalse depende de múltiples factores y se puede considerar un proceso ampliamente complejo; es importante tener conocimiento de que la mayor parte de los azolves que se encuentran depositados en los embalses son producto de la



pérdida de suelo a causa de procesos erosivos, considerando este fenómeno con mayor impacto en zonas áridas o semi áridas debido a las condiciones de su cobertura vegetal.

Los métodos utilizados para conocer el grado de acumulación de sedimentos en vasos de almacenamiento pueden ser métodos directos, como los levantamientos topo batimétricos o estaciones de medición de azolve en cauces ubicados a la entrada del embalse, o bien, en caso de no contar con información disponible, se puede realizar la estimación de este fenómeno a partir de métodos empíricos, debiendo considerarse que ningún método utilizado de manera aislada puede otorgar resultados completamente confiables, por lo que se deben utilizar múltiples métodos que consideren distintas variables para llevar a cabo una evaluación de los resultados obtenidos (Annandale et al., 2016).

Se define como zona de estudio para el presente trabajo la Región Hidrológica Número 24 Bravo-Conchos; esta se localiza al norte de México y se caracteriza por ser una zona árida y semi árida.

Las aguas superficiales que se generan en las 37 cuencas ubicadas en esta región hidrológica permiten un aprovechamiento anual de 5,306.62 hm³, según el cálculo de la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales publicada en el Diario Oficial de la Federación el 7 de julio de 2016 (SEMARNAT & CONAGUA, 2016); el aprovechamiento incluye usos agrícola, público urbano y rural, pecuario, industrial y otros usos, el cual es posible gracias a la serie de presas que existen en la zona. De igual forma, se encuentran diversos embalses que permiten la regulación del recurso hídrico de la cuenca para el cumplimiento del Tratado de 1944 entre México y los Estados Unidos de América en materia de agua.

Algunos de los embalses que se encuentran en la zona de estudio ya han superado su vida útil desde la fecha de terminación de su construcción a la actualidad (CONAGUA & SEMARNAT, 2009), de igual forma, en sus cuencas se presenta una fuerte deforestación y pérdida de suelo que ha modificado drásticamente la escorrentía, y por consecuencia, ha presentado una disminución de la infiltración, así como un incremento de la erosión y transporte



en suelos desprotegidos, afectando cauces principales o secundarios llenando de sedimentos a las presas (Montero Martínez & Ibáñez Hernández, 2017). Por lo tanto, es posible afirmar que la disminución acelerada de la capacidad útil es un problema inminente que afectará la distribución espacial del recurso hídrico embalsado.

Dada la importancia que tienen los embalses localizados en la zona de estudio para garantizar el cumplimiento de acuerdos internacionales y el aprovechamiento del recurso hídrico por los usuarios nacionales, es importante notar que pese a esta realidad, se cuenta con limitada infraestructura o acciones de conservación de suelos a nivel cuenca, que potencien la vida útil de las presas y propicien la recuperación y retención del suelo en la porción de cabecera de las cuencas, al igual que no existe un análisis detallado del comportamiento de la generación de sedimentos en estas, siendo de gran utilidad el análisis de las tasas de aporte de sedimentos.

1.1.JUSTIFICACIÓN

Los embalses son construidos para diferentes propósitos como puede ser el abastecimiento para consumo humano, consumo agrícola, generación de energía hidroeléctrica, control de avenidas, entre otros.

La pérdida de capacidad de almacenamiento a partir de la acumulación de azolves conlleva a una serie de efectos perjudiciales en el desempeño físico y económico del embalse, así como una disminución de la vida útil del proyecto. Esta pérdida de capacidad, resulta ser una preocupación grave a nivel global, presentándose principalmente en cuencas con tasas elevadas de erosión, afectando en mayor proporción a los embalses pequeños con menores volúmenes de almacenamiento.

Al momento de construir una presa, se considera dentro de su diseño cierta capacidad para la acumulación de azolves denominado “volumen muerto”, sin embargo, regularmente esta capacidad difiere del volumen que se acumulará realmente dentro del embalse. En ocasiones, al efectuar un levantamiento topo batimétrico, se obtiene que el volumen de sedimentos acumulados es mayor que el de diseño (Annandale et al., 2016).



Las tasas de aporte de sedimentos son variables a nivel global debido a que estas dependen de múltiples factores como el clima, la edafología, la topografía, el uso de suelo y la cobertura vegetal, la erosión natural y la debida a causas antropogénicas, entre otros. En la siguiente Figura, se muestra un mapa que el Banco Mundial ha mostrado en publicaciones relacionadas con manejo de sedimentos, en donde se pueden observar las tasas de aporte de sedimentos específicas a nivel mundial por zonas (Annandale et al., 2016).

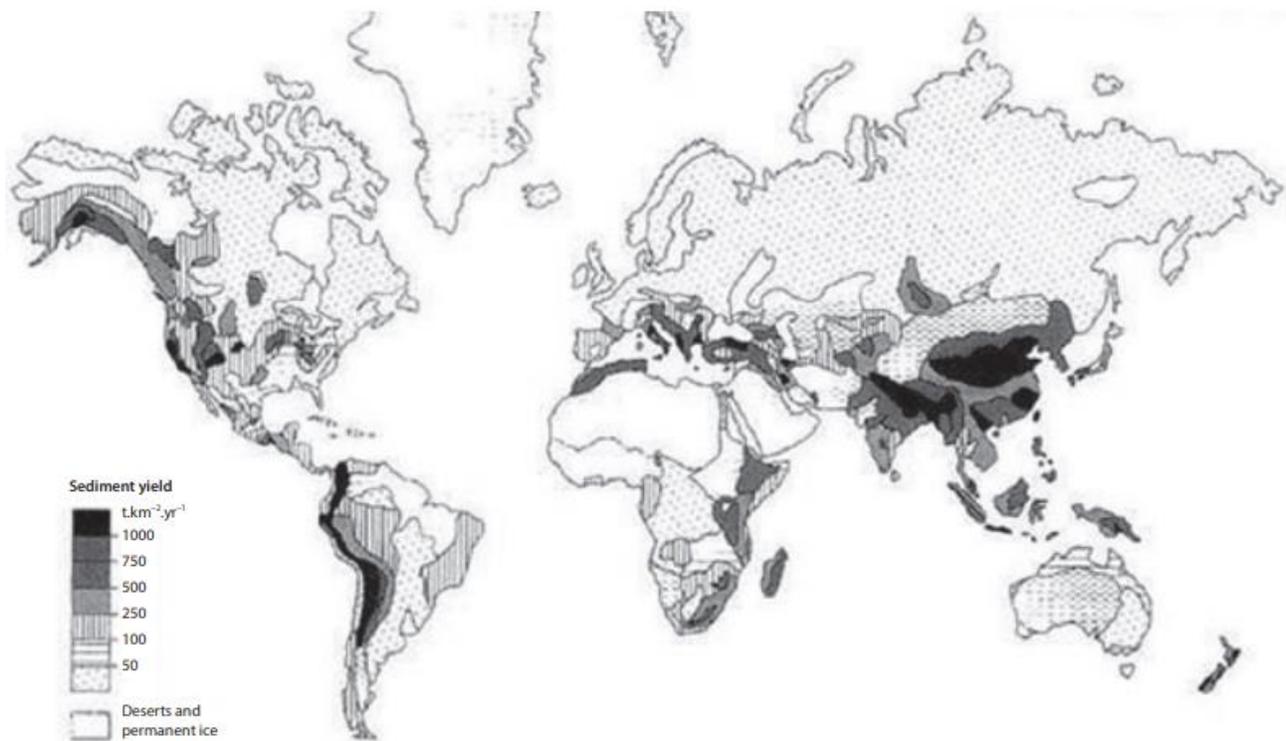


Figura 1. Mapa de tasas de aporte de sedimentos específicas a nivel global realizado por Walling y Webb en 1983. Fuente: (Annandale et al., 2016)

La zona de estudio elegida corresponde a la región hidrológica 24 Bravo-Conchos, que se ubica en las zonas áridas del norte de México, e incluye a los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León y Tamaulipas, donde se encuentran ubicados una serie de embalses que represan parte de los escurrimientos superficiales generados en las cuencas de los afluentes principales, como es el río Conchos. Estos embalses se han visto afectados por la sedimentación a causa de los impactos antropogénicos que han resultado de un alto grado de deforestación, lo



que ha llevado a una pérdida de su capacidad útil a lo largo de los últimos años, misma que seguirá disminuyendo si no se identifican medidas de control de azolves que permitan incrementar la vida útil de estas obras.

Considerando como ejemplo uno de los embalses más importantes en la zona de estudio, se tiene la presa Francisco I. Madero en el estado de Chihuahua, la cual contiene un volumen de sedimentos de 145.055 hm^3 , que equivalen al 29.61% de su capacidad útil, con una tasa de aporte de sedimentos, de $253.98 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$ en un período de análisis de 1948 a 2004 (Estrada Gutiérrez et al., 2015); esta tasa es considerablemente mayor de lo que indica la Figura 1, en donde para la zona de estudio, se tiene una tasa de aporte de sedimentos de entre 50 a $100 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$.

Los puntos anteriormente expuestos representan la realidad actual sin considerar los efectos del cambio climático. Se ha documentado que el cambio climático podrá incrementar las cargas de sedimentos que transitan por los cauces, teniéndose que es mucho más probable que las tasas de aporte de sedimentos vayan en ascenso conforme las condiciones climáticas cambien en los próximos 30 a 100 años (Annandale et al., 2016; Shrestha et al., 2013).

Tomando en cuenta que en la zona de estudio se espera una disminución de alrededor del 10% en la precipitación y un aumento de la temperatura de hasta 2°C a causa del cambio climático, según la evaluación de los Modelos de Circulación Global (MCG) considerados en el Quinto Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) que ha realizado el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (Arreguín Cortéz et al., 2015), se espera también una disminución en la disponibilidad de los recursos hídricos, por lo cual el manejo adecuado de los sedimentos que ingresan a los embalses se vuelve de carácter urgente, ya que su acumulación impactará directamente en la gestión del agua a futuro.

Por todo lo anterior, es que resulta necesario conocer el grado de acumulación de azolves en embalses, ya que de esta manera será posible dimensionar la pérdida de capacidad de sus vasos de almacenamiento y el grado de degradación del suelo en sus áreas vertientes, lo que permitirá



generar propuestas de solución ante la problemática identificada y construir escenarios futuros del comportamiento de los sedimentos para una mejor operación de los embalses estudiados.

1.2.HIPÓTESIS

Evaluar la acumulación de azolves en los embalses localizados en la zona de estudio, permitirá definir el rango de aporte de sedimentos asociado a cada categoría o grupo de cuencas.

1.3.ALCANCES Y OBJETIVOS

Como parte de los alcances de este trabajo, se tiene el análisis de la acumulación de sedimentos en embalses en donde se tenga su curva área elevación volumen original e información batimétrica posterior, de manera que se puedan encontrar patrones de comportamiento en las tasas de aporte de sedimentos en cuencas de cabecera, cuencas intermedias y cuencas de emisión en zonas áridas y semi áridas.

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la acumulación de azolves en embalses localizados en cuencas de cabecera, cuencas intermedias y de emisión en la región hidrológica 24 Bravo-Conchos.

1.3.2 Objetivos particulares

- Recopilar y organizar datos hidro climatológicos, batimétricos, edafológicos, de uso de suelo y cobertura vegetal, así como datos constructivos de los embalses correspondientes a las cuencas a analizar.
- Revisar teorías existentes respecto a generación de sedimentos y los métodos para su estimación y medición.
- Agrupar las cuencas de todos los embalses en las categorías de: cuencas de cabecera, cuencas intermedias y cuencas de emisión.
- Evaluar la tasa de aporte de sedimentos en embalses que cuenten con curvas área elevación volumen originales y estudios batimétricos posteriores.
- Identificar los factores que afectan la generación de sedimentos y cuáles son los que aplican para la zona de estudio.



- Comparar los resultados de la información batimétrica con los resultados a partir de la aplicación de métodos empíricos para la estimación de aporte de sedimentos para el grupo de cuencas a analizar (cabecera, intermedias, emisión).
- Analizar los resultados obtenidos para cuencas de cabecera, cuencas intermedias y cuencas de emisión con el propósito de identificar los factores que influyen en cada uno de los casos.
- Generar mapas de zonificación del comportamiento del aporte de sedimentos y las variables que influyen en este proceso.
- Emitir recomendaciones para evitar erosión y arrastre en cuencas ubicadas en zonas áridas, así como para el control de azolves en presas.

1.4.METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el presente trabajo, fue necesario llevar a cabo la metodología que se describe a continuación:

- 1. Búsqueda, recopilación y organización de la información:** Fue necesario buscar, recopilar y organizar los siguientes grupos de datos:
 - **Datos constructivos de los embalses de estudio:** Curvas área elevación volumen originales. Dicha información fue proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) Dirección local Chihuahua para las presas La Boquilla (Lago Toronto), Francisco I. Madero (Las Vírgenes), Chihuahua y Pico del Águila. Para las presas Rodrigo Gómez (La Boca), Luis L. León (El Granero), Internacional La Amistad y Marte R. Gómez (El Azúcar), la información fue obtenida de diversos Boletines Hidrológicos de la Región Hidrológica Núm. 24 de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Por último, para la presa Federalismo Mexicano (San Gabriel) se obtuvo de la Memoria Descriptiva de esta, perteneciente al libro digital Presas de México de la CONAGUA.



- **Información batimétrica con fecha posterior a la construcción de los embalses:** Esta información fue proporcionada por la CONAGUA para cada uno de los embalses estudiados.
 - **Datos hidro climatológicos:** Se obtuvieron los datos de precipitación para cada uno de los embalses a partir de la información que proporciona la Base de Datos Climatológica Nacional (Sistema CLICOM) del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
2. **Caracterización del marco teórico:** Dentro del marco teórico se definió el concepto de sedimentación y la importancia de su análisis; los factores que se ven involucrados en la producción de sedimentos; los métodos para la estimación de la acumulación de sedimentos en embalses y los métodos existentes para el control y mitigación de la sedimentación. De igual manera, se realizó la descripción de cada uno de los tipos de cuencas que se analizaron dentro de la zona de estudio, siendo estos de cabecera, intermedias y de emisión.
3. **Descripción del medio físico:** A partir de la utilización de la información descargable del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se describieron los aspectos del medio físico de la zona de estudio:
- **Localización geográfica:** Se construyó un mapa utilizando la carta de División Política Estatal escala 1:250000 con fecha de 2019.
 - **Clima:** Se construyó un mapa utilizando la carta (Clasificación de Köppen, modificado por García) escala 1:1000000 con fecha de 2001.
 - **Hidrografía:** Se construyó un mapa utilizando la carta de Hidrografía escala 1:4000000 con fecha de 1990.
 - **Fisiografía:** Se construyó un mapa utilizando la carta de Provincias Fisiográficas de México escala 1:4000000 con fecha del año 1990.



- **Uso de suelo y cobertura vegetal:** Se construyó un mapa utilizando la carta de Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación escala 1:250000 Serie VI con fecha del año 2017.
 - **Edafología:** Se construyó un mapa utilizando la carta de Edafología escala 1:250000 con fecha del año 2001.
 - **Parámetros geomorfológicos básicos:** Se describieron las 37 cuencas que engloban a la zona de estudio, construyendo un mapa utilizando la carta de subcuencas hidrológicas escala 1:1000000 con fecha del año 2001.
4. **Descripción de los embalses a estudiar:** Se realizó la descripción de los nueve embalses a estudiar de acuerdo a la información dentro de la memoria descriptiva de cada uno encontrada en el libro digital de Presas de México de la CONAGUA.
 5. **Agrupación de cuencas:** Se llevó a cabo la agrupación de las cuencas de los embalses de estudio considerándolas como de cabecera si no cuentan con embalses aguas arriba, intermedias si cuentan con embalses aguas arriba y de emisión si se encuentran a la salida del sistema hidrológico.
 6. **Estimación de acumulación de sedimentos en vasos de almacenamiento a partir de comparación de curvas área elevación volumen:** La estimación de acumulación de sedimentos en los vasos de almacenamiento de los embalses estudiados se llevó a cabo a partir de la comparación de las curvas área elevación volumen disponibles para distintos períodos de análisis, de manera que se conocieron las tasas de aporte de sedimentos, los porcentajes de pérdida sobre la capacidad útil a causa de los sedimentos y la tasa anual de sedimentación al Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) de cada una de las presas.
 7. **Aplicación de métodos empíricos de estimación de aporte de sedimentos:** Una vez revisado el marco teórico en donde se describen los métodos empíricos existentes para la estimación de aporte de sedimentos a embalses, se consideraron cinco de ellos para ser



aplicados en cada uno de los embalses de estudio, siendo estos el método de valores de aporte de sedimentos para cuencas de diferentes tamaños de acuerdo a mediciones realizadas en los Estados Unidos de América, el método del USBR (United States Bureau of Reclamation), el método de Namba, el método de Owen y Branson y la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos.

- 8. Análisis de la evolución de uso de suelo y cobertura vegetal:** Se construyó un mapa de la evolución del uso de suelo y cobertura vegetal para cada una de las cuencas de los embalses estudiados a partir de las cartas que ha generado el INEGI en sus diversas series, considerando un período de análisis de acuerdo a la información de las curvas área elevación volumen disponible.
- 9. Análisis de los resultados:** Para llevar a cabo el análisis de los resultados, se trabajaron en primera instancia los obtenidos a partir de registros de batimetría, encontrando tendencias por grupos de cuencas y características de los embalses; en segundo lugar, se realizó el análisis de la acumulación de sedimentos en vasos de almacenamiento a partir de la aplicación de métodos empíricos con lo que fue posible revisar las tendencias para cada uno de los grupos de cuencas analizados, y por último, se llevó a cabo una comparación de los resultados obtenidos a partir de la comparación batimétrica y los métodos empíricos.
- 10. Conclusiones y recomendaciones:** A partir del análisis de resultados, fue posible llevar a cabo las conclusiones del trabajo, así como emitir recomendaciones para un mejor manejo de sedimentos en la zona de estudio.

En la siguiente Figura se puede observar de manera gráfica la metodología descrita.

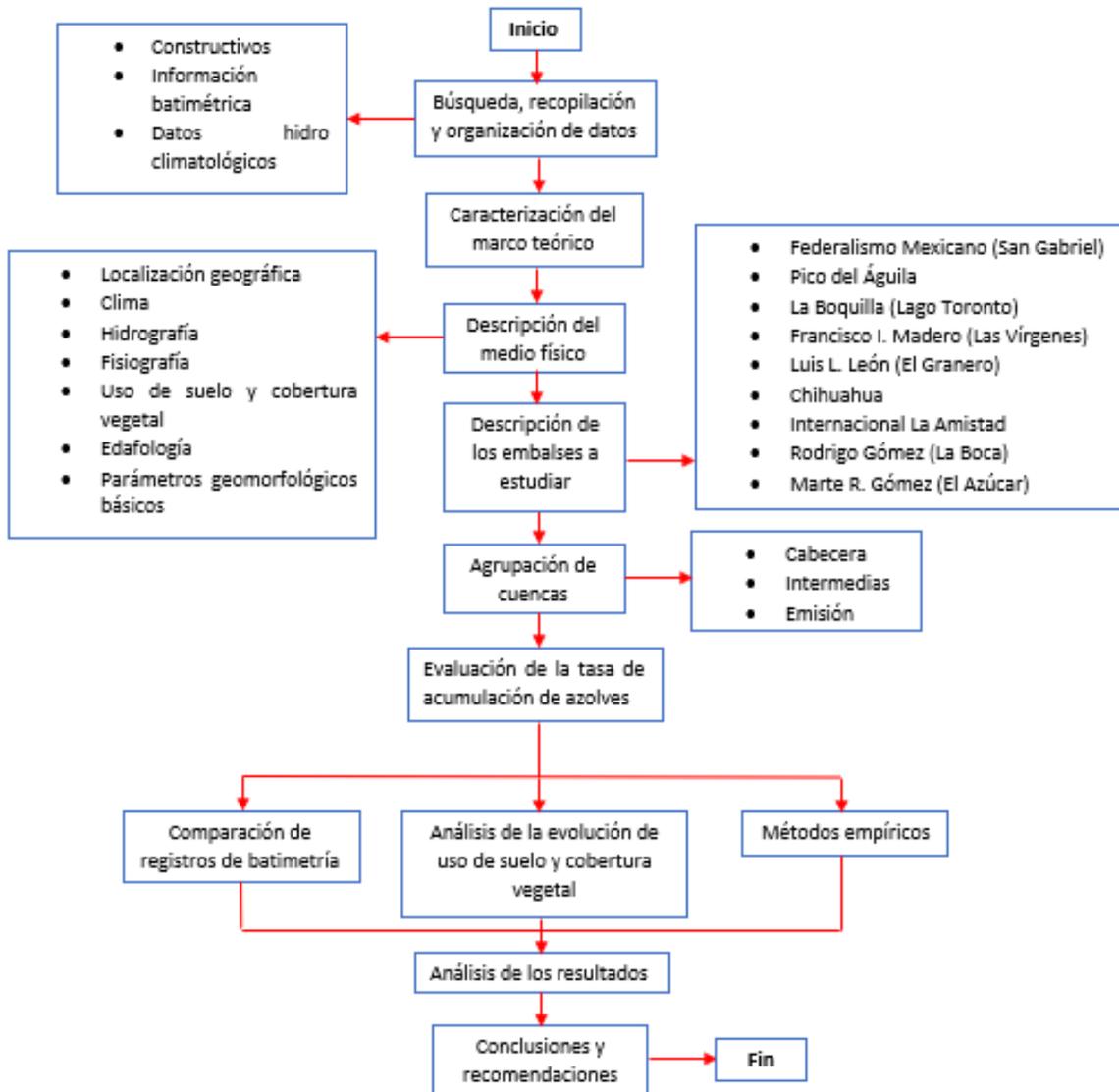


Figura 2. Metodología para la evaluación de la acumulación de azolves en la zona de estudio

Capítulo 2: Marco teórico

2.1. CONCEPTO DE SEDIMENTACIÓN

La sedimentación es el producto final de la erosión o desgaste del suelo por la acción del agua, el viento, el hielo y la gravedad (U.S. Bureau of Reclamation, 1987). Esta puede ser consecuencia también, de actividades antropogénicas como el sobrepastoreo, la deforestación y la agricultura intensiva, que han se han visto incrementadas en los decenios recientes.



La sedimentación ocasiona el azolvamiento, este es el proceso a partir el cual los sedimentos son arrastrados por una corriente y son depositados dentro de un embalse, ocasionando la pérdida de su capacidad útil (Rocha Felices, 2006).

Para comprender como ocurre el proceso de sedimentación, es necesario entender que la capacidad de transporte, es función de la velocidad del flujo, por lo que al disminuir ésta, la sedimentación aumentará. La sedimentación sucede cuando la capacidad de transporte resulta ser menor que la cantidad del suelo que se encuentra disponible para poder ser transportado (Zambrano Nájera, 2015).

La construcción de almacenamientos sobre un cauce origina disminución importante de la velocidad del flujo y estancamiento del líquido, y consecuentemente la deposición de las partículas sólidas en el volumen de agua. El mecanismo de deposición de los sedimentos funciona de la siguiente manera: al tener una disminución de la velocidad del agua a causa del incremento del área hidráulica existente, el material más grueso se deposita primero, formando una acumulación de sedimentos al que se le denomina delta; por otra parte, el material fino continúa con la corriente manteniéndose en un estado de suspensión para posteriormente, depositarse en la parte más profunda del embalse (Estrada Gutiérrez et al., 2015; Gracia Sánchez, 1997b); es posible visualizar este fenómeno en la Figura 3. A pesar de que el mecanismo de deposición de sedimentos pueda ser representado de manera sencilla, es un fenómeno que involucra muchos otros factores como la estratificación de las temperaturas, las características del vaso y del embalse, los ciclos de operación, los aspectos fisicoquímicos de los sedimentos, así como los flujos de entrada al embalse.

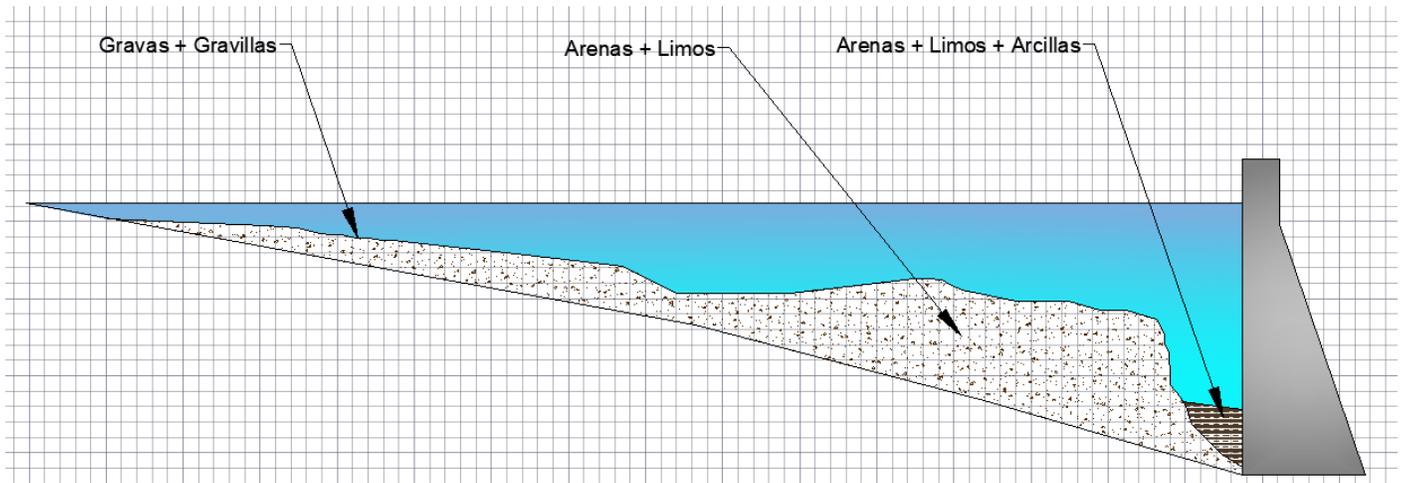


Figura 3. Distribución longitudinal esquemática de la deposición de sedimentos de acuerdo a su granulometría a lo largo del eje de un embalse. Fuente: Elaboración propia a partir de (Palau Ybars, 2004)

Para poder evaluar los procesos de sedimentación en un embalse, resulta necesario describir los procesos físicos que los propician, considerando la existencia de una estructura, y como esto afectará las tasas presentes y futuras, así como la localización de los depósitos de sedimentos. El parámetro principal para su evaluación se denomina tasa de aporte de sedimentos, que se define como la cantidad de sedimento erosionado descargado por una corriente en un punto dado y representa la cantidad total de sedimentos fluviales producidos por los afluentes de una cuenca hacia un punto de medición, siendo un parámetro de gran importancia al estudiar un embalse (Morris & Fan, 1998).

Otra definición indica que es el flujo total de sedimentos producido por una cuenca, medido en una sección transversal en un periodo de tiempo específico (Comission Internationale Des Grands Barrages, 1997). Regularmente se expresa en peso por unidad de superficie por unidad de tiempo (t/km^2 -año).

En 1998, Jansson analizó la variabilidad de las tasas de aporte de sedimentos alrededor del mundo realizando un análisis de sedimentos suspendidos a partir de datos de 1,358 estaciones de medición entre cuencas de cabecera e intermedias con una superficie de entre 350 y 10,000 km^2 . Se dividieron seis intervalos de tasas de aporte de sedimentos, teniendo que la tasa más alta



excede los 1000 ton/km²-año, la cual representa solo al 8.8% del área total analizada, sin embargo, esta corresponde al 69% de la carga total de sedimentos. Por otra parte, las cuencas con tasas de aporte de sedimentos menores a 50 ton/km²-año constituyen alrededor de la mitad del área total analizada, pero solo aportan un 2.1% de la carga total de sedimentos. En la siguiente Tabla es posible observar dicho análisis (United States Department of Agriculture & National Resources Conservation Service, 1983).

Tabla 1. Tasas de aporte de sedimentos analizadas a nivel mundial. Fuente: Elaboración propia a partir de (United States Department of Agriculture & National Resources Conservation Service, 1983)

Tasa de aporte de sedimentos ton/km²-año	Número de estaciones de medición	Porcentaje de área medida	Porcentaje de la carga de sedimentación total
0-10	230	21.3	0.3
11-50	285	25.6	1.8
51-100	172	11.9	2.1
101-500	426	25.6	14.7
501-1000	145	6.9	21
>1000	179	8.8	69.1

La eficiencia de atrape es otro de los conceptos importantes al momento de estimar la sedimentación en un embalse. Esta, se define como la relación de la cantidad de sedimentos depositados contra el flujo total de sedimentos que entraron al embalse (U.S. Bureau of Reclamation, 1987). Esto depende principalmente del tipo de partículas que conforman los sedimentos, así como de la velocidad del flujo que las contiene. La eficiencia de atrape resulta importante al momento de estimar la vida útil de un embalse, considerando que, dependiendo del tamaño y diseño de éste, en ocasiones una avenida puede ser superior a su capacidad, descargando una gran parte de sedimentos en forma de caudal sólido por la estructura vertedora, situación que disminuye la eficiencia de atrape significativamente. (Reyna et al., 2011).



2.2. CAUSAS QUE ORIGINAN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

Los procesos de sedimentación pueden ser considerados como un fenómeno complejo debido a que involucran una gran variedad de factores. Entre los más importantes se encuentran los siguientes (Moriassi et al., 2018; U.S. Bureau of Reclamation, 1987; United States Department of Agriculture & National Resources Conservation Service, 1983):

- **Factores climatológicos:** La precipitación, la temperatura y el viento inciden directamente en las tasas de aporte de sedimentos debido a que son agentes erosivos. En el caso de la precipitación, su duración e intensidad resultan ser aspectos de alta importancia ya que el poder erosivo y de arrastre del agua depende directamente de su comportamiento; es por esto que la variabilidad en los regímenes de lluvia, y por consecuencia en los escurrimientos, pueden modificar las tasas de aporte de sedimentos. Teniendo por ejemplo, que lluvias prolongadas de baja intensidad son menos erosivas que tormentas intensas de corta duración.
- **Área de drenaje y tamaño de la cuenca:** El área de drenaje impacta directamente en la tasa de aporte de sedimentos, se puede considerar que entre mayor sea el área de drenaje, la tasa de aporte de sedimentos también será mayor, sin embargo, si se considera esta por unidad de área, la tasa decrecerá conforme se presente un incremento en el área de drenaje, es por esto que la relación existente entre la tasa de aporte de sedimentos y el área de drenaje debe considerarse como un factor de alta importancia a pesar de su complejidad debido a factores como el uso y tipo de suelo, la cobertura vegetal y la lluvia.
- **Topografía:** Las principales variables topográficas que influyen en la entrega de sedimentos hacia un sistema de drenaje en una cuenca y por consecuente, a un embalse, son los ángulos y las longitudes de las pendientes. Entre más grande sea el ángulo y menor la longitud, se tiene mayor pérdida de suelo debida a la erosión hídrica.
- **Densidad de drenaje:** Se puede decir que la eficiencia de un sistema de drenaje en materia de transporte de sedimentos se ve afectado directamente por la densidad de drenaje; en cuencas en las que la densidad de drenaje tiene valores altos, se puede afirmar que se refiere



a suelos erosionables en los que se presenta un concentración del escurrimiento más rápido que si tuviera valores más bajos, lo que provoca un mayor transporte de sedimentos (United States Department of Agriculture & National Resources Conservation Service, 1983). Para clasificar una cuenca respecto a su densidad de drenaje (Ds) se pueden considerar los siguientes parámetros (Estrada Gutiérrez, 2019):

$Ds > 500 \text{ km/km}^2$, indica una combinación de un régimen pluvial alto con una litología con mayor facilidad a ser erosionada.

$Ds < 5 \text{ km/km}^2$, régimen pluvial de poco valor o resistencia del material litológico de gran magnitud, no se producen erosiones relevantes.

- **Uso de suelo y cobertura vegetal:** El suelo se considera como un recurso no renovable debido a que su pérdida representa un problema significativo en materia medioambiental (INIFAP & CONAFOR, 2007). Una cuenca puede tener uno o varios usos de suelo de manera natural, cuando estos son modificados a causa de actividades como la agricultura, la urbanización o el sobrepastoreo, se genera una degradación de la superficie, propiciándose suelos más finos con mayor grado de erodibilidad, incrementándose así, los coeficientes de escurrimiento originales y por consiguiente, la pérdida de suelo. Respecto a la cobertura vegetal, puede decirse que, a menos densidad de vegetación, mayor será el transporte de sedimentos, esto considerando que la vegetación funciona como una barrera natural y previene la pérdida de los suelos a causa de agentes erosivos. De acuerdo al Departamento de Agricultura de Estados Unidos, al convertir bosques en tierras de cultivos agrícolas, la erosión se incrementa de 100 a 10,000 veces (United States Department of Agriculture & National Resources Conservation Service, 1983).

2.3. MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE SEDIMENTOS QUE SE DEPOSITAN EN UN EMBALSE

Los métodos de determinación de la cantidad de sedimentos que entran a un embalse dependen de la información disponible. Por una parte, se encuentran los métodos directos, como el aforo del transporte de sedimentos en las corrientes de entrada al embalse midiendo el caudal



sólido, o también, la medición directa de sedimentos depositados a partir de levantamientos topobatemétricos. Ante la ausencia de registros batimétricos o de aforo de sedimentos a la entrada de los embalses, se vuelve necesario el utilizar métodos indirectos que permiten estimar la erosión del suelo para la posterior estimación de la producción de sedimentos a partir del uso de modelos de predicción y evaluación que se basan principalmente en las relaciones existentes entre la determinación de la degradación del suelo con factores climáticos, de cobertura vegetal y relieve (Gracia Sánchez, 1997b). A continuación, se mencionan algunos de los métodos y software existentes para llevar a cabo los fines antes mencionados (Estrada Gutiérrez et al., 2015; Martínez Salvador et al., 2015):

- **Diagrama Universal de Sedimentación en Embalses (DUSE):** Este fue propuesto por Zhide Zhou en 1993 y permite representar la sedimentación ocurrida en cualquier presa o embalse en función de su capacidad total y su volumen escurrido medio anual (Campos Aranda, 2012).
- **Universal Soil Loss Equation (USLE):** En español se denomina Fórmula Universal de Pérdida de Suelos. Esta ecuación fue desarrollada para predecir pérdidas de suelo promedio anual por hectárea debidas a erosión laminar en áreas agrícolas. Permite la estimación anual de la tasa de erosión basándose en la pendiente de la cuenca, el patrón de lluvias, el tipo de suelo, la topografía, la agricultura existente y las prácticas de manejo (Wischmeier & Smith, 1965)
- **Métodos empíricos para la estimación de aporte de sedimentos:**
 - Valores promedio de aporte de sedimentos para cuencas de diferentes tamaños (mediciones de E.U.A.) (Gottschalk, 1964).
 - Método del USBR (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1982).
 - Método de Namba (Gracia Sánchez, 1997a)
 - Método de Owen y Branson (Branson & Owen, 1970).
 - Método semi-empírico de Brune-USBR (Brune, 1953).



- **Softwares para modelación:**

- **SWAT:** Puede modelar la erosión y la sedimentación del área de captación incluyendo los afluentes en la cuenca. (Tadesse & Dai, 2019).
- **GeoWEPP (Interfaz geoespacial para el modelo Water Erosion Prediction Project):** Fue desarrollado por la USDA en 1995. Este es un modelo de erosión que se basa en la dinámica de laderas y simula las condiciones climáticas, de infiltración, balance hídrico, laboreo y consolidación del terreno, con el fin de predecir la escorrentía superficial, la pérdida de suelo y la producción de sedimentos en un rango amplio de escalas temporales (Martínez Salvador et al., 2015).

2.4. MÉTODOS PARA EVITAR LA ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS

Según (Auel et al., 2016) es posible clasificar las estrategias de manejo de sedimentos en embalses en tres categorías según se muestra en el cuadro de la Figura 4:

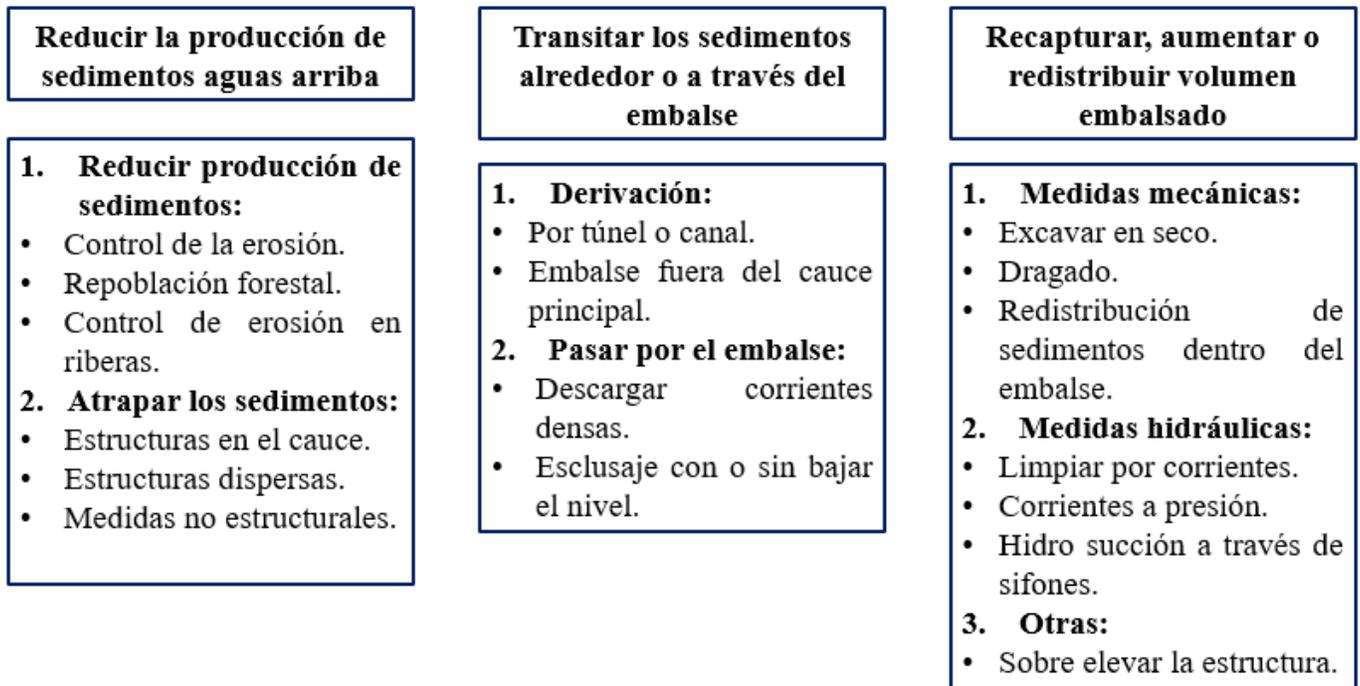


Figura 4. Clasificación de estrategias para manejo de la sedimentación en embalses Fuente: Elaboración propia a partir de (Auel et al., 2016)



En la primera categoría se tiene la reducción de la producción de sedimentos en la cuenca, esto se puede lograr a partir de la restauración de la cobertura vegetal aguas arriba y en las riberas de los embalses. Para esto, es importante la identificación de las zonas con mayor producción de sedimentos, de manera que puedan trabajarse estas primero y continuar con otras zonas con menor producción.

Dentro de esta categoría, se considera también la construcción de estructuras en el cauce, una buena alternativa para la reducción de la erosión es la construcción de presas filtrantes de gaviones; estas, permiten una disminución de la velocidad de los escurrimientos y por consecuencia, del poder erosivo del agua, retienen azolves y permiten una estabilización de los suelos en donde se encuentran emplazadas. Al retardar el paso del flujo, propician la infiltración de agua al subsuelo, permitiendo el crecimiento de vegetación en la zona de incidencia de su vaso de almacenamiento.

Según múltiples autores, la acción más efectiva para evitar que los embalses pierdan capacidad útil por sedimentación es la prevención de la erosión en las cuencas, por lo que las acciones anteriormente mencionadas resultan esenciales (Gracia Sánchez, 1997b).

La segunda categoría muestra estrategias más que todo correctivas, esto quiere decir que se aplicaran una vez que el embalse ya se encuentre azolvado. Se tiene el tránsito de sedimentos hacia aguas abajo a través de túneles o canales y la derivación a un embalse que se encuentre fuera del cauce a través de canales de llamada, de igual forma, se sugiere el esclusaje bajando el nivel para permitir el paso de la carga de fondo, o sin bajar el nivel, permitiendo el paso de solo la carga suspendida, debiendo considerar que entre más bajo se encuentre el nivel y más grande sea la creciente que fluye por el cauce, se tendrá una remoción de sedimentos más efectiva dando lugar a lo que se puede denominar “gestión de nivel del embalse y de crecidas”. Se puede considerar como un procedimiento muy eficiente, sin embargo, al llevarse a cabo se genera un gran desperdicio de agua, siendo una opción no sostenible (Auel et al., 2016; Palau Ybars, 2004).



La tercera categoría, al igual que la anterior menciona medidas correctivas para la remoción de sedimentos. En primera instancia, se tiene la excavación en seco, para esto, el embalse deberá quedar lo más vacío posible y una vez en este nivel, es posible retirar los sedimentos utilizando excavadoras mecánicas, este procedimiento permite una recuperación significativa de volúmenes. Otra medida que suele utilizarse es la sobre elevación de las estructuras vertedoras, permitiendo una mayor capacidad de almacenamiento.

Otra opción es el dragado, este procedimiento consiste en la remoción de los sedimentos sin necesidad de vaciar el embalse, cabe mencionar que es un método extremadamente costoso.

Como medidas hidráulicas, una acción que resulta común mas no eficiente, es la hidro succión, teniendo rendimientos de extracción muy bajos del orden del 5 al 20% del volumen total que se desea retirar.

Los métodos de la tercera categoría son costosos y exhiben alto grado de dificultad para su implementación, ya que frecuentemente no se cuenta con sitios en donde pueda ser depositado el material extraído, sin embargo, ante la problemática de sedimentación existente a nivel mundial se prevé que sus costos bajen debido a la demanda (Gracia Sánchez, 1997b).

Considerando todo lo anterior, se puede afirmar que las medidas más factibles como se mencionaba anteriormente, son las que pertenecen a la primera categoría, ya que estas no representan un riesgo para el agua embalsada y permiten una gestión sostenible de los recursos hídricos almacenados, aunadas a estas, se deben considerar reglas de operación adecuadas para el buen funcionamiento y manejo de los embalses.

2.5. TIPOS DE CUENCAS

Se puede definir a la cuenca hidrográfica según el (IMTA, 2019) como “El área natural o unidad de territorio, delimitada por una divisoria topográfica denominada parte aguas, que capta la precipitación y drena el agua de escurrimiento hasta un colector común, denominado río principal, que a su vez se integra al mar, lago u otro río más grande”.



Otra definición dada por (Rocha Felices, 2004) indica que la cuenca es “El área comprendida dentro de una formación topográfica en la cual aguas concurren a un mismo lugar como el mar, un lago o una corriente de agua, siendo también una región física en la que se da una profunda interdependencia entre el manejo del agua y el manejo de la tierra”.

Las cuencas se pueden clasificar de acuerdo a su tipo de vertiente en las siguientes categorías:

- **Exorreica:** Se denomina también abierta y es cuando los cauces tienen salidas y vierten sus aguas en un océano o en un cuerpo de agua más grande.
- **Endorreica:** Cuando el agua escurre y desemboca en lagos dentro del territorio continental.
- **Arreica:** Cuando no existe escurrimiento superficial debido a que el agua se evapora o existen suelos permeables donde el agua que precipita sobre dicha superficie se infiltra.
- **Criptorreica:** Cuando no muestran un sistema de drenaje superficial aparente y el escurrimiento forma ríos subterráneos, como es el caso de zonas kársticas.

Las cuencas pueden clasificarse también por su tamaño, teniendo que, se denomina cuenca cuando se tiene una superficie mayor de 50,000 hectáreas, subcuenca con una superficie de entre 5,000 y 50,000 hectáreas y microcuenca cuando la superficie es menor de 5,000 hectáreas (IMTA, 2019). En la siguiente Tabla, se puede observar la clasificación de las cuencas de acuerdo a su tamaño propuesta por Campos Aranda.

Tabla 2. Tabla obtenida de Procesos del Ciclo Hidrológico (Campos Aranda, 1992)

Tamaño de la cuenca (km ²)	Descripción
<25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia-Pequeña
500 a 2,500	Grande
>5,000	Muy grande



Una cuenca hidrográfica se encuentra estructurada por una cantidad determinada de subcuencas, siendo estas las encargadas de aportar a un cauce principal y teniendo ordenes de corriente menores. Las cuencas tienen un funcionamiento territorial altitudinal, es por esto, que, dependiendo de su ubicación geográfica, pueden clasificarse en de cabecera, intermedias y de emisión.

Las primeras se localizan en las partes topográficas con mayor elevación, en donde se encuentran las nacientes de los cauces, siendo el aporte de agua a un cauce principal. Enseguida, se tienen las cuencas intermedias, estas pueden definirse como una zona de tránsito debido a que en estas, se capta una buena parte del agua que transitará por el cauce y también, se transporta el agua que proviene de la cuenca de cabecera; por último, se tienen las cuencas de emisión, estas se encuentran en las partes topográficas más bajas en la desembocadura hacia un cuerpo de agua mayor (Meléndez de la Cruz, 2019; Ordóñez, 2011).

Capítulo 3: Descripción del medio físico

3.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos (Figura 5) se ubica parcialmente en los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León y Tamaulipas, en el norte de México. Tiene como límite norte a los Estados Unidos de América, al sur las Regiones Hidrológicas 35 Mapimí, 36 Nazas-Aguanaval y 37 El Salado; al este por la Región Hidrológica 25 San Fernando-Soto La Marina y al oeste por las Regiones Hidrológicas 9 Sonora-Sur, 10 Sinaloa y 34 Cuencas Cerradas del Norte (SEMARNAT, 2011).

Esta cuenca es binacional, se origina en el estado de Colorado en los Estados Unidos de América y comprende también a los estados de Nuevo México y Texas. Su cauce principal, el río Bravo, funciona como frontera natural entre México y Estados Unidos de América a partir de Ciudad Juárez y El Paso, hasta su desembocadura en el Golfo de México.

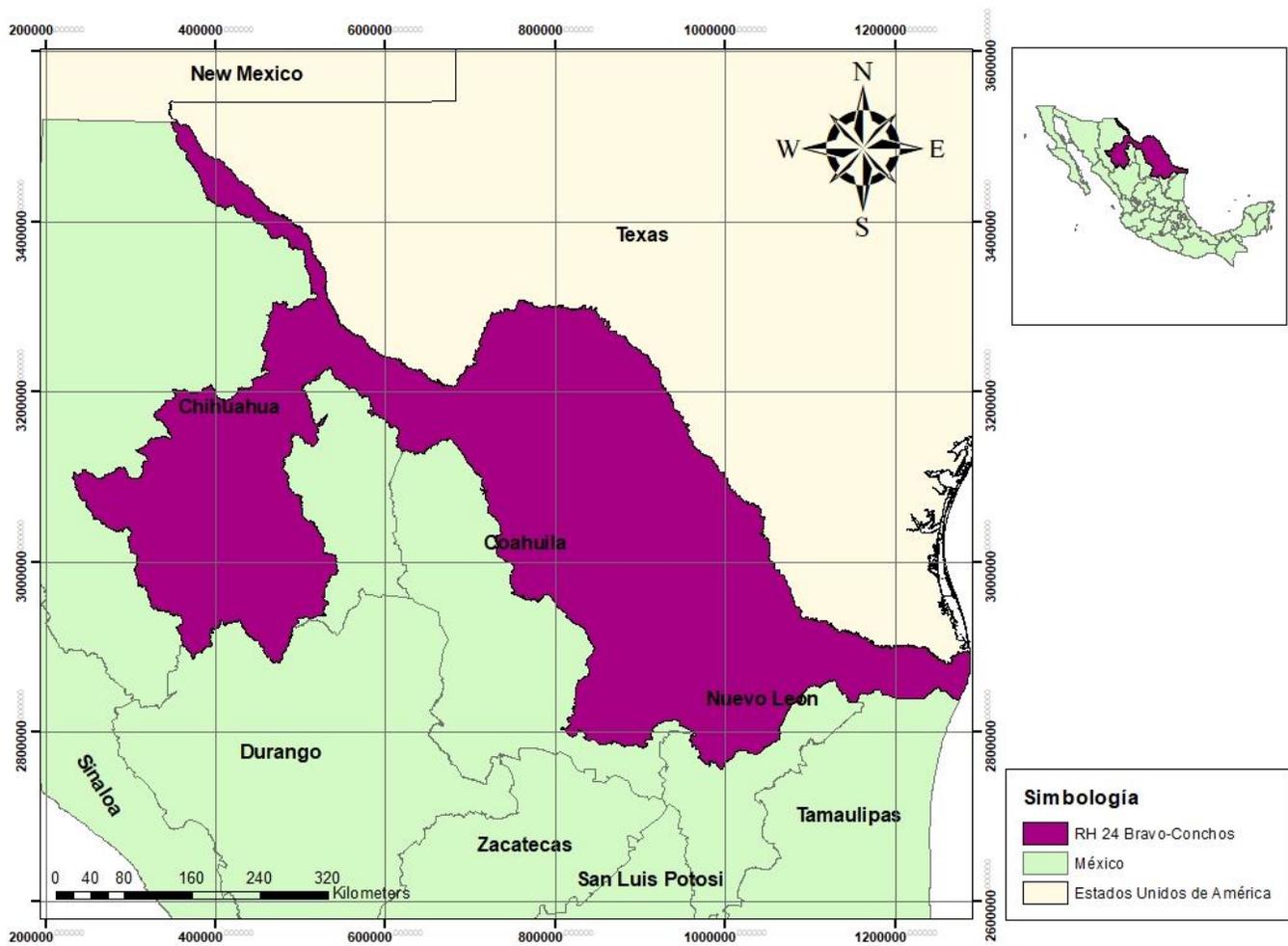


Figura 5. Mapa de localización de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos. Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 2019)

3.2. CLIMA

Con base en la clasificación y distribución de climas de la carta de 'Climas' (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000 de México (García & CONABIO, 2001), el clima de la zona de estudio abarca los siguientes tipos:

- Semicálido subhúmedo: 4.05%
- Semiárido cálido: 5.89%
- Semiárido semicálido: 9.73%
- Semiárido semifrío: 0.11%
- Semiárido templado: 15.37%



- Árido cálido: 12.04%
- Árido semicálido: 17.89%
- Árido templado: 8.90%
- Muy árido semicálido: 22.18%
- Templado subhúmedo: 1.93%
- Semifrío subhúmedo: 1.91%

Estos tipos se dividen en los subgrupos que se describen en la Tabla 3 y se muestran en la Figura 6:

Tabla 3. Tipo de clima en la zona de estudio conforme a la clasificación de Köppen, modificada por García (García & CONABIO, 2001)

Tipo de clima	Clave	Descripción
Semicálido	(A)C(w1)	Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% anual.
	(A)C(w2)	Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco menor a 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.



Continuación Tabla 3. Tipo de clima en la zona de estudio conforme a la clasificación de Köppen, modificada por García (García & CONABIO, 2001)

Tipo de clima	Clave	Descripción
Semicálido	(A)C(wo)	Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2, y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
	(A)C(wo)x'	Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano, porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2 % del total anual.
Semiárido	BS1(h') (x')	Semiárido, cálido, temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Lluvias repartidas durante todo el año con un porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.
	BS1(h') w	Semiárido cálido, temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Lluvias de verano con un porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
	BS1h(x')	Semiárido, semicálido, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Lluvias repartidas durante todo el año con un porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.
	BS1hw	Semiárido, semicálido, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
	BS1k'w	Semiárido, semifrío temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22 °C. Lluvias de verano con un porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.
	BS1k(x')	Semiárido, templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C. Lluvias de verano con un porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.
	BS1kw	Semiárido, templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C. Lluvias de verano con un porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.



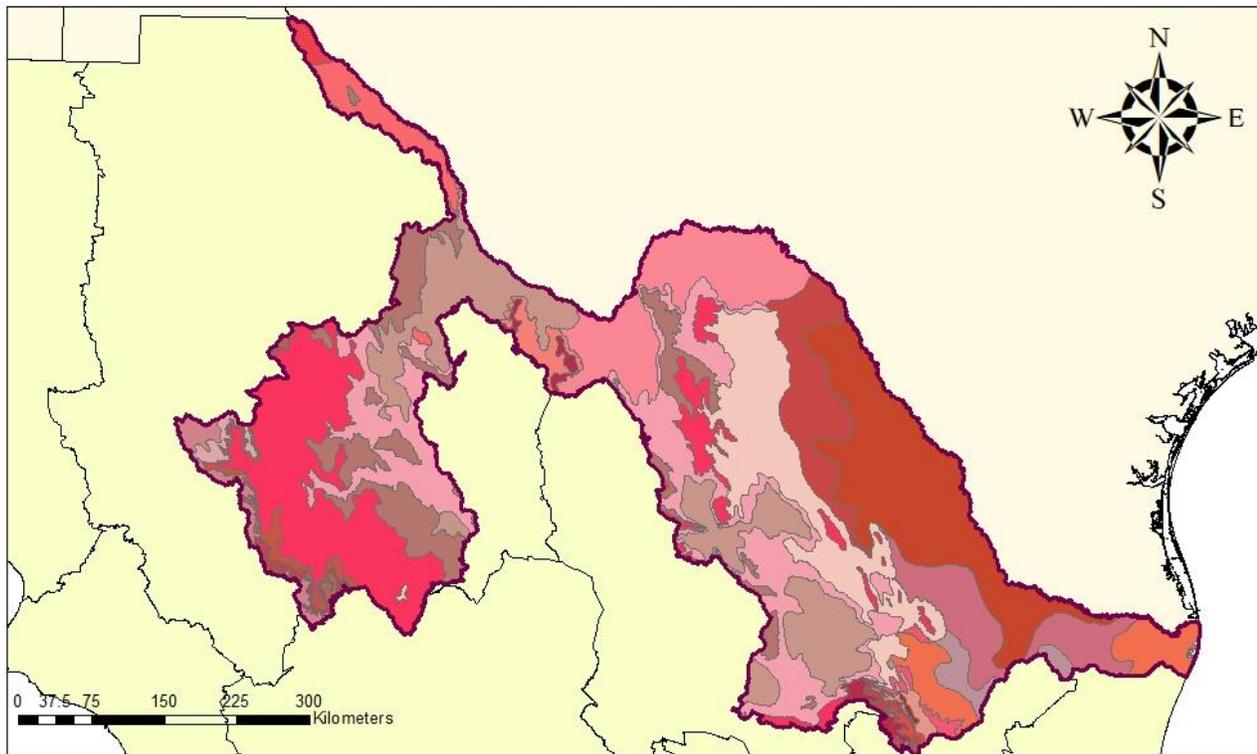
Continuación Tabla 3. Tipo de clima en la zona de estudio conforme a la clasificación de Köppen, modificada por García (García & CONABIO, 2001)

Tipo de clima	Clave	Descripción
Árido	BSo(h') (x')	Árido, cálido, temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Lluvias repartidas durante todo el año con un porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.
	BSoh(x')	Árido, semicálido, temperatura entre 18°C y 22°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Lluvias repartidas durante todo el año con un porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
	BSohw	Árido, semicálido, temperatura entre 18°C y 22°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Lluvias de verano y un porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
	BSok(x')	Árido, templado, temperatura entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C. Lluvias repartidas todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.
	BSokw	Árido, templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C. Lluvias de verano con un porcentaje de lluvia invernal entre 5% y 10.2% del total anual.
Muy árido	BWh(x')	Muy árido, semicálido, temperatura media anual entre 18°C y 22°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Lluvias repartidas durante todo el año y un porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.
	BWhw	Muy árido, semicálido, temperatura media anual entre 18°C y 22°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Lluvias de verano y un porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
	BWk(x')	Muy árido, templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C. Lluvias repartidas durante todo el año y precipitación invernal mayor al 18% del total anual.
	BWkw	Muy árido, templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.



Continuación Tabla 3. Tipo de clima en la zona de estudio conforme a la clasificación de Köppen, modificada por García (García & CONABIO, 2001)

Tipo de clima	Clave	Descripción
Templado	C(w1)	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
	C(w1) x'	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.
	C(wo)	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual.
	C(wo)x'	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.
Semifrío	Cb'(w1)	Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal del 5 al 10.2% del total anual.
	Cb'(w1) x'	Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.
	Cb'(w2)	Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.
	Cb'(w2) x'	Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.



Simbología

RH 24 Bravo-Conchos	CLIMA_TIPO	(A)C(wo)x'	BS1hw	BSo(h')(x')	BSokw	BWkw	C(wo)x'	Cb'(w2)x'	Estados Unidos de América
(A)C(w1)	BS1(h')(x')	BS1k'w	BSo(h)(x')	BWh(x')	C(w1)	Cb'(w1)	Cb'(w1)x'	México	
(A)C(w2)	BS1(h)w	BS1k(x')	BSohw	BWhw	C(w1)x'	Cb'(w1)x'			
(A)C(wo)	BS1h(x')	BS1kw	BSok(x')	BWk(x')	C(wo)	Cb'(w2)			

Figura 6. Mapa de grupos climáticos de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos. Fuente: Elaboración propia a partir de 'Climas' (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000 de México. (García & CONABIO, 2001)

3.3. HIDROGRAFÍA

El cauce principal de la zona de estudio es el río Bravo, este nace en la cordillera de las montañas Rocallosas, específicamente en las montañas San Juan en el estado de Colorado, Estados Unidos de América. A partir de su origen, fluye en dirección norte sur y atraviesa el Valle de San Luis en Nuevo México, aún en territorio estadounidense sigue su curso hasta El Paso, Texas, en donde cambia su dirección hacia el oeste, delimitando la frontera entre México y Estados Unidos de América y desembocando en el Golfo de México, aguas abajo de la ciudad de Matamoros, Tamaulipas (SEMARNAT, 2011).



El río Bravo tiene una longitud desde su nacimiento de 2,896 kilómetros, de los cuales 2,017 kilómetros corresponden a la frontera internacional y ocupan territorio de ambos países.

Los principales afluentes del río Bravo en territorio estadounidense son el río Pecos y Devil; en territorio mexicano, los afluentes principales corresponden al río Conchos, San Rodrigo, Escondido, Salado, San Diego y arroyo Las Vacas, Álamo, Santa Catarina y San Juan.

De los principales afluentes del río Bravo, los seis primeros que se mencionan se encuentran comprometidos dentro del “Tratado entre el gobierno de los Estados Unidos Mexicanos y el gobierno de los Estados Unidos de América, relativo a la distribución de las aguas internacionales de los ríos Colorado, Tijuana y Bravo desde Fort Quitman, Texas, hasta el Golfo de México firmado en 1944”, en donde le corresponden a los Estados Unidos de América un tercio del agua que llegue al cauce principal del río Bravo, que no deberá ser inferior en conjunto, en promedio y en ciclos de cinco años consecutivos a 431.721 hectómetros cúbicos (CILA, 1944).

En la Figura 7 se muestra la hidrografía de la zona de estudio.

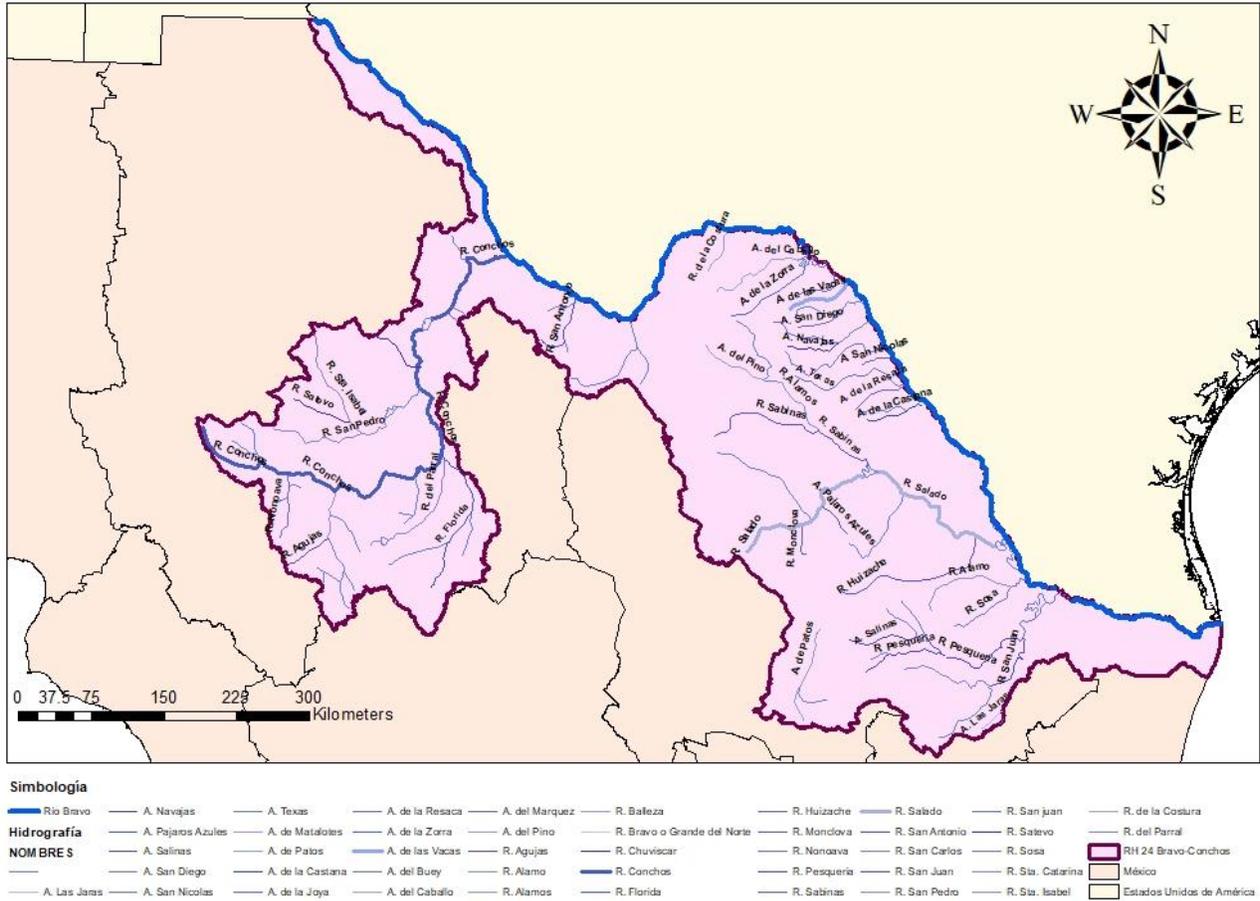


Figura 7. Mapa de la hidrografía de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos. Fuente: Elaboración propia a partir de (Maderey-R & Torres-Ruata, 1990)

3.4. FISIOGRAFÍA

En este apartado se describen las provincias fisiográficas que comprenden la zona de estudio y que se muestran en forma gráfica en la Figura 8:

- Grandes Llanuras de Norteamérica:** Los rasgos que constituyen esta provincia se presentan al norte desde Canadá y se extienden hasta el territorio mexicano. Su representación es a partir de la alternancia que existe entre llanuras y lomeríos.
- Llanura Costera del Golfo Norte:** Su forma tiende a adelgazarse en territorio mexicano hacia el sur, ya que ocupa territorio de Estados Unidos de América también. En el noreste se tienen lomeríos alternados con llanuras de manera predominante, por otra parte, al sur,



se tienen valles y llanuras de inundación que fueron formadas por el río Pánuco. Se tienen dos discontinuidades que generan una interrupción del paisaje, siendo estas las sierras de San Carlos y de Tamaulipas.

- **Sierra Madre Occidental:** Este sistema montañoso se encuentra formado por masas de material volcánico y tiene espesores de entre 500 a 1,800 metros. Su dirección es noroeste-sureste y tiene elevaciones de hasta 3,000 metros sobre el nivel del mar.
- **Sierra Madre Oriental:** Este sistema montañoso se encuentra constituido por rocas sedimentarias de origen marino principalmente, teniendo secuencias plegadas. Sus elevaciones topográficas mayores se encuentran entre Saltillo, Coahuila y Ciudad Victoria, Tamaulipas teniendo elevaciones que superan a los 3,000 metros.
- **Sierras y Llanuras del Norte:** Se encuentra constituida por sierras accidentadas de poca elevación orientadas al noroeste-sur sureste, estas están separadas por zonas de pendientes muy pronunciadas y llanuras rellenas por material aluvial. Cuenta con un drenaje interno que se denominan “bolsones”. A esta provincia pertenecen las sub provincias del Bolsón de Mapimí en el estado de Durango y Laguna de Mayrán en el estado de Coahuila.

La información descrita anteriormente fue obtenida del Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio y Protección al Ambiente de la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la Ciudad de México (PAOT, 1996).

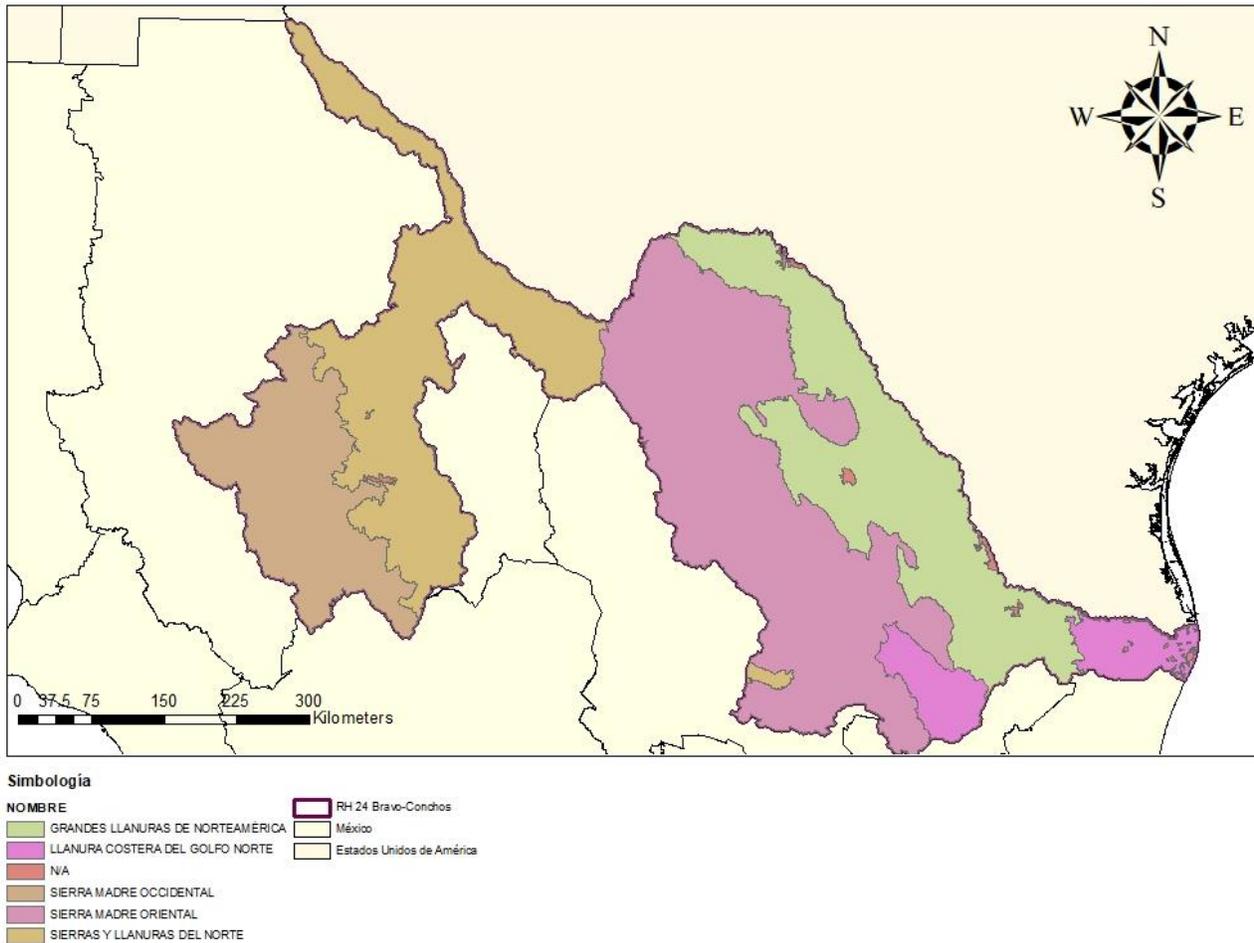


Figura 8. Mapa de la fisiografía de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos. Fuente: Elaboración propia a partir de (Cervantes-Zamora et al., 1990)

3.5. USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL

En este Apartado se describen los distintos tipos de vegetación existentes en la zona de estudio de acuerdo a la clasificación de vegetación elaborada por el INEGI y basada en las clasificaciones de (Miranda & Hernández X, 1963; Rzedowski, 1978) (Véase Figura 9):

- **Agricultura de riego:** En esta clasificación se incluyen a los diferentes métodos de riego durante el ciclo agrícola para suministrar agua a los cultivos, así como la conducción de agua por bombeo o gravedad, ya sea en conductos cerrados o a superficie libre.



- **Agricultura de riego eventual:** Se incluye a aquellos cultivos en los que la irrigación está disponible solamente en etapas de su ciclo vegetativo, ya que el líquido proviene de fuentes no seguras, por lo que se planifican riegos denominados de auxilio durante la época en que el agua está disponible en la fuente (por lo general un potencial limitado), obteniendo la mayor parte del volumen requerido de la lluvia.
- **Agricultura de temporal:** Dentro de esta clasificación se incluyen aquellos cultivos que cuentan con un ciclo vegetativo en función a la temporada de lluvias, así como de la capacidad del suelo para la retención de agua.
- **Área de riego suspendido:** Superficies en las que en algún tiempo se estableció actividad agrícola de riego en cualquiera de sus formas, pero que en la actualidad no reciben agua exprofeso para dicha actividad.
- **Área sin vegetación:** Se caracterizan por encontrarse con cobertura vegetal nula o con una densidad considerablemente baja, situación que se determina por las condiciones climáticas o por deforestación causada por efectos antrópicos.
- **Área urbana:** Corresponden a las zonas urbanizadas que no cuentan con vegetación.
- **Bosque bajo-abierto:** Esta clasificación se encuentra formada por árboles con alturas que oscilan entre los 4 a los 8 metros de altura, mismos que cuentan con una distribución espaciada en donde quedan grandes espacios conformados por capas de gramíneas. Se localizan de manera representativa en zonas de transición existentes entre pastizales y bosques de encino, de igual forma, pueden encontrarse en zonas bajas de la Sierra Madre Occidental en su área norte.
- **Bosque de encino:** Los bosques de encino pueden desarrollarse bajo distintas condiciones ecológicas ya que pueden encontrarse en elevaciones prácticamente a nivel del mar hasta elevaciones que corresponden a los tres mil metros de altura. Son característicos de zonas localizadas en los estados de Chihuahua, Sonora y Durango.



- **Bosque de encino-pino:** Esta clasificación se encuentra distribuida de manera principal en las zonas montañosas de México. El clima propicio para el desarrollo de esta comunidad vegetal son aquellos del grupo templado, semifrío, cálido y semi cálido y sub húmedos con lluvias en la temporada de verano. Su proporción es mayormente de encinos y en menor cantidad, pinos (INEGI, 2017a).
- **Bosque de galería:** Los bosques de galería se ubican en las bermas de los cauces en donde se cuentan con condiciones de humedad propicias y favorables para su desarrollo. Se destacan los que se conforman por especies de sauces, álamos, fresnos y sicomoros, de igual forma, se tienen bosques de galerías más frecuentes conformados por especies de sabino o ahuehuete.
- **Bosque de oyamel:** Su clima propicio para desarrollo son los semifríos y húmedos con altitudes del orden de entre los 2000 y 3400 msnm. Se desarrollan de manera principal en el Eje Neovolcánico o en las cadenas montañosas del país. Tienen un alto nivel comercial debido a la obtención de celulosa.
- **Bosque de pino:** Este grupo se desarrolla en altitudes del orden de entre los 300 metros y los 4200 metros sobre el nivel del mar. Su valor económico es alto debido a que corresponden a una de las especies con mayor aprovechamiento forestal en el país.
- **Bosque de pino-encino:** Corresponde a la comunidad vegetal que ocupa la mayor superficie forestal en los sistemas montañosos de México.
- **Bosque de táscate:** Esta clasificación se encuentra conformada por árboles cuyas hojas tienen forma de escamas, siendo las especies principales el táscate, enebro y cedro. El clima propicio para su desarrollo es aquel sub cálido, templado o semi frío.
- **Chaparral:** Se conforma por arbustos con alta resistencia al fuego. Su localización es predominante en zonas con condiciones áridas y semi áridas y suelen encontrarse por arriba del nivel de zonas con matorrales en las laderas de los cerros.



- **Matorral desértico micrófilo:** Este matorral es el de mayor ocupación en zonas áridas y semi áridas. Se encuentra conformado por arbustos de hojas pequeñas. Pueden contar con espinas o no, de igual forma pueden encontrarse mezclados.
- **Matorral desértico rosetófilo:** Comunidad vegetal conformado por arbustos con hojas en forma de roseta, pueden tener espinas o no y no cuentan con un tallo desarrollado. El suelo propicio para su desarrollo es generalmente el xerosol que se localiza en las laderas de cerros. A esta vegetación se le pueden dar diversos usos como fibras vegetales que se utilizan para la coredeleería y jarciciería, de igual forma pueden ser utilizados para elaborar bebidas o para alimento para ganado.
- **Matorral espinoso tamaulipeco:** Se localiza principalmente en la Gran Llanura de Norteamérica y Llanura Costera del Golfo Norte. Predominan especies con espinas.
- **Matorral submontano:** Esta comunidad vegetal tiene desarrollo entre matorrales áridos y bosques de encino. Resulta ser una comunidad arbustiva con densidad alta.
- **Mezquital:** Se encuentran conformados por mezquites mezclados con huizaches. Su distribución es característica de zonas semiáridas, principalmente sobre superficies aluviales con drenaje deficiente.
- **Pastizal halófilo:** Comunidad vegetal conformada por gramíneas, se encuentra en suelos con características salino-sódicas. Puede desarrollarse en múltiples climas y se puede encontrar regularmente en cuencas endorreicas de zonas áridas.
- **Pastizal-huizachal:** Dentro de esta clasificación se asocian especies graminoides y de huizache. Su desarrollo predomina en terrenos con pendientes bajas o casi nulas en las zonas del centro y norte de México debido a temperaturas más elevadas.
- **Pastizal inducido:** Es el tipo de pastizal que se desarrolla una vez que la cobertura vegetal original ha sido desplazada a causa de desmontes.
- **Pastizal cultivado:** Es el que se establece y conserva intencionalmente en una zona mediante actividades de cultivo y manejo.



- **Pastizal natural:** Este tipo es endémico de zonas áridas y su ocurrencia es debida a interrelaciones del clima, suelo y biotas inherentes. Se establece en topofomas con pendientes medias o bajas, como las que se encuentran en la cuenca del Río Bravo-Conchos.
- **Selva mediana caducifolia:** Guarda una gran relación con selvas bajas caducifolias y medianas subcaducifolias. Su localización es principalmente en la vertiente del Pacífico y en la parte central del estado de Yucatán.
- **Vegetación de desiertos arenosos:** Este tipo de grupo vegetal se encuentra conformado por arbustos dispersos sobre terrenos desérticos. Ocupan grandes zonas áridas de los estados de Chihuahua, Coahuila, Sonora y Baja California.
- **Vegetación de dunas costeras:** Se encuentra conformada por especies que funcionan como fijadoras de arena, evitando de esta forma la erosión eólica e hídrica. Se destacan especies como el nopal, la riñonina, alfombrilla y verdolaga, de igual forma pueden encontrarse ciertas gramíneas.
- **Vegetación gipsófila:** Este tipo de vegetación se desarrolla principalmente en suelos con alto contenido de yeso en zonas áridas y semi áridas.
- **Vegetación halófila:** Se encuentra constituida por vegetación arbustiva o herbácea con capacidad de desarrollarse en suelos altamente salinos. Su localización es principalmente en las cuencas bajas endorreicas de zonas áridas y semi áridas, de igual forma, puede encontrarse en áreas de marismas o en lagunas costeras. Se destacan especies como el chamizo o costilla de vaca y pastos halófilos, los cuales se utilizan como forraje para ganado.

La información descrita anteriormente fue obtenida de la Guía para la interpretación de cartografía uso de suelo y vegetación (INEGI, 2017a) y del Informe de la Situación General en



Materia de Equilibrio y Protección al Ambiente de la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la Ciudad de México (PAOT, 1996).

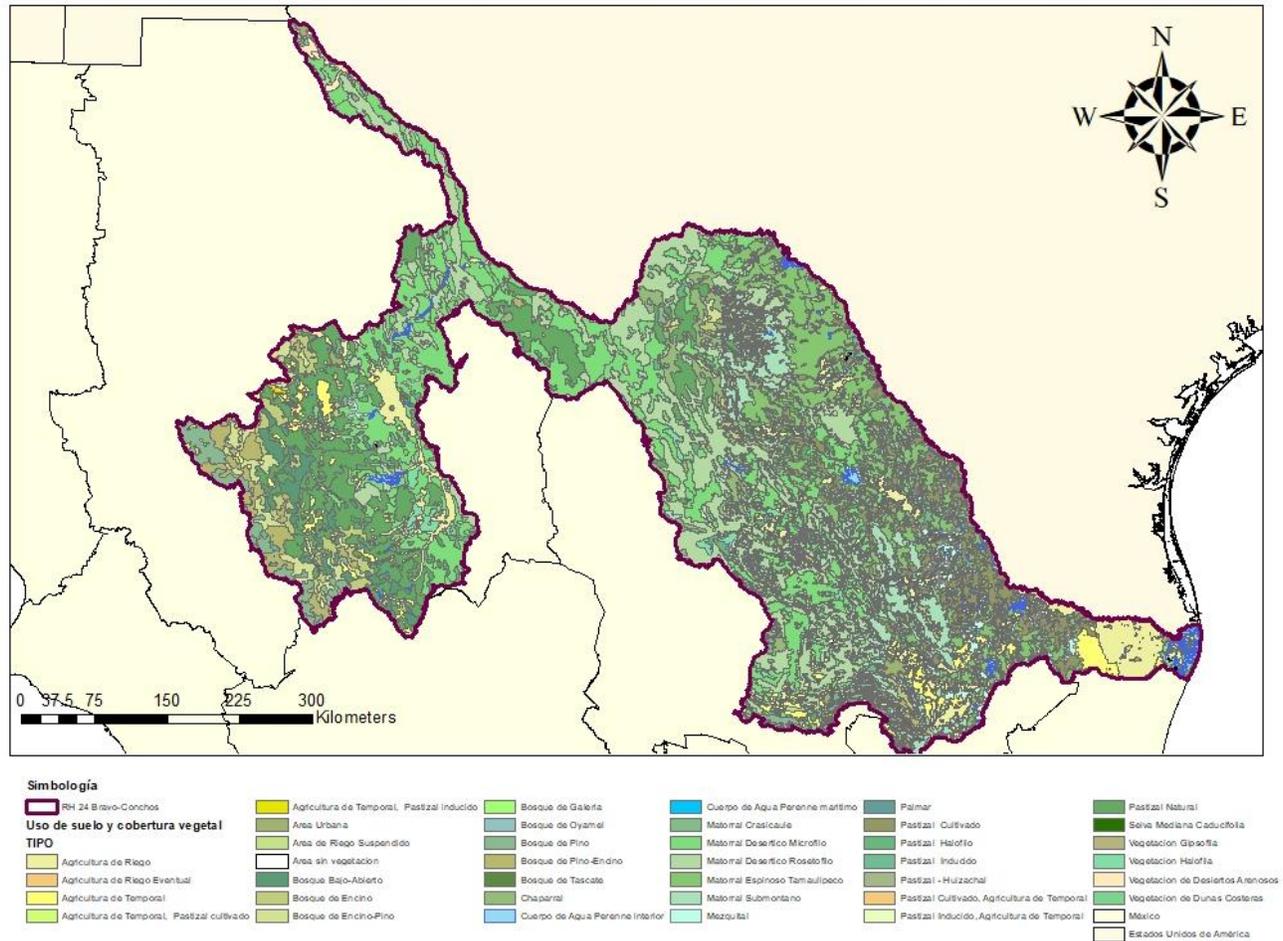


Figura 9. Mapa de uso de suelo y cobertura vegetal de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos. Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 2016)

3.6. EDAFOLOGÍA

La zona de estudio, por su gran extensión territorial (Véase Figura 10), presenta una gran variedad de unidades edafológicas cuyas características generales son:

- **Cambisol (cálcico, crómico, éutrico, vértico):** Las características de este suelo guardan semejanza con el material que permite su origen. Suelen tener poca profundidad debido a que no son suelos muy desarrollados. Su color es de tonalidades claras a causa de la intemperización.



- **Castañozem (háptico, cálcico, lúvico):** Son suelos con horizontes de alrededor de 70 centímetros de profundidad; cuentan con una capa superior de tonalidades rojizas oscuras. Este tipo de suelo es altamente rico en contenido de materia orgánica y nutrientes. Cuenta con una susceptibilidad a la erosión moderada.
- **Chernozem cálcico:** Presentan alcalinidad y son característicos de las zonas áridas y de transición a climas con mayor precipitación. En áreas naturales conservadas presentan pastizal con intercalaciones de matorral, como en el estado de Tamaulipas y norte de Veracruz. Por lo general, el espesor de este suelo supera los 80 cm, con una capa superior de color negro, debido al contenido de materia orgánica y nutrientes entremezclado con caliche que observa nulo o bajo grado de cementado en el subsuelo; son suelos medianamente afectados por la erosión.
- **Feozem (calcárico, háptico):** Son suelos que se pueden presentar en cualquier clima y cualquier tipo de topografía a excepción de zonas tropicales o altamente desérticas. Se caracteriza por ser el cuarto tipo de suelo con mayor superficie ocupada en México. Su capa superficial es rica en materia orgánica y nutrientes, asemejándose a los Chernozems y Castañozems, exceptuando capas con alto contenido de cal con los que cuentan estos.
- **Fluvisol (calcárico, éutrico, gleyico):** Este tipo de suelo se encuentra conformado por materiales productos del arrastre hídrico. Su estructura es débil ya que se pueden encontrar sueltos con capas de mediana profundidad. Su presencia es en todos los climas del país y se localizan principalmente en las cercanías de ríos y arroyos. Propician comunidades vegetativas conformadas por ahuehuetes, ceibas y sauces.
- **Litosol:** Es el tipo de suelo más abundante en México ya que cada 22 de 100 hectáreas corresponden a litosol. Su nombre hace alusión a que es un suelo de piedra, con profundidades mínimas de alrededor de 10 centímetros mismas que permiten el encuentro de lecho rocoso inmediatamente. Su susceptibilidad a la erosión y la



fertilidad con la que cuentan estos suelos depende de las condiciones medio ambientales de su entorno.

- **Luvisol (crómico, vértico):** Este tipo de suelo cuenta con una alta susceptibilidad a la erosión. Su conformación es debida a la acumulación de arcillas y se localiza en zonas templadas o tropicales con altos regímenes de lluvias, de igual forma, es posible encontrarlos en los estados de Durango y Nayarit, al extremo sur de la Sierra Madre Occidental.
- **Planosol (éutrico, mólico):** Su desarrollo se da en superficies planas en donde en temporadas de lluvia puedan ser inundados. Su profundidad es media con espesores del orden de entre los 50 y 100 centímetros. Se pueden encontrar en climas templados y semi áridos y cuentan con alta susceptibilidad ante la erosión, intensificándose esta en sus capas superficiales.
- **Regosol (calcárico, éutrico):** Son suelos muy pobres en su contenido de materia orgánica con características altamente similares a las estructuras rocosas que le dan origen. Su desarrollo es de poca longitud por lo que sus capas no pueden ser diferenciadas fácilmente. Su consistencia es suelta por lo que conforman una capa de material que cubre las rocas de manera muy superficial. En relación a su extensión, son el segundo tipo de suelo más abundante en el país. Se encuentran relacionados con superficies cubiertas por litosoles. La subunidad del regosol que se ubica en la cuenca se refiere a suelos ligeramente ácidos o alcalinos y fértiles.
- **Rendzina:** Suelos arcillosos poco profundos que se encuentran en climas semiáridos, tropicales y templados. El estrato superior contiene materia orgánica abundante, lo que define su fertilidad y suprayace sobre rocas o materiales de origen sedimentarios.
- **Solonchak (gleyico, órtico):** Se desarrollan en zonas donde existe acumulación de salitre lo que ocasiona un alto contenido de sales en algunas o todas las partes que lo



conforman. La vegetación característica de este tipo de suelo es aquella que tolera altas concentraciones de sal como los pastizales o vegetación halófila.

- **Solonetz órtico:** Este tipo de suelo se conforma por una estructura de conformación prismática en forma de columna y cuentan con un alto contenido de sodio.
- **Vertisol (crómico, pélico):** Estos suelos son autoabonados, ricos en arcilla. Se localizan principalmente en Guanajuato, Michoacán, Tamaulipas y Veracruz.
- **Xerosol (cálcico, háptico, lúvico):** Son el tercer tipo de suelo más abundante en el país. Cuentan con bajo contenido de materia orgánica y su vegetación natural son los matorrales o pastizales. Se pueden encontrar subsuelos con contenidos de arcillas altos debajo de las primeras capas. Es posible que en ocasiones presenten aglomeraciones de cal, cristales de yeso y caliche. En el estado de Chihuahua es común su uso pecuario.
- **Yermosol (cálcico, gypico, háptico, lúvico):** Guarda semejanza con el xerosol diferenciándose entre ellos el contenido de materia orgánica.

La información descrita anteriormente fue obtenida de la Guía para la interpretación de cartografía edafología (INEGI, 2010) y del Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio y Protección al Ambiente de la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la Ciudad de México (PAOT, 1996).

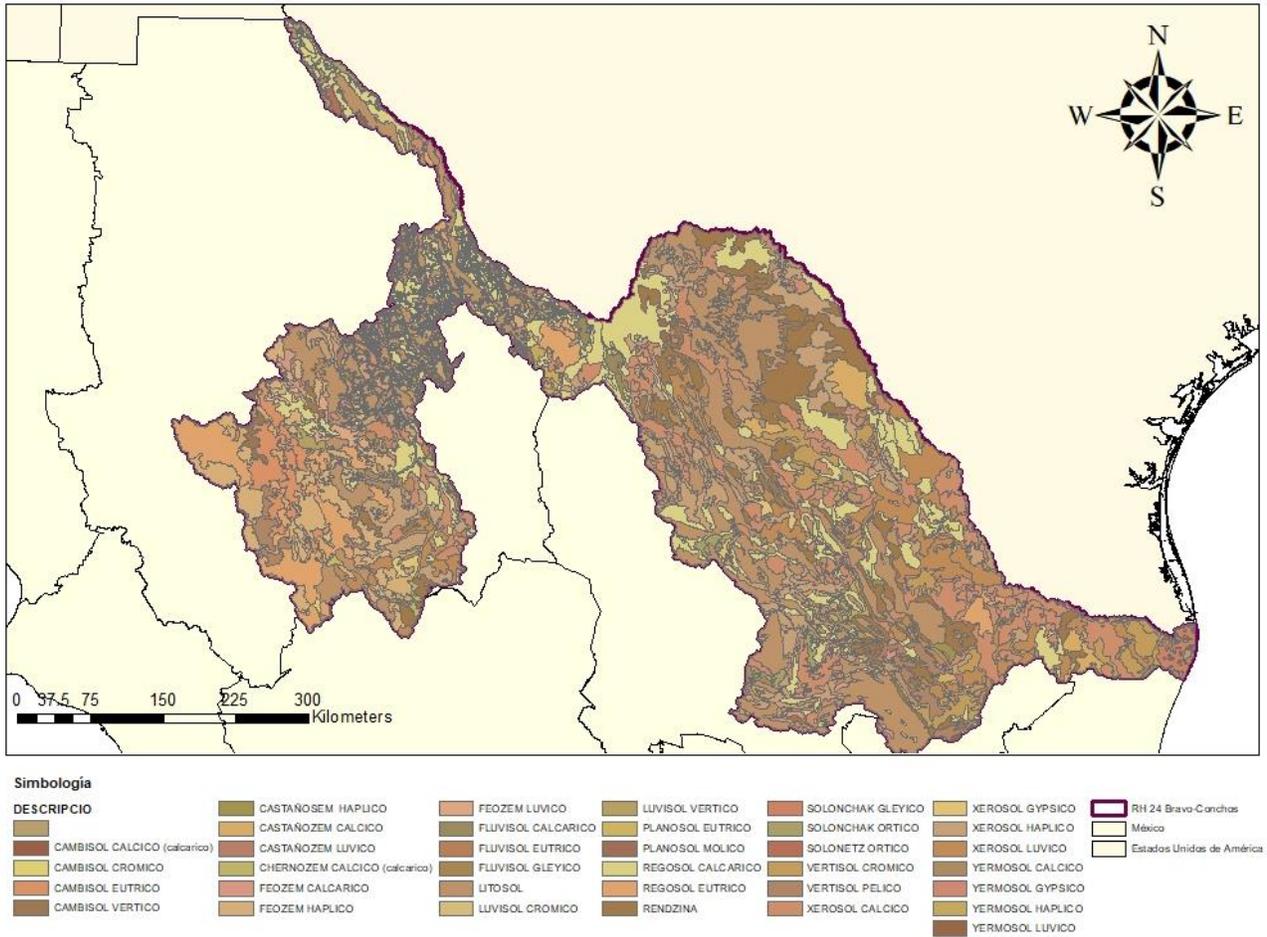


Figura 10. Mapa de edafología de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos. Fuente: Elaboración propia a partir de (INIFAP & CONABIO, 2001)

3.7. PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS BÁSICOS

La Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos es una cuenca binacional que se comparte entre México y Estados Unidos de América y cuenta con una superficie total de 457,275 km², de los cuales, 226,275 km² corresponden a territorio mexicano y 231,000 km² a territorio estadounidense (Martínez-Austria, 2018).

En la zona de estudio, que es la parte de la cuenca que compete a territorio mexicano, esta se divide en cuatro subregiones hidrológicas:

- **Alto Bravo:** Del río Bravo, desde el límite internacional en Ciudad Juárez hasta la incorporación del río Conchos en el municipio de Ojinaga, Chihuahua.



- **Seis Tributarios:** Incluye la cuenca del río Conchos hasta su confluencia con el río Bravo, y en la parte este, la cuenca del arroyo Las Vacas, río San Diego, río San Rodrigo, río Escondido, río Sabinas, río Nadadores y río Salado.
- **Medio Bravo:** Corresponde al área de aportación del río Bravo aguas abajo de su confluencia con el río Conchos hasta la presa Internacional Falcón.
- **Bajo Bravo:** Corresponde al área de aportación del río Bravo desde la presa Internacional Falcón hasta la estación hidrométrica Matamoros en la desembocadura en el Golfo de México.

Dentro de las subregiones hidrológicas descritas anteriormente, se encuentran 37 cuencas hidrológicas que tienen sus puntos de cierre en los puntos de control hidrológico que se ubican en la zona (Véase Figura 11), tal y como estaciones hidrométricas y embalses Las 37 cuencas se enlistan a continuación conforme la publicación oficial (SEMARNAT, 2011):

- **Río Florido 1:** Desde el origen del río Florido hasta la presa San Gabriel. Tiene una superficie de 1,467.99 km².
- **Río Florido 2:** Desde la presa San Gabriel hasta la estación hidrométrica San Antonio. Tiene una superficie de 1,279.35 km².
- **Río Florido 3:** Desde la estación hidrométrica San Antonio hasta la estación hidrométrica Jiménez. Tiene una superficie de 4,922.29 km².
- **Río Parral:** Desde el origen del río Parral hasta la estación hidrométrica Búfalo. Tiene una superficie de 1,625.46 km².
- **Río Balleza:** Desde el origen del río Balleza hasta la estación hidrométrica Llanitos. Tiene una superficie de 1,188.09 km².
- **Río Conchos 1:** Desde el límite municipal entre Balleza, Chihuahua y Ocampo, Durango hasta la presa La Boquilla. Tiene una superficie de 19,626.52 km².
- **Río San Pedro:** Desde el origen del río San Pedro hasta la presa Francisco I. Madero. Tiene una superficie de 10,650.94 km².



- **Río Conchos 2:** Desde las estaciones hidrométricas Búfalo y Jiménez y las presas La Boquilla y Francisco I. Madero hasta la estación hidrométrica Las Burras. Tiene una superficie de 10,855.15 km².
- **Río Chuvíscar:** Desde el origen del río Chuvíscar hasta la presa Chihuahua. Tiene una superficie de 419.54 km².
- **Río Conchos 3:** Desde la estación hidrométrica Las Burras y la presa Chihuahua hasta la presa Luis L. León. Tiene una superficie de 6,565.97 km².
- **Río Conchos 4:** Desde la presa Luis L. León hasta la estación hidrométrica Ojinaga. Tiene una superficie de 8,726.44 km².
- **Arroyo Las Vacas:** Desde el origen del arroyo Las Vacas hasta la estación climatológica Las Vacas. Tiene una superficie de 868.37 km².
- **Río San Diego:** Desde el origen del río San Diego hasta la estación climatológica San Diego. Tiene una superficie de 2,127.59 km².
- **Río San Rodrigo:** Desde el origen del río San Rodrigo hasta la coordenada 28°52'40.71" latitud norte y 100°39'32.67" longitud oeste. Tiene una superficie de 1,907.01 km².
- **Río Escondido:** Desde el nacimiento del río Escondido hasta la estación climatológica río Escondido. Tiene una superficie de 2,870.90 km².
- **Río Sabinas:** Desde el origen del río Sabinas hasta la estación hidrométrica río Sabinas. Tiene una superficie de 17,059.47 km².
- **Río Nadadores:** Desde el origen del río Nadadores hasta la estación hidrométrica Progreso. Tiene una superficie de 21,596.50 km².
- **Río Salado:** Desde las estaciones hidrométricas Sabinas y Progreso hasta la estación climatológica Las Tortillas. Tiene una superficie de 22,927.06 km².
- **Río Bravo 1:** Desde la presa derivadora internacional Ciudad Juárez hasta la estación hidrométrica Fort Quitman. Tiene una superficie de 3,325.11 km².



- **Río Bravo 2:** Inicia en la estación hidrométrica Fort Quitman hasta la estación hidrométrica Presidio. Tiene una superficie de 3,595.13 km².
- **Río Bravo 3:** Desde el Ejido El Paradero localizado en Ojinaga, Chihuahua hasta el pico Emory en los Estados Unidos de América. Tiene una superficie de 6,099.56 km².
- **Río Bravo 4:** Se encuentra delimitada por las coordenadas 29°0'0.18'', 28°22'12.86'' y 29°49'28.49'' latitud norte y 103°30'8.52'', 103°17'19.23'' y 101°43'3.70'' longitud oeste. Tiene una superficie de 14,670.17 km².
- **Río Bravo 5:** Se encuentra delimitada por las coordenadas 29°46'40.91'' latitud norte y 101°45'32.02'' longitud oeste. Tiene una superficie de 6,472.99 km².
- **Río Bravo 6:** Desde la presa internacional La Amistad hasta la coordenada 29°21'48.99 latitud norte y 100°59'49.31'' longitud oeste. Tiene una superficie de 220.04 km².
- **Río Bravo 7:** Desde la coordenada 29°21'48.99 latitud norte y 100°59'49.31'' longitud oeste hasta la estación climatológica Jiménez. Tiene una superficie de 363.51 km².
- **Río Bravo 8:** Desde la estación climatológica Jiménez hasta la estación climatológica Piedras Negras. Tiene una superficie de 1,201.29 km².
- **Río Bravo 9:** Desde las estaciones climatológicas Piedras Negras y río Escondido hasta la coordenada 28°17'8.39'' latitud norte y 100°17'33.98'' longitud oeste. Tiene una superficie de 3,045.20 km².
- **Río Bravo 10:** Desde las coordenadas 28°17'8.39'' latitud norte y 100°17'33.98'' longitud oeste hasta la estación hidrométrica Nuevo Laredo. Tiene una superficie de 4,015.13 km².
- **Río Bravo 11:** Desde las estaciones hidrométricas Nuevo Laredo y Las Tortillas hasta la presa Internacional Falcón. Tiene una superficie de 4,174.53 km².
- **Río Álamo:** Desde el origen del río Álamo hasta la estación hidrométrica Mier. Tiene una superficie de 4,552.79 km².



- **Río Salinas:** Desde el origen del río Salinas hasta la estación hidrométrica Icamole. Tiene una superficie de 9,795.44 km².
- **Río Pesquería:** Desde la estación hidrométrica Icamole hasta la estación hidrométrica Los Herrera. Tiene una superficie de 7,761.8 km².
- **Río San Juan 1:** Desde el origen del río San Juan hasta la presa El Cuchillo. Tiene una superficie de 8,618.16 km².
- **Río San Juan 2:** Desde la estación hidrométrica Los Herrera y presa El Cuchillo hasta la estación hidrométrica Los Aldama. Tiene una superficie de 1,613.76 km².
- **Río San Juan 3:** Desde la estación hidrométrica Los Aldama hasta la estación hidrométrica Camargo. Tiene una superficie de 2,916.56 km².
- **Río Bravo 12:** Desde la presa Internacional Falcón y estación hidrométrica Mier y Camargo hasta la estación hidrométrica Anzaldúas. Tiene una superficie de 2,180.28 km².
- **Río Bravo 13:** Desde la estación hidrométrica Anzaldúas hasta la estación hidrométrica Matamoros, Golfo de México. Tiene una superficie de 7,743.09 km².

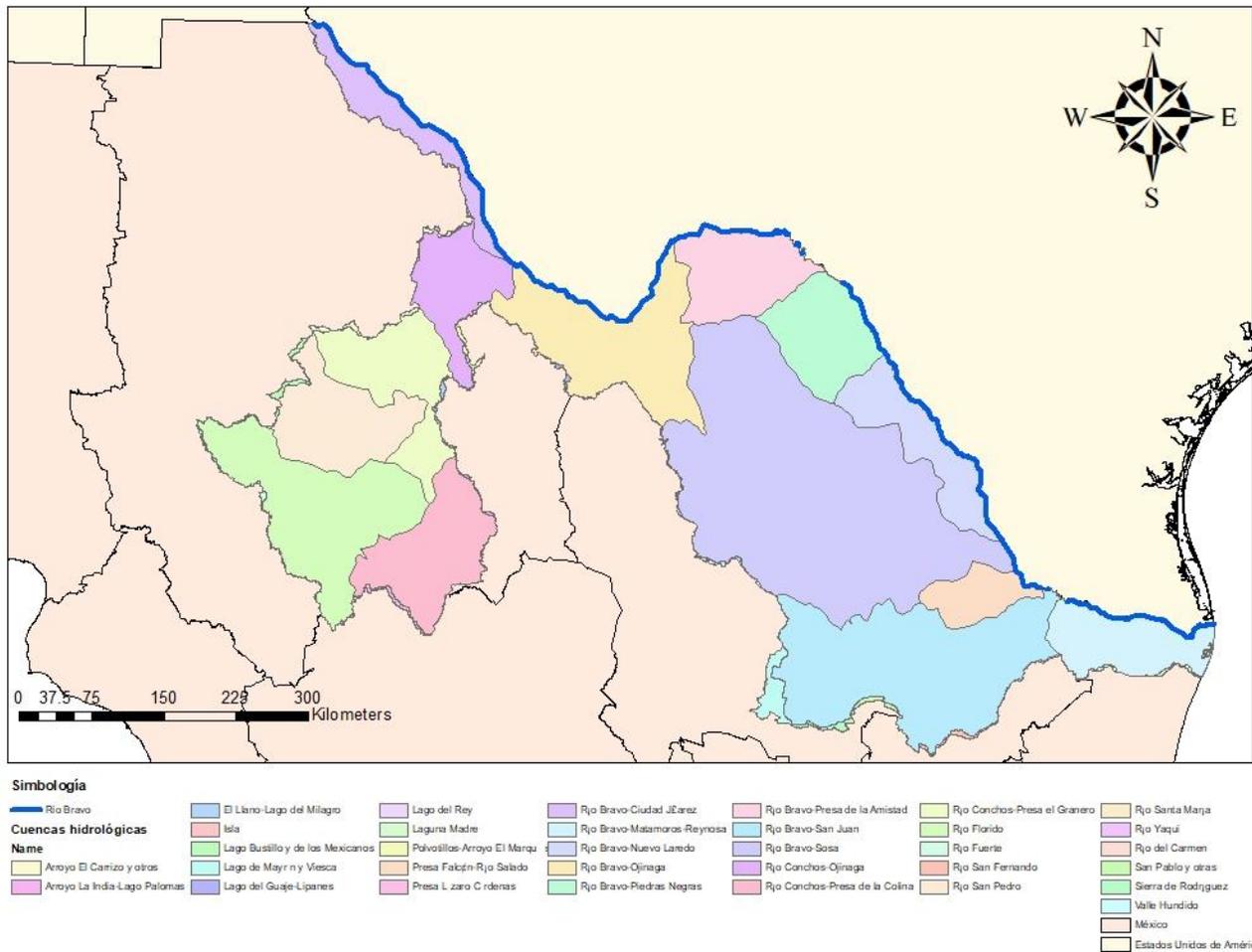


Figura 11. Mapa de cuencas hidrológicas de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos. Fuente: Elaboración propia a partir de (CONABIO, 2001)

Capítulo 4: Análisis de la acumulación de sedimentos en embalses de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos

El análisis de la acumulación de sedimentos es un aspecto fundamental para lograr un manejo sustentable de los embalses, para esto, es necesario realizar la evaluación de la información batimétrica disponible, de manera que se pueda determinar el patrón histórico de la deposición de los sedimentos, así como las tasas de aporte de sedimentos existentes, considerando que estos factores tienen implicaciones directas en la pérdida de capacidad útil, y por consecuencia, en la disponibilidad y distribución espacial de los recursos hídricos en la cuenca donde se encuentra ubicado el embalse.



Otra forma de realizar análisis de la acumulación de sedimentos en una cuenca es a partir de métodos indirectos, los cuales permiten llevar a cabo una estimación teórica de la producción de sedimentos a partir del comportamiento de la erosión del suelo, factores climáticos como la precipitación, aspectos topográficos como la pendiente y los usos de suelo y cobertura vegetal existentes.

En la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos se encuentran embalses distribuidos en los distintos estados que la ocupan. Se destacan veinte de ellos con capacidad de almacenamiento superior a los diez hectómetros cúbicos, que permiten diversos usos como el uso público urbano y doméstico, irrigación, turismo, ganadería, control de avenidas y generación de energía eléctrica; de igual manera, se encuentran embalses que permiten la regulación del recurso hídrico en la cuenca para el cumplimiento del Tratado de 1944 entre México y los Estados Unidos de América en materia de agua. Muchas de estas estructuras ya han superado su vida útil desde la fecha de terminación de su construcción a la actualidad, o bien, lo harán en unos cuantos años, situación que compromete el aprovechamiento de los recursos hídricos de la región.

Para determinar los embalses a estudiar, fue necesario realizar la búsqueda de las curvas área elevación volumen originales e información batimétrica disponible de años posteriores a su construcción, obteniendo dicha información de los nueve embalses que se describen a continuación de acuerdo a la información dentro del libro digital de Presas de México (CONAGUA & SEMARNAT, 2009), mostrando su ubicación dentro de la zona de estudio en la Figura 12 y su clasificación de acuerdo a su tipo de cuenca (cabecera, intermedia o emisión) según lo descrito en el Apartado 2.5.

Presas Federalismo Mexicano (San Gabriel)

Se encuentra ubicada en las coordenadas 26°26'09" latitud norte y 105°25'25" longitud oeste, sobre el río Florido en la localidad de Villa Ocampo, municipio de Ocampo en el estado de Durango. Se finalizó su construcción en el año 1979, teniendo el propósito de irrigar el Distrito de Riego 103 Río Florido.



Cuenta con una cuenca de 1,539 km² de superficie, la cual se considera como cuenca de cabecera debido a que no existen embalses aguas arriba. Tiene una capacidad útil de diseño de 307.84 hm³.

Presa Pico del Águila

Se encuentra ubicada en las coordenadas 26°34' latitud norte y 105°15' longitud oeste, sobre el río Florido en el municipio de Coronado, Chihuahua. Su construcción se finalizó en el año 1993, teniendo el propósito de irrigación.

Cuenta con una cuenca con una superficie de 1,525 km², que se cataloga como cuenca intermedia debido a que aguas arriba de esta presa se encuentra la presa Federalismo Mexicano (San Gabriel). Tiene una capacidad útil de diseño de 50 hm³.

Presa La Boquilla (Lago Toronto)

Se localiza en las coordenadas 27°32'39.5" latitud norte y 105°24'46.7" longitud oeste en el municipio de San Francisco de Conchos, Chihuahua, sobre el río Conchos. Su construcción inicio en el año 1910, en el período de la revolución mexicana por lo que su terminación se retrasó hasta el año 1916. Fue construida para irrigar, así como para la generación de energía eléctrica; actualmente cuenta con uso recreativo y pesca adicional a los usos originales.

Tiene una cuenca con una superficie de 21,003 km², la cual se considera cuenca de cabecera debido a que no cuenta con embalses aguas arriba. Su capacidad útil de diseño es de 3,016.4 hm³.

Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes)

Se encuentra ubicada en las coordenadas 28°9'58.55" latitud norte y 105°37'43.88" longitud oeste en el municipio de Rosales, Chihuahua, sobre el río San Pedro. Fue construida para irrigación y es utilizada para fines recreativos y pesca; su construcción finalizó en el año 1949.



Cuenta con una cuenca de 10,600 km² de superficie, la cual es una cuenca de cabecera debido a que no cuenta con embalses aguas arriba. Fue diseñada con una capacidad útil de 425 hm³.

Presa Luis L. León

Se localiza en las coordenadas 28°59'7" latitud norte y 105°16'47" en la localidad de El Pueblito, municipio de Aldama, Chihuahua, sobre el río Conchos. Sus usos principales son el de irrigación y el de control de avenidas y su construcción fue concluida en el año 1968.

La cuenca de este embalse tiene una superficie de 58,340 km² y es clasificada como una cuenca intermedia, debido a que cuenta con la presa La Boquilla y presa La Colina sobre el mismo río Conchos y las presas Francisco I. Madero, Federalismo Mexicano (San Gabriel) y Pico del Águila en dos de los afluentes del río Conchos, siendo estos el río San Pedro y el río Florido respectivamente, la presa Parral sobre el río Parral y presa Talamantes sobre el arroyo Santa Bárbara Tiene una capacidad útil de diseño de 350 hm³.

Presa Chihuahua

Se localiza en las coordenadas 28°34'18.6" latitud norte y 106°10'6.6" longitud oeste sobre el río Chuvíscar en el municipio de Chihuahua. Fue construida en el año 1960 con la finalidad de control de avenidas y abastecimiento de agua potable.

La cuenca de la presa Chihuahua tiene una superficie de 393 km² y se considera como cuenca de cabecera debido a que no cuenta con embalses aguas arriba. Tiene una capacidad útil de diseño de 33 hm³.

Presa Internacional La Amistad

Se encuentra ubicada en las coordenadas 29°26'58.4" latitud norte y 101°3'28.2" longitud oeste sobre el río Bravo en el municipio de Acuña, Coahuila. Es una obra internacional ejecutada de manera conjunta por los gobiernos de México y de los Estados Unidos de América de acuerdo a lo estipulado en el Tratado de 1944 entre ambos países. Se concluyó en el año 1968



y sus propósitos son la irrigación de 240,000 hectáreas en México, el control de avenidas, generación de energía eléctrica y uso recreativo.

Cuenta con una cuenca de 327,436 km² distribuidos en ambos países. Se considera una cuenca intermedia considerando que en su porción mexicana cuenta con los siguientes embalses aguas arriba: presa Federalismo Mexicano (San Gabriel) y presa Pico del Águila sobre el río Florido, presa Parral sobre el río Parral, presa Talamantes sobre el arroyo Santa Bárbara, presa La Boquilla, presa La Colina y presa Luis L. León sobre el río Conchos, presa Francisco I. Madero sobre el río San Pedro, presa Chihuahua sobre el río Chuvíscar, presa Noche Buena sobre el arroyo Noche Buena y presa Integración Latinoamericana sobre el arroyo Las Vetas. Cuenta con una capacidad útil de diseño de 4,462 hm³.

Presa Rodrigo Gómez (La Boca)

Se localiza en las coordenadas 25°26'45" latitud norte y 100°07'30" longitud oeste sobre el río San Juan en el municipio de Santiago, Nuevo León. Su construcción concluida en el año 1961 tuvo la finalidad de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Monterrey y su área metropolitana, considerando de igual manera irrigación y uso industrial.

Su cuenca tiene una superficie de 266 km², siendo esta de cabecera debido a que no cuenta con embalses aguas arriba. Cuenta con una capacidad útil de diseño de 41.28 hm³.

Presa Marte R. Gómez (El Azúcar)

Se encuentra ubicada en las coordenadas 25°11'53.90" latitud norte y 98°55'42.3" longitud oeste en el municipio de Camargo, Tamaulipas sobre el río San Juan. Su uso es el de irrigación y su construcción concluyó en el año 1946.

Cuenta con una cuenca con una superficie de 32,220 km² y se considera de emisión, debido a que se encuentra en la salida del sistema hidrológico del Río Bravo y en ella se ubican dos embalses aguas arriba, la presa Rodrigo Gómez (La Boca) y la presa Solidaridad (El Cuchillo) sobre el río San Juan. Tiene una capacidad útil de diseño de 1,080 hm³.

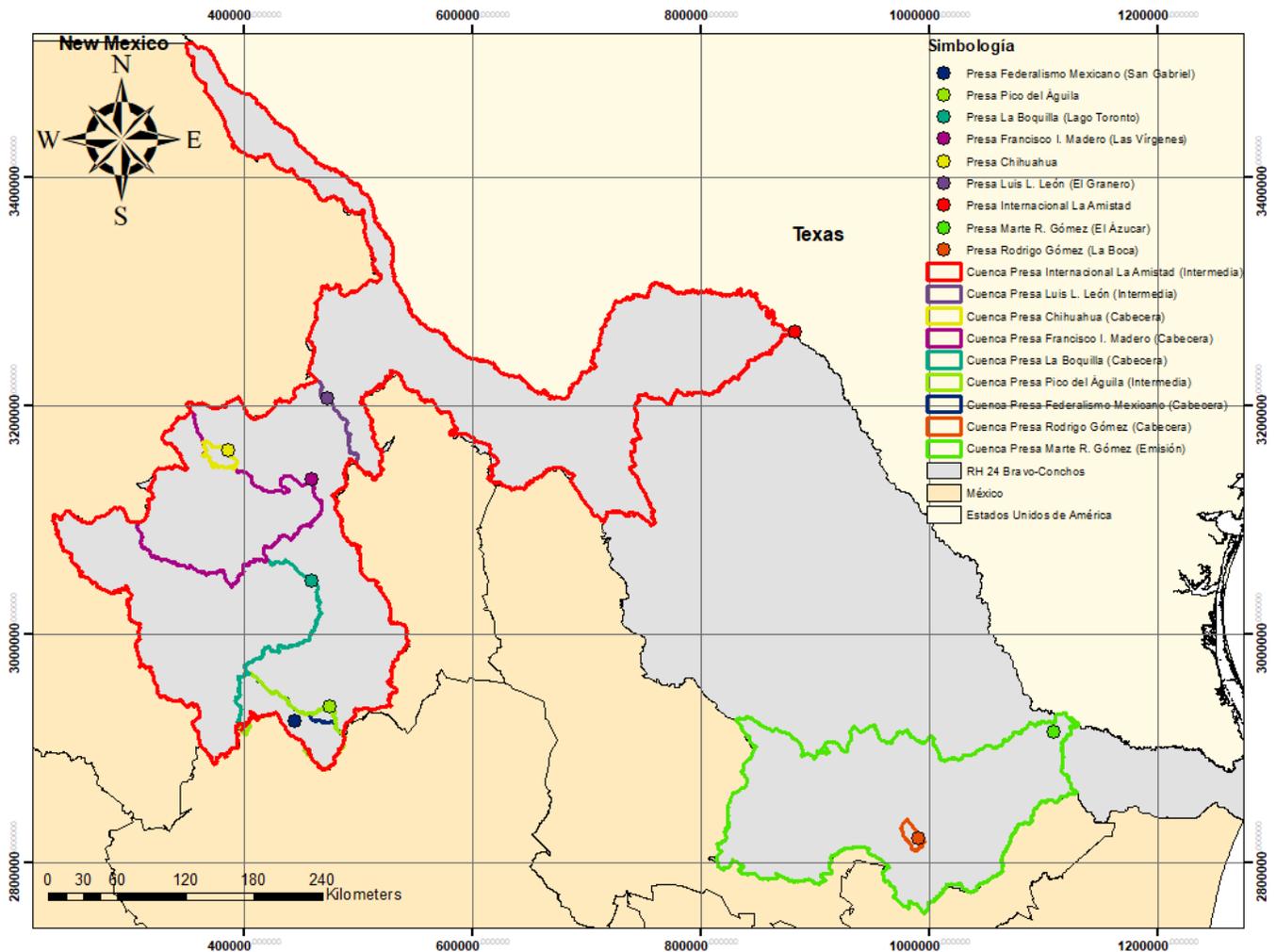


Figura 12. Mapa de localización de los embalses de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 2019)

4.1. PROCEDIMIENTO PARA ESTIMACIÓN DE ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN VASOS DE ALMACENAMIENTO MEDIANTE COMPARACIÓN DE CURVAS ÁREA ELEVACIÓN VOLUMEN

Para llevar a cabo la estimación de acumulación de sedimentos en vasos de almacenamiento mediante la comparación de curvas área elevación volumen será necesario seguir los pasos descritos a continuación:

1. La información necesaria para llevar a cabo la estimación de acumulación de sedimentos consiste en la curva área elevación volumen original del embalse estudiado y por lo menos una curva área elevación volumen generada a partir de datos de un levantamiento



batimétrico con fecha posterior, realizado por el organismo responsable de la operación del embalse con carácter oficial, en este caso, se utilizarán los datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) Dirección local Chihuahua.

2. Es necesario que los datos de las curvas área elevación volumen originales y la información batimétrica posterior se encuentre en forma tabular, en donde una columna indique la elevación de la cortina del embalse, otra columna contenga el área en hectáreas y la tercera la capacidad en hm^3 . En caso de que la curva área elevación volumen original se encuentre en formato gráfico, esta deberá ser digitalizada de manera que se obtengan los datos mencionados para representarlos en una tabla.
3. A la tabla del paso anterior, se le agrega una columna denominada “Volumen de sedimentación” con unidades en hm^3 , en donde para cada una de las elevaciones de la cortina se restará la capacidad original menos la capacidad que muestra la batimetría posterior de manera que pueda observarse cuanto volumen de azolves se ha depositado.
4. Se debe construir una tabla en donde se incluirán los siguientes datos del embalse: años del período de análisis, área de la cuenca (km^2) y volumen de capacidad útil (al nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO) (hm^3)). En esta tabla se realizan los siguientes cálculos:

4.1. Tasa anual de sedimentación al NAMO (hm^3): Se obtiene a partir de la resta realizada en el paso número 3, correspondiente a la elevación del NAMO, esta se divide entre el número de años del período analizado.

4.2. Porcentaje de pérdida sobre la capacidad útil (%): Se obtiene a partir de la relación existente entre la diferencia obtenida a la elevación del NAMO en el paso número 3 y la capacidad útil, de manera que se puede conocer qué porcentaje del volumen útil para el cual fue diseñado el embalse se ha perdido a causa de la sedimentación.



4.3. Tasa de aporte de sedimentos (AS) (m^3/km^2 -año): Será el cociente de la tasa anual de sedimentación al NAMO (TAS) entre el área de la cuenca (A_c). Se debe realizar la conversión de hm^3 a m^3 , por lo tanto, se aplicará la siguiente Ecuación:

$$AS = (TAS * 1x10^6) / A_c \quad 1$$

4.1.1. Análisis en cuencas de cabecera

4.1.1.1. Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel)

Para la presa Federalismo Mexicano (San Gabriel) se analizaron las siguientes curvas área elevación volumen:

1. Gráfica de áreas y capacidades original con fecha del año 1979 obtenida de la Memoria descriptiva de la presa Federalismo Mexicano (CONAGUA & SEMARNAT, 2009).
2. Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades por el método de curva-intervalo con fecha del año 2004 proporcionado por la Comisión Nacional del Agua Dirección Local Chihuahua (CONAGUA, 2020j).

En las Tablas 4 y 5 se muestran los resultados obtenidos siguiendo el procedimiento descrito en el Apartado 4.1.



Tabla 4. Comparación de curvas área elevación volumen de la presa Federalismo Mexicano (San Gabriel)

Comparación de curvas área elevación volumen Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel)						
Elevación (msnm)	1979		2004		Volumen de sedimentación (hm ³)	
	Área (ha)	Capacidad (hm ³)	Área (ha)	Capacidad (hm ³)		
1745	0.00	0.00	1.13	0.00	0.00	
1746	0.00	2.36	9.08	0.05	2.31	
1747	0.00	3.20	23.49	0.21	2.98	
1748	0.00	4.03	42.80	0.55	3.48	
1749	88.70	4.86	67.93	1.10	3.76	
1750	122.50	6.33	96.75	1.92	4.41	
1751	156.30	7.81	129.83	3.06	4.75	
1752	199.20	9.70	170.06	4.55	5.14	
1753	242.10	11.79	209.13	6.45	5.33	
1754	287.60	14.30	252.37	8.76	5.54	
NAMINO	1754.25	300.05	15.07	262.46	9.44	5.63
1755	337.40	17.39	292.74	11.48	5.91	
1756	387.80	21.30	334.96	14.62	6.68	
1757	434.90	25.65	374.84	18.17	7.48	
1758	472.60	30.43	415.74	22.12	8.31	
1759	512.50	31.30	458.02	26.49	4.81	
1760	562.20	36.09	501.32	31.29	4.80	
1761	631.00	42.61	549.74	36.54	6.06	
1762	716.20	49.63	610.34	42.35	7.28	
1763	820.90	57.96	677.04	48.78	9.18	
1764	920.30	66.89	746.39	55.90	10.99	
1765	1004.19	76.23	811.04	63.69	12.54	
1766	1087.90	86.39	877.28	72.13	14.26	
1767	1178.09	99.15	947.44	81.25	17.90	
1768	1277.10	111.61	1055.88	91.27	20.34	
1769	1376.20	125.56	1149.27	102.29	23.27	
1770	1485.90	141.04	1239.73	114.24	26.80	
1771	1604.70	158.07	1333.07	127.10	30.97	
1772	1723.60	176.17	1458.27	141.06	35.11	
1773	1852.90	194.27	1571.76	156.21	38.06	
1774	1994.40	214.96	1670.60	172.42	42.54	
1775	2129.80	236.41	1777.71	189.66	46.75	
1776	2265.30	257.86	1876.43	207.93	49.93	
1777	2400.87	284.17	1975.54	227.19	56.97	
NAMO	1777.9	2522.80	307.84	2077.20	245.43	62.41
1778	2536.30	310.47	2096.19	247.52	62.95	
1779	2671.90	339.05	2214.66	269.07	69.97	
1780	2807.40	370.13	2320.38	291.75	78.38	
1781	2942.80	403.65	2444.76	315.57	88.08	
1782	3078.20	437.90	2562.56	340.61	97.29	
1783	3213.60	465.16	2676.66	366.81	98.35	
NAME	1783.39	3266.41	480.00	2724.36	377.34	102.66
1784	3349.00	490.48	2816.61	394.24	96.24	



Tabla 5. Estimación de acumulación de sedimentos en el vaso de almacenamiento de la presa Federalismo Mexicano (San Gabriel)

Presa Federalismo Mexicano, San Gabriel (1979-2004)		
Años de análisis	25	años
Área de la cuenca	1539	km ²
Capacidad útil	307.84	hm ³
Porcentaje de pérdida sobre capacidad útil	20.27%	%
Tasa anual de sedimentación al NAMO	2.496	hm ³ /año
Tasa de aporte de sedimentos	1622.061	m ³ /km ² -año

4.1.1.2. Presa La Boquilla (Lago Toronto)

Para la presa La Boquilla (Lago Toronto) se analizaron las siguientes curvas área elevación volumen:

1. Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades por el método de curva-intervalo con fecha del año 1942 proporcionado por la Comisión Nacional del Agua Dirección Local Chihuahua (CONAGUA, 2020f).
2. Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades por el método de curva-intervalo con fecha del año 2004 proporcionado por la Comisión Nacional del Agua Dirección Local Chihuahua (CONAGUA, 2020g).

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos siguiendo el procedimiento descrito en el Apartado 4.1. La comparación de curvas área elevación volumen de la presa La Boquilla (Lago Toronto) puede ser consultada dentro del Anexo electrónico: Comparación de curvas área elevación volumen.



Tabla 6. Estimación de acumulación de sedimentos en el vaso de almacenamiento de la presa La Boquilla (Lago Toronto)

Presa La Boquilla-Lago Toronto (1942-2004)		
Años de análisis	62	
Área de la cuenca	21003	km ²
Capacidad útil	3016.4	hm ³
Porcentaje de pérdida sobre capacidad útil	10.52%	%
Tasa anual de sedimentación al NAMO	5.12	hm ³ /año
Tasa de aporte de sedimentos	243.78	m ³ /km ² -año

4.1.1.3. Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes)

Para la presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes) se analizaron las siguientes curvas área elevación volumen:

1. Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades original con fecha del año 1948 proporcionado por la Comisión Nacional del Agua Dirección Local Chihuahua (CONAGUA, 2020b).
2. Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades por el método de curva-intervalo con fecha del año 2004 proporcionado por la Comisión Nacional del Agua Dirección Local Chihuahua (CONAGUA, 2020e).

En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos siguiendo el procedimiento descrito en el Apartado 4.1. La comparación de curvas área elevación volumen de la presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes) puede ser consultada dentro del Anexo electrónico: Comparación de curvas área elevación volumen.

Nota: La elevación original del NAMO de la presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes) era de 1237.5 m.s.n.m., pero 1998 fue sobreelevada mediante el sistema Rubber Dam que consistía en un dique de goma inflable de 3.0 m de diámetro, mismo que fue retirado 9 años después, sobre elevando el nivel 1.8 m, obteniendo una elevación de 1239.3 m.s.n.m., la cual se utilizará para fines de comparación en el presente trabajo.



Tabla 7. Estimación de acumulación de sedimentos en el vaso de almacenamiento de la presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes)

Presa Francisco I. Madero-Las Vírgenes (1948-2004)		
Años de análisis	56	
Área de la cuenca	10600	km ²
Capacidad útil	425	hm ³
Porcentaje de pérdida sobre capacidad útil	34.13%	%
Tasa anual de sedimentación al NAMO	2.59	hm ³ /año
Tasa de aporte de sedimentos	244.37	m ³ /km ² -año

4.1.1.4. Presa Chihuahua

Para la presa Chihuahua se analizaron las siguientes curvas área elevación volumen:

1. Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades original con fecha del año 1958 proporcionado por la Comisión Nacional del Agua Dirección Local Chihuahua (CONAGUA, 2020a).
2. Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades por el método de curva-intervalo con fecha del año 2004 proporcionado por la Comisión Nacional del Agua Dirección Local Chihuahua (CONAGUA, 2020d).

En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos siguiendo el procedimiento descrito en el Apartado 4.1. La comparación de curvas área elevación volumen de la presa Chihuahua puede ser consultada dentro del Anexo electrónico: Comparación de curvas área elevación volumen.

Nota: La elevación original del NAMO de la presa Chihuahua era de 1542.82 m.s.n.m., misma que fue modificada al reducir la elevación de la cresta de su vertedor en el año 1972 a la elevación 1540.82 m.s.n.m., por lo que se considerará la segunda para fines de comparación en este trabajo.



Tabla 8. Estimación de acumulación de sedimentos en el vaso de almacenamiento de la presa Chihuahua

Presa Chihuahua (1958-2004)		
Años de análisis	46	
Área de la cuenca	393	km ²
Capacidad útil	33.30	hm ³
Porcentaje de pérdida sobre capacidad útil	10.12%	%
Tasa anual de sedimentación al NAMO	0.073	hm ³ /año
Tasa de aporte de sedimentos	186.489	m ³ /km ² -año

4.1.1.5. Presa Rodrigo Gómez (La Boca)

Para la presa Rodrigo Gómez (La Boca) se analizaron las siguientes curvas área elevación volumen:

1. Funcionamiento observado de la Presa Rodrigo Gómez (La Boca), N.L. obtenido del Boletín Hidrológico Núm. 53 Región Hidrológica Núm. 24 Oriente Bajo Río Bravo con fecha del año 1961 (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1974).
2. Levantamiento topo batimétrico 2004 presa Rodrigo Gómez (La Boca) proporcionado por la Comisión Nacional del Agua Dirección Local Chihuahua (CONAGUA, 2020k).

En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos siguiendo el procedimiento descrito en el Apartado 4.1. La comparación de curvas área elevación volumen de la presa Rodrigo Gómez (La Boca) puede ser consultada dentro del Anexo electrónico: Comparación de curvas área elevación volumen.



Tabla 9. Estimación de acumulación de sedimentos en el vaso de almacenamiento de la presa Rodrigo Gómez (La Boca)

Presa Rodrigo Gómez-La Boca (1961-2004)		
Años de análisis	43	
Área de la cuenca	266	km ²
Capacidad útil	41.28	hm ³
Porcentaje de pérdida sobre capacidad útil	4.80%	%
Tasa anual de sedimentación al NAMO	0.046	hm ³ /año
Tasa de aporte de sedimentos	173.259	m ³ /km ² -año

4.1.2. Análisis en cuencas intermedias y de emisión

4.1.2.1. Presa Pico del Águila

Para la presa Pico del Águila se analizaron las siguientes curvas área elevación volumen:

1. Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades original con fecha del año 1987 proporcionado por la Comisión Nacional del Agua Dirección Local Chihuahua (CONAGUA, 2020c).
2. Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades por el método de curva-intervalo con fecha del año 2012 proporcionado por la Comisión Nacional del Agua Dirección Local Chihuahua (CONAGUA, 2020i).

En la Tabla 10 se muestran los resultados obtenidos siguiendo el procedimiento descrito en el Apartado 4.1. La comparación de curvas área elevación volumen de la presa Pico del Águila puede ser consultada dentro del Anexo electrónico: Comparación de curvas área elevación volumen.



Tabla 10. Estimación de acumulación de sedimentos en el vaso de almacenamiento de la presa Pico del Águila

Estimación de acumulación de sedimentos Presa Pico del Águila (1987-2012)		
Años de análisis	25	
Área de la cuenca	1525	km ²
Capacidad útil	50.00	hm ³
Porcentaje de pérdida sobre capacidad útil	3.98%	%
Tasa anual de sedimentación al NAMO	0.080	hm ³ /año
Tasa de aporte de sedimentos	52.197	m ³ /km ² -año

4.1.2.2. Presa Luis L. León (El Granero)

Para la presa Luis L. León se analizaron las siguientes curvas área elevación volumen:

1. Funcionamiento observado de la Presa Luis L. León. obtenido del Boletín Hidrológico No. 29 Región Hidrológica Núm. 24 (Cuenca del Bajo Río Bravo y Conchos) con fecha del año 1968 (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1976).
2. Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades por el método de curva-intervalo con fecha del año 2004 proporcionado por la Comisión Nacional del Agua Dirección Local Chihuahua (CONAGUA, 2020h).

En la Tabla 11 se muestran los resultados obtenidos siguiendo el procedimiento descrito en el Apartado 4.1. La comparación de curvas área elevación volumen de la presa Luis L. León (El Granero) puede ser consultada dentro del Anexo electrónico: Comparación de curvas área elevación volumen.



Tabla 11. Estimación de acumulación de sedimentos en el vaso de almacenamiento de la presa Luis L. León (El Granero)

Presa Luis L. León-El Granero (1968-2004)		
Años de análisis	36	
Área de la cuenca	58340	km ²
Capacidad útil	350.00	hm ³
Porcentaje de pérdida sobre capacidad útil	12.02%	%
Tasa anual de sedimentación al NAMO	1.168	hm ³ /año
Tasa de aporte de sedimentos	20.024	m ³ /km ² -año

4.1.2.3. Presa Internacional La Amistad

Para la presa Internacional La Amistad se analizaron las siguientes curvas área elevación volumen:

1. Gráfica del funcionamiento de la Presa Internacional La Amistad. obtenido del Boletín Hidrológico Núm. 34 Región Hidrológica Núm. 24 Oriente (Región del medio Bravo y río Salado) con fecha del año 1968 (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1969).
2. Tabla de elevaciones-áreas-capacidades a partir de levantamiento batimétrico de 2005 realizado por la Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y Estados Unidos Sección Mexicana proporcionado por la Comisión Nacional del Agua Dirección Local Chihuahua (CILA Sección Mexicana, 2007).

En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos siguiendo el procedimiento descrito en el Apartado 4.1. La comparación de curvas área elevación volumen de la presa Internacional La Amistad puede ser consultada dentro del Anexo electrónico: Comparación de curvas área elevación volumen.



Tabla 12. Estimación de acumulación de sedimentos en el vaso de almacenamiento de la presa Internacional La Amistad

Presa Internacional La Amistad (1968-2005)		
Años de análisis	37	
Área de la cuenca	327436	km ²
Capacidad útil	4462.00	hm ³
Porcentaje de pérdida sobre capacidad útil	9.46%	%
Tasa anual de sedimentación al NAMO	11.411	hm ³ /año
Tasa de aporte de sedimentos	34.848	m ³ /km ² -año

4.1.2.4. Presa Marte R. Gómez

Para la presa Marte R. Gómez (El Azúcar) se analizaron las siguientes curvas área elevación volumen:

1. Gráfica del funcionamiento de la Presa Marte R. Gómez. obtenido del Boletín Hidrológico Núm. 53 Región Hidrológica Núm. 24 Oriente Bajo río Bravo con fecha del año 1946 (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1974).
2. Levantamiento topo batimétrico de la Presa Marte R. Gómez del año 2007 proporcionado por la Comisión Nacional del Agua Dirección Local Chihuahua (CONAGUA, 2020).

En la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos siguiendo el procedimiento descrito en el Apartado 4.1. La comparación de curvas área elevación volumen de la presa Marte R. Gómez (El Azúcar) puede ser consultada dentro del Anexo electrónico: Comparación de curvas área elevación volumen.



Tabla 13. Estimación de acumulación de sedimentos en el vaso de almacenamiento de la presa Marte R. Gómez (El Azúcar)

Presas Marte R. Gómez-El Azúcar (1946-2007)		
Años de análisis	61	
Área de la cuenca	32220	km ²
Capacidad útil	1080.00	hm ³
Porcentaje de pérdida sobre capacidad útil	27.62%	%
Tasa anual de sedimentación al NAMO	4.890	hm ³ /año
Tasa de aporte de sedimentos	151.770	m ³ /km ² -año

4.2. MÉTODOS EMPÍRICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE APORTE DE SEDIMENTOS

Los métodos empíricos para la estimación de aporte de sedimentos son utilizados en ocasiones en donde no se tiene información batimétrica disponible en períodos de tiempo considerables. Estos pueden ser utilizados para obtener la tasa de aporte de sedimentos promedio existente en una cuenca específica. En casos en donde se disponga de información batimétrica, los métodos empíricos proporcionan una perspectiva adicional del comportamiento de los sedimentos, considerando distintas variables como la cobertura vegetal, la topografía, la precipitación, etc.

En este Apartado, se aplicarán cinco métodos empíricos distintos para cada uno de los embalses estudiados.

4.2.1. Valores promedio de aporte de sedimentos para cuencas de diferentes tamaños (Mediciones de E.U.A.)

En la Tabla 14 se muestran los valores del aporte de sedimento para cuencas de diferentes tamaños de acuerdo a mediciones realizadas en los Estados Unidos de América (Gottschalk, 1964).

Tabla 14. Aporte de sedimentos por tamaño de cuenca. Fuente: (Gottschalk, 1964)

Tamaños de cuenca (km ²)	Aporte de sedimentos (m ³ /km ² -año)
<25.9	1810
25.9 a 259.0	762
259.0 a 2590.0	481
>2590.0	238



4.2.1.1. Análisis en cuencas de cabecera

Para llevar a cabo el método de valores promedio de aporte de sedimentos para cuencas de diferentes tamaños, se realizó una tabla en donde se enlistaron los embalses con cuencas de cabecera con su área, de manera que se clasificaron en las categorías de aporte de sedimentos que indica la Tabla 14, tal y como se muestra a continuación en la Tabla 15:

Tabla 15. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de valores promedio de aporte de sedimentos para cuencas de diferentes tamaños para cuencas de cabecera

Método de valores promedio de aporte de sedimentos para cuencas de diferentes tamaños (mediciones de E.U.A.)					
Concepto	Embalses con cuencas de cabecera				
	Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel)	Presa La Boquilla (Lago Toronto)	Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes)	Presa Chihuahua	Presa Rodrigo Gómez (La Boca)
Área de la cuenca (km ²)	1539	21003	10600	393	266
Aporte de sedimentos (m ³ /km ² -año)	481	238	238	481	481

4.2.1.2. Análisis en cuencas intermedias y de emisión

Para llevar a cabo el método de valores promedio de aporte de sedimentos para cuencas de diferentes tamaños, se realizó una tabla en donde se enlistaron los embalses con cuencas intermedias y de emisión con su área, de manera que se clasificaron en las categorías de aporte de sedimentos que indica la Tabla 14, tal y como se muestra a continuación en la Tabla 16:

Tabla 16. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de valores promedio de aporte de sedimentos para cuencas de diferentes tamaños para cuencas intermedias y de emisión

Método de valores promedio de aporte de sedimentos para cuencas de diferentes tamaños (mediciones de E.U.A.)				
Concepto	Embalses con cuencas intermedias y de emisión			
	Presa Pico del Águila	Presa Luis L. León (El Granero)	Presa Internacional La Amistad	Presa Marte R. Gómez (El Azúcar)
Área de la cuenca (km ²)	1525	58340	327436	32220
Aporte de sedimentos (m ³ /km ² -año)	481	238	238	238



4.2.2. Método del USBR (*United States Bureau of Reclamation*)

El Buró de Reclamación de los Estados Unidos cuenta con una ecuación para la estimación del aporte de sedimentos basada en mediciones realizadas en varias cuencas del suroeste de los Estados Unidos de América (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1982)

$$AS = 1421.8(Ac)^{-0.229} \quad 2$$

Dónde:

AS= Aporte de sedimentos (m³/km²-año)

Ac=Área de la cuenca (km²)

4.2.2.1. Análisis en cuencas de cabecera

Tomando en cuenta la Ecuación 2 se construyó una tabla de cálculo para las cuencas de cabecera, de manera que se obtuvo el aporte de sedimentos de acuerdo al método del USBR (Véase Tabla 17).

Tabla 17. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método del USBR para cuencas de cabecera

Método del USBR (United States Bureau of Reclamation)					
Concepto	Embalses con cuencas de cabecera				
	Presas Federalismo Mexicano (San Gabriel)	Presas La Boquilla (Lago Toronto)	Presas Francisco I. Madero (Las Vírgenes)	Presas Chihuahua	Presas Rodrigo Gómez (La Boca)
Aporte de sedimentos (AS) (m ³ /km ² -año)	264.83	145.56	170.23	362.01	395.86
Área de la cuenca (Ac) (km ²)	1539	21003	10600	393	266

4.2.2.2. Análisis en cuencas intermedias y de emisión

Tomando en cuenta la Ecuación 2 se construyó una tabla de cálculo para las cuencas intermedias y de emisión, de manera que se obtuvo el aporte de sedimentos de acuerdo al método del USBR (Véase Tabla 18).



Tabla 18. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método del USBR para cuencas intermedias y de emisión

Método del USBR (United States Bureau of Reclamation)				
Concepto	Embalses con cuencas intermedias y de emisión			
	Presa Pico del Águila	Presa Luis L. León (El Granero)	Presa Internacional La Amistad	Presa Marte R. Gómez (El Azúcar)
Aporte de sedimentos (AS) (m ³ /km ² -año)	265.38	115.19	77.60	131.97
Área de la cuenca (Ac) (km ²)	1525	58340	327436	32220

4.2.3. Método de Namba

Para la estimación del aporte de sedimentos, Namba propone la siguiente ecuación (Gracia Sánchez, 1997):

$$AS = 0.292P + 0.474H - 0.118F + 2.452 \quad 3$$

Dónde:

AS: Aporte de sedimentos (m³/km²-año)

P: Precipitación media anual (mm)

H: Desnivel máximo de cotas en la cuenca (entre la más alta y la salida de la cuenca) (m)

F: Relación entre las áreas de suelo desnudo y las que cuentan con cobertura vegetal, en porcentaje

4.2.3.1. Análisis en cuencas de cabecera

Considerando la Ecuación 3, se construyó una tabla de cálculo para obtener el aporte de sedimentos para las cuencas de cabecera (Véase Tabla 19).

Los datos de precipitación media anual fueron obtenidos de la Base de Datos Climatológica Nacional (Sistema CLICOM) (CICESE, 2020); a continuación se enlistan las estaciones climatológicas que fueron utilizadas para cada uno de los embalses estudiados:

- **Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel):** 10173-San Gabriel, Durango con un período de datos de 1990 a 2012.



- **Presa La Boquilla (Lago Toronto):** 8085-La Boquilla, Chihuahua con un período de datos de 1949 a 2013.
- **Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes):** 8202-Presa Francisco I. Madero con un período de datos de 1944 a 2012.
- **Presa Chihuahua:** 8165-Chihuahua con un período de datos de 1972 a 2013.
- **Presa Rodrigo Gómez (La Boca):** 19069-La Boca, Nuevo León con un período de datos de 1972 a 2015.

El desnivel máximo de cotas se obtuvo para cada una de las cuencas de estudio considerando la elevación del nacimiento del cauce principal y la elevación del punto donde se emplaza el embalse, considerándolo como punto de salida de la cuenca, de acuerdo al Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) 3.0 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2013c).

El porcentaje de las áreas con suelo desnudo y que están cubiertas con vegetación se obtuvo a partir de la información del Apartado 3.5 en donde se muestra el uso de suelo y cobertura vegetal de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos.



Tabla 19. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de Namba para cuencas de cabecera

Método de Namba					
Concepto	Embalses con cuencas de cabecera				
	Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel)	Presa La Boquilla (Lago Toronto)	Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes)	Presa Chihuahua	Presa Rodrigo Gómez (La Boca)
Aporte de sedimentos (AS) (m ³ /km ² -año)	303.68	637.92	577.88	460.23	686.35
Precipitación media anual (P) (mm)	291.4	281.9	288.6	366.5	1053.3
Desnivel máximo de cotas en la cuenca (H) (m)	456	1167	1036.2	740	793.96
Relación entre las áreas de suelo desnudo y las cubiertas con vegetación en porcentaje (F)	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

4.2.3.2. Análisis en cuencas intermedias y de emisión

Considerando la Ecuación 3, se construyó una tabla de cálculo para obtener el aporte de sedimentos para cuencas intermedias y de emisión (Véase Tabla 20).

Los datos de precipitación media anual fueron obtenidos de la Base de Datos Climatológica Nacional (Sistema CLICOM) (CICESE, 2020); a continuación se enlistan las estaciones climatológicas que fueron utilizadas para cada uno de los embalses estudiados:

- **Presa Pico del Águila:** 10141-Canutillo, Durango con un período de datos de 1979 a 2014.
- **Presa Luis L. León:** 8049-Luis L. León, Chihuahua con un período de datos de 1964 a 2013.
- **Presa La Amistad:** 5186-Cabeceras, Coahuila con un período de datos de 1990 a 2004.
- **Presa Marte R. Gómez (El Azúcar):** 19043-Madero, Nuevo León con un período de datos de 1970 a 2015.

El desnivel máximo de cotas se obtuvo para cada una de las cuencas de estudio considerando la elevación del nacimiento del cauce principal y la elevación del punto donde se



emplaza el embalse, considerándolo como punto de salida de la cuenca, de acuerdo al Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) 3.0 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2013d).

La relación entre las áreas de suelo desnudo y las cubiertas con vegetación en porcentaje se obtuvo a partir de la información del Apartado 3.5 en donde se muestra el uso de suelo y cobertura vegetal de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos.

Tabla 20. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de Namba para cuencas intermedias y de emisión

Método de Namba				
Concepto	Embalses con cuencas intermedias y de emisión			
	Presa Pico del Águila	Presa Luis L. León (El Granero)	Presa Internacional La Amistad	Presa Marte R. Gómez (El Azúcar)
Aporte de sedimentos (AS) (m ³ /km ² -año)	379.35	758.54	526.56	717.89
Precipitación media anual (P) (mm)	295.5	294	394.5	550.9
Desnivel máximo de cotas en la cuenca (H) (m)	613.1	1414	862.68	1170

4.2.4. Método de Owen y Branson

Owen y Branson propusieron la siguiente ecuación para cuencas del oeste del estado de Colorado, E.U.A. (Branson & Owen, 1970):

$$AS = 19465 \left(\frac{H}{L}\right)^4 + 14.29Ps - 604.8$$

Dónde:

AS= Aporte de sedimentos (m³/km²-año)

H/L=Cociente entre el desnivel máximo de cotas en la cuenca (m) y la longitud total del cauce principal (m) adimensional

Ps=Porcentaje de suelo desnudo en la cuenca



4.2.4.1. Análisis en cuencas de cabecera

Para llevar a cabo el método de Owen y Branson en cuencas de cabecera se construyó una tabla de cálculo que expresa la Ecuación 4 (Véase Tabla 21).

El desnivel máximo de cotas se obtuvo para cada una de las cuencas de estudio considerando la elevación del nacimiento del cauce principal y la elevación del punto donde se emplaza el embalse, considerándolo como punto de salida de la cuenca, de acuerdo al Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) 3.0 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2013d).

La longitud de los cauces principales se obtuvo a partir de la información dentro del Apartado 3.3 en donde se muestra la hidrografía de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos.

El porcentaje de suelo desnudo en la cuenca se obtuvo a partir de la información del Apartado 3.5 en donde se muestra el uso de suelo y cobertura vegetal de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos.

Tabla 21. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de Owen y Branson para cuencas de cabecera

Método de Owen y Branson para cuencas del oeste de Estados Unidos					
Concepto	Embalses con cuencas de cabecera				
	Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel)	Presa La Boquilla (Lago Toronto)	Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes)	Presa Chihuahua	Presa Rodrigo Gómez (La Boca)
Aporte de sedimentos (AS) (m ³ /km ² -año)	-485.990234	-545.722495	-506.1193554	-90.3678571	169.625306
Cociente H/L	0.006	0.003	0.005	0.026	0.040
Desnivel máximo de cotas en la cuenca (H) (m)	456	1167	1036.2	740	793.96
Longitud del cauce principal (m)	74708	384506	204393	28000	19956
Porcentaje de suelo desnudo en la cuenca (Ps)	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%



4.2.4.2. Análisis en cuencas intermedias y de emisión

Para llevar a cabo el método de Owen y Branson en cuencas intermedias y de emisión se construyó una tabla de cálculo que expresa la Ecuación 4 (Véase Tabla 22).

El desnivel máximo de cotas se obtuvo para cada una de las cuencas de estudio considerando la elevación del nacimiento del cauce principal y la elevación del punto donde se emplaza el embalse, considerándolo como punto de salida de la cuenca, de acuerdo al Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) 3.0 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2013d).

La longitud de los cauces principales se obtuvo a partir de la información dentro del Apartado 3.3 en donde se muestra la hidrografía de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos.

El porcentaje de suelo desnudo en la cuenca se obtuvo a partir de la información del Apartado 3.5 en donde se muestra el uso de suelo y cobertura vegetal de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos.

Tabla 22. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de Owen y Branson para cuencas intermedias y de emisión

Método de Owen y Branson para cuencas del oeste de Estados Unidos				
Concepto	Embalses con cuencas intermedias y de emisión			
	Presa Pico del Águila	Presa Luis L. León (El Granero)	Presa Internacional La Amistad	Presa Marte R. Gómez (El Azúcar)
Aporte de sedimentos (AS) (m ³ /km ² -año)	-512.5672811	-562.097569	-588.560389	-517.449565
Cociente entre el desnivel máximo de cotas en la cuenca (m) y la longitud total del cauce principal (m) (H/L)	0.005	0.002	0.001	0.004
Desnivel máximo de cotas en la cuenca (H) (m)	613.1	1414	862.68	1170
Longitud del cauce principal (m)	129390	644705	1034019	260780
Porcentaje de suelo desnudo en la cuenca (Ps)	0.00%	0.08%	0.00%	0.14%



4.2.5. Fórmula Universal de Pérdida de Suelos (Universal Soil Loss Equation USLE)

Esta ecuación fue desarrollada para la predicción de pérdidas de suelo promedio anual por hectárea, debidas a erosión laminar en terrenos agrícolas. Este método permite la estimación anual de la tasa de erosión basándose en la pendiente de la cuenca, el patrón de lluvias, el tipo de suelo, la topografía, la agricultura existente y las prácticas de manejo del suelo. Fue desarrollada en 1965 por Wischmeier y Smith, y ha sufrido algunas modificaciones que permiten su aplicación a áreas de pastizal o áreas forestales (Wischmeier & Smith, 1965).

La USLE, puede servir para la selección de sistemas de uso y manejo del suelo y vegetación, así como para la predicción de los cambios esperados en las pérdidas de suelo, en función de cambios en el manejo de los recursos.

Involucra los factores descritos en la siguiente ecuación:

$$A = RKLSCP^5$$

Donde:

A: Pérdida de suelo (ton/ha/año)

R: Erosividad de la lluvia (MJ*mm/ha*hr-año)

K: Factor de erosionabilidad del suelo (ton*ha*hr/MJ*mm*ha)

S: Factor del grado de pendiente (adimensional)

L: Factor del grado de longitud de la pendiente (adimensional)

C: Factor del manejo de vegetación (adimensional)

P: Factor de prácticas mecánicas en el manejo de la vegetación agrícola (adimensional)

Se dice que se ha calculado la erosión hídrica actual cuando todos los factores dentro de la Ecuación 5 han sido considerados; en el caso de que no se incluyan C y P, se habrá calculado la erosión hídrica potencial, es decir, la cuantía de suelo que se perdería de no existir vegetación y no se llevaran a cabo actividades de conservación (Mendoza, 2013).

A continuación, se describen cada uno de los factores involucrados en la fórmula y sus criterios de selección:



- **Erosividad de la lluvia (R):** La erosividad representa la capacidad potencial con que cuentan las gotas de lluvia para causar erosión, es decir, la energía cinética de la lluvia que se necesita para que las partículas del suelo sean removidas y transportadas.

Una de las formas para determinar este factor, es el índice EI30, propuesto por Wischmeier y Smith (1965). Este resulta ser el producto de la energía cinética total de la lluvia (definida por la letra E), por la intensidad máxima de dicha lluvia en 30 minutos (I30) (Mendoza, 2013).

En México, Cortés (1991), estimó el factor R para las diferentes regiones hidrológico-administrativas del país (Figura 13), proponiendo catorce modelos de regresión a partir de datos de precipitación media anual; dichas regresiones se muestran a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 23. Ecuaciones de erosividad de la lluvia para las diferentes regiones hidrológico-administrativas de México. Fuente: (Cortés T., 1991)

Región	Ecuación	R ²
I	$R = 1.2078P + 0,002276P^2$	0.92
II	$R = 3.4555P + 0,006470P^2$	0.93
III	$R = 3.6752P - 0,001720P^2$	0.94
IV	$R = 2.8559P + 0,002983P^2$	0.92
V	$R = 3.4880P - 0.00088P^2$	0.94
VI	$R = 6.6847P + 0.001680P^2$	0.90
VII	$R = -0.0334P + 0.006661P^2$	0.98
VIII	$R = 1.9967P + 0.003270P^2$	0.98
IX	$R = 7.0458P - 0.002096P^2$	0.97
X	$R = 6.8938P + 0.000442P^2$	0.95
XI	$R = 3.7745P + 0.004540P^2$	0.98
XII	$R = 2.4619P + 0.006067P^2$	0.96
XIII	$R = 10.7427P - 0.00108P^2$	0.97
XIV	$R = 1.5005P + 0.002640P^2$	0.95

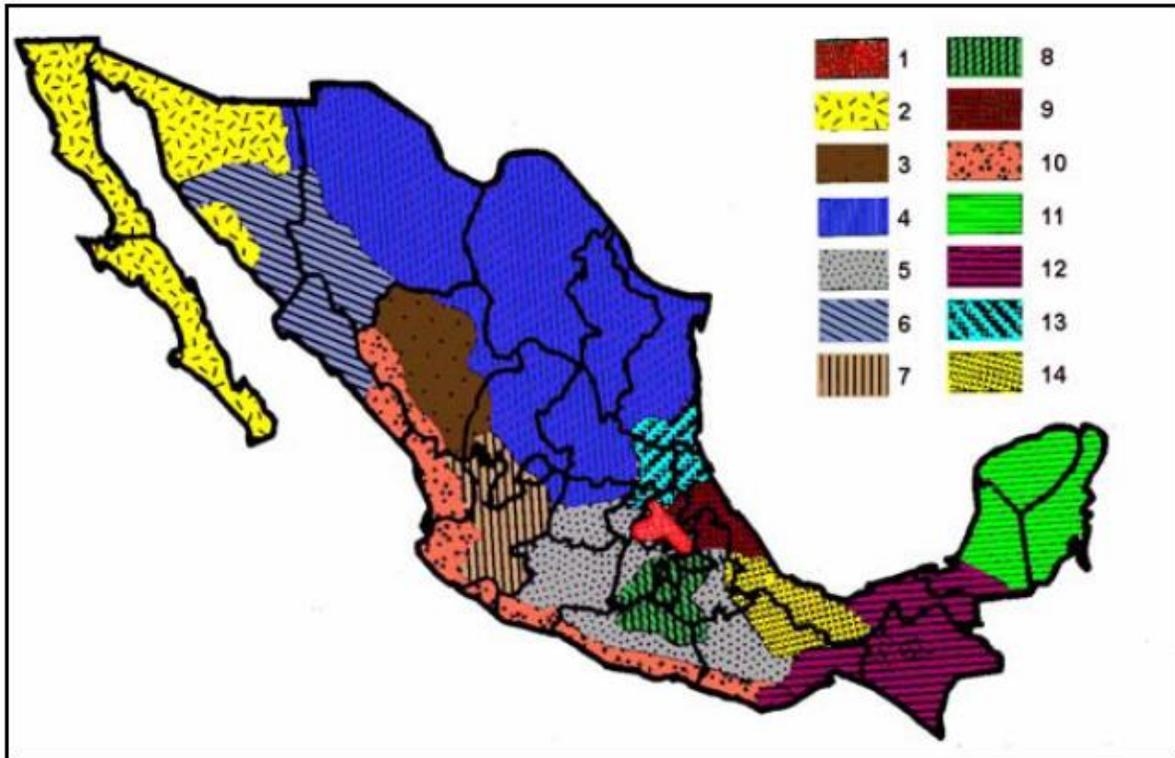


Figura 13. Regiones hidrológico-administrativas de México, donde aplican las ecuaciones de erosividad. Fuente: (Cortés T., 1991)

- **Erosionabilidad del suelo (K):** Es la susceptibilidad del suelo a erosionarse. Cuando se tiene mayor erosionabilidad, el suelo tiene limitada resistencia al efecto de los agentes erosivos. Se tienen dos categorías de las propiedades del suelo que afectan la erosionabilidad del suelo: aquellas que afectan la resistencia a la dispersión y transporte por la lluvia y el flujo en superficie y las que afectan la capacidad de infiltración y almacenamiento (Wischmeier & Smith, 1965).

La FAO propuso un método para la estimación del factor K en ocasiones donde no se cuentan con los datos de las propiedades físicas de los suelos. Este método utiliza la unidad del suelo FAO/UNESCO y la textura como parámetros para determinar K. Para llevarse a cabo, es necesario determinar la unidad de suelo o grupo de unidades de suelos asociados entre sí, obteniendo esta información de las cartas de edafología del INEGI.



Una vez realizada esta clasificación, se obtendrán los valores de K ponderados para cada tipo de suelo de las cuencas de estudio de acuerdo a la siguiente tabla (solo se incluyen los tipos de suelo que se encuentran en la zona de estudio):

Tabla 24. Valores del Factor de Erosionabilidad (K) en función de la unidad de suelo y su textura superficial. Fuente: (FAO, 1980)

Unidades y subunidades de suelo de acuerdo a la clasificación de la FAO		Textura		
Símbolo	Nombre	Gruesa	Media	Fina
B	Cambisol	0.026	0.040	0.013
C (h,k,l)	Chernozem (háplico, cálcico, lúvico)	0.013	0.020	0.007
E	Rendzina	0.013	0.020	0.007
H (c,g,h,l)	Feozem calcárico, gléyico, háplico, lúvico	0.013	0.020	0.007
I	Litosol	0.013	0.020	0.007
J	Fluvisol	0.026	0.040	0.013
L	Luvisol	0.026	0.040	0.013
R	Regosol	0.026	0.040	0.013
S	Solonetz	0.053	0.079	0.026
V (c,p)	Vertisol (crómico, pélico)	0.053	0.079	0.026
W	Planosol	0.053	0.079	0.026
X (k,h,l,g)	Xerosol (cálcico, háplico, lúvico, gypsico)	0.053	0.079	0.026
Y (h,k,l,g,t)	Yermosol (háplico, cálcico, lúvico, gypsico, takírico)	0.053	0.079	0.026
Z	Solonchak	0.053	0.079	0.026

- **Longitud (L) y grado (S) de la pendiente:** El proceso de erosión se ve afectado por la topografía del terreno y se encuentra representado por el factor LS (Mendoza, 2013). La longitud de la pendiente se define por la distancia desde el origen del escurrimiento superficial hasta el sitio en donde se modifica el grado de pendiente (INIFAP & CONAFOR, 2007).

Los factores L y S pueden calcularse a partir de la siguiente ecuación:



$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m (0.065 + 0.045s + 0.0065s^2)$$

Donde:

L: Factor de longitud de la pendiente (adimensional)

λ : Longitud de la pendiente (metros)

m: Coeficiente que depende del grado de la pendiente (Véase Tabla 25)

Tabla 25. Valores que toma m en función del grado de pendiente. Fuente: (Wischmeier & Smith, 1978)

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

- **Factor por cubierta vegetal (C):** Este factor resulta ser el de más importancia en el control de la erosión hídrica debido a que, una cobertura vegetal abundante permite la reducción de la erosión a límites aceptables.

En zonas áridas o semiáridas se tiene mayor vulnerabilidad a la erosión, debido a la remoción de la cubierta vegetal natural por pastoreo o por apertura de tierras de cultivo (INIFAP & CONAFOR, 2007).

Dentro de la USLE, el factor C se define como la relación entre las pérdidas de suelo que se producen bajo un determinado uso, bajo determinadas condiciones de manejo y las pérdidas correspondientes en ese suelo bajo condiciones de barbecho continuo. Varía de 0 a 1, considerando la unidad como un suelo completamente desnudo, sin cobertura vegetal y sin barbecho, esto quiere decir que conforme la cobertura vegetal es más abundante, el valor del factor C, disminuirá. En las Tablas 26 y 27 se muestran los valores del factor C para distintos usos de suelo.



Tabla 26. Factor de cobertura vegetal (C). Fuente: (Gracia Sánchez, 1997a)

Cubierta vegetal	Factor C
Suelo desnudo	1.0
Bosque o matorral denso, cultivos con capa gruesa de materia orgánica	0.001
Sabana, pradera en buenas condiciones	0.01
Sabana o pradera sobre pastoreada	0.1
Cultivo de desarrollo lento o siembra tardía: primer año	0.3 a 0.8
Cultivo de desarrollo rápido o siembra temprana	0.01 a 0.1
Cultivo de desarrollo lento o siembra tardía: segundo año	0.01 a 0.1
Maíz, sorgo, mijo (establecidos)	0.4 a 0.9
Arroz	0.1 a 0.2
Algodón, Tabaco (segundo ciclo)	0.5 a 0.7
Cacahuete	0.4 a 0.8
Primer año de casave y ñame	0.01
Palma, café, cacao con cubierta de cultivo	0.1 a 0.3
Piña en contorno: con residuo quemado	0.2 a 0.5
Con residuo enterrado	0.1 a 0.3
Con residuo superficial	0.2 a 0.8
Piña y siembra de relleno (pendiente 7%)	0.1
Bosque, área cubierta:	
Del 75 al 100%	0.003 a 0.011
Del 45 al 70%	0.010 a 0.040
Del 25 a 40% con residuos	0.41
Sin residuos	0.84
Zona de cultivo	0.4



Tabla 27. Valores de C que se pueden utilizar para estimar pérdidas de suelo en la USLE.
Fuente: (INIFAP & CONAFOR, 2007)

Cultivo	Nivel de productividad		
	Alto	Moderado	Bajo
Maíz	0.54	0.62	0.8
Maíz labranza cero	0.05	0.1	0.15
Maíz rastrojo	0.1	0.15	0.2
Algodón	0.3	0.42	0.49
Pastizal	0.004	0.01	0.1
Alfalfa	0.02	0.05	0.1
Trébol	0.025	0.05	0.1
Sorgo grano	0.43	0.55	0.7
Sorgo grano rastrojo	0.11	0.18	0.25
Soya	0.48		
Soya después de maíz con rastrojo	0.18		
Trigo	0.15	0.38	0.53
Trigo rastrojo	0.1	0.18	0.25
Pastizal en buenas condiciones	0.01	0.054	
Pastizal sobre pastoreado	0.1	0.22	
Maíz-sorgo, mijo	0.4 a 0.9		
Arroz	0.1 a 0.2		
Algodón, tabaco	0.5 a 0.7		
Cacahuete	0.4 a 0.8		
Palma, cacao, café	0.1 a 0.3		
Piña	0.1 a 0.3		

- **Factor por prácticas mecánicas (P):** Al utilizar prácticas mecánicas en los suelos de cultivo con pendiente, se reduce el escurrimiento y por consecuencia la cantidad de suelo que se puede transportar. Este factor constituye la relación existente entre la pérdida de suelo con una práctica de conservación a la pérdida correspondiente en un terreno bajo cultivo en el sentido de la pendiente.

Sus valores se encuentran en un rango de 0 a 1, correspondiendo los valores que tienden a la unidad, a aquellos suelos que tienen la erosión máxima debido a que el tipo de



prácticas agrícolas empleadas en esa área, no permiten la mitigación de los efectos de la agricultura en pendiente.

Los valores de P en relación a las condiciones en México, fueron adaptados por la SAGARPA en 2005, presentándose en la siguiente tabla:

Tabla 28. Valores de P que se pueden utilizar para estimar pérdidas de suelo en la USLE. Fuente (INIFAP & CONAFOR, 2007)

Práctica mecánica	Valor de P
Surcado al contorno	0.75
Surcos rectos	0.8
Fajas en 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

4.2.5.1. Análisis en cuencas de cabecera

Considerando los factores descritos dentro del Apartado 4.2.5, se construyó una tabla de cálculo para cada una de las presas con cuencas de cabecera tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- Se analizó el período que corresponde a la información batimétrica disponible para cada una de las presas tal y como se indica dentro del Apartado 4.1.
- Se utilizaron los datos de precipitación media anual de la Base de Datos Climatológica Nacional (Sistema CLICOM) (CICESE, 2020); a continuación se enlistan las estaciones climatológicas que fueron utilizadas para cada uno de los embalses estudiados:
 - **Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel):** 10173-San Gabriel, Durango en un período de 1990 a 2004.



- **Presa La Boquilla (Lago Toronto):** 8085-La Boquilla. en un período de 1950 a 2004.
 - **Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes):** 8202-Presa Francisco I. Madero en un período de 1950 a 2004.
 - **Presa Chihuahua:** 8165-Chihuahua en un período de 1961 a 2004.
 - **Presa Rodrigo Gómez (La Boca):** 19069-La Boca, Nuevo León en un período de 1972 a 2004.
- El factor de erosionabilidad K se calculó a partir de la determinación de la unidades de suelo existentes en cada una de las cuencas tal y como se presenta en la Carta de Edafología escala 1:250000 de México (INIFAP & CONABIO, 2001), asignándoles los valores que se indican en la Tabla 24 y ponderando cada uno de ellos en relación a la superficie que ocupan.
 - El factor LS se calculó a partir del cálculo de la pendiente utilizando el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) 3.0 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2013d); la longitud de la pendiente se obtuvo a partir de la información dentro del Apartado 3.3 en donde se muestra la hidrografía de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos.
 - El factor por cubierta vegetal C se calculó a partir de la determinación de los usos de suelo y cobertura vegetal tal y como se presenta en la Carta de Uso de suelo y Vegetación escala 1:250000 de las series correspondientes al período de análisis para cada uno de los embalses, asignándoles los valores que se indican en la Tablas 26 y 27 y ponderando cada uno de ellos en relación a la superficie que ocupan.
 - El factor por prácticas mecánicas P se calculó a partir de la determinación de los usos de suelo y cobertura vegetal tal y como se presenta en la Carta de Uso de suelo y Vegetación escala 1:250000 de las series correspondientes al período de análisis para cada uno de los



embalses, asignándoles los valores que se indican en la Tabla 28 y ponderando cada uno de ellos en relación a la superficie que ocupan.

- Para obtener el aporte de sedimentos a partir de la aplicación de la USLE, se obtiene la media de los valores obtenidos para cada uno de los años de análisis.
- El proceso detallado para cada una de las presas puede ser consultado dentro del Anexo electrónico: Fórmula Universal de Pérdida de Suelos.

A continuación, se muestran las tablas de cálculo para cada uno de los embalses con cuencas de cabecera.



Tabla 29. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos para la cuenca de la Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel)

Fórmula Universal de Pérdida de Suelos en la cuenca de la Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel)								
Año	Precipitación media anual (mm)	R (MJ*mm/ha*hr*año)	K (Ton/hr/MJ*mm)	LS (Adimensional)	C (Adimensional)	P (Adimensional)	A (Ton/ha-año)	A (Ton/km ² -año)
1990	813.45	4329.556	0.034	0.331	0.166	0.975	7.998	799.806
1991	581.46	2692.413	0.034	0.331	0.166	0.975	4.974	497.374
1992	220.6	784.010	0.034	0.331	0.166	0.975	1.448	144.832
1993	539.9	2433.039	0.034	0.331	0.166	0.975	4.495	449.459
1994	271.2	1004.777	0.034	0.331	0.166	0.975	1.856	185.614
1995	342.6	1342.278	0.034	0.331	0.166	0.975	2.480	247.961
1996	593.6	2770.123	0.034	0.331	0.166	0.975	5.117	511.729
1997	385.3	1558.650	0.034	0.331	0.166	0.975	2.879	287.932
1998	469.2	2015.478	0.034	0.331	0.166	0.975	3.723	372.323
1999	198.5	692.381	0.034	0.331	0.166	0.975	1.279	127.905
2000	523.4	2332.921	0.034	0.331	0.166	0.975	4.310	430.964
2001	327.5	1268.366	0.034	0.331	0.166	0.975	2.343	234.307
2002	472.1	2032.020	0.034	0.331	0.166	0.975	3.754	375.378
2003	513.8	2275.417	0.034	0.331	0.166	0.975	4.203	420.342
2004	585.4	2717.537	0.034	0.331	0.166	0.975	5.020	502.015

Aporte de sedimentos **372.529**



Tabla 30. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos para la cuenca de la Presa La Boquilla (Lago Toronto)

Fórmula Universal de Pérdida de Suelos en la cuenca de la Presa La Boquilla (Lago Toronto)								
Año	Precipitación media anual (mm)	R (MJ*mm/ha*hr*año)	K (Ton/hr/MJ*mm)	LS (Adimensional)	C (Adimensional)	P (Adimensional)	A (Ton/ha-año)	A (Ton/km ² -año)
1950	328.3	1272.247	0.034	0.459	0.076	0.987	1.498	149.849
1951	138.3	457.564	0.034	0.459	0.076	0.987	0.539	53.893
1952	256.9	940.838	0.034	0.459	0.076	0.987	1.108	110.815
1953	257	941.281	0.034	0.459	0.076	0.987	1.109	110.867
1954	281.5	1051.587	0.034	0.459	0.076	0.987	1.239	123.859
1955	336.9	1314.217	0.034	0.459	0.076	0.987	1.548	154.793
1956	153.9	516.338	0.034	0.459	0.076	0.987	0.608	60.816
1957	194.9	677.731	0.034	0.459	0.076	0.987	0.798	79.825
1958	473.8	2041.739	0.034	0.459	0.076	0.987	2.405	240.483
1959	259.7	953.261	0.034	0.459	0.076	0.987	1.123	112.278
1960	314.1	1203.914	0.034	0.459	0.076	0.987	1.418	141.801
1961	284.6	1065.799	0.034	0.459	0.076	0.987	1.255	125.533
1962	287.6	1079.607	0.034	0.459	0.076	0.987	1.272	127.160
1963	230.3	825.148	0.034	0.459	0.076	0.987	0.972	97.189
1964	253.9	927.579	0.034	0.459	0.076	0.987	1.093	109.253
1965	287.7	1080.069	0.034	0.459	0.076	0.987	1.272	127.214
1966	469.5	2017.187	0.034	0.459	0.076	0.987	2.376	237.591
1967	374.7	1503.922	0.034	0.459	0.076	0.987	1.771	177.137
1968	462.6	1978.020	0.034	0.459	0.076	0.987	2.330	232.977
1969	182.9	629.456	0.034	0.459	0.076	0.987	0.741	74.139
1970	296.8	1122.288	0.034	0.459	0.076	0.987	1.322	132.187
1971	320.9	1236.487	0.034	0.459	0.076	0.987	1.456	145.637
1972	455.6	1938.576	0.034	0.459	0.076	0.987	2.283	228.332
1973	499.7	2191.957	0.034	0.459	0.076	0.987	2.582	258.176
1974	366.3	1461.029	0.034	0.459	0.076	0.987	1.721	172.085
1975	228.8	818.749	0.034	0.459	0.076	0.987	0.964	96.435
1976	466.6	2000.691	0.034	0.459	0.076	0.987	2.356	235.648
1977	265.9	980.937	0.034	0.459	0.076	0.987	1.155	115.538
1978	462.2	1975.758	0.034	0.459	0.076	0.987	2.327	232.711
1979	206	723.150	0.034	0.459	0.076	0.987	0.852	85.175
1980	429	1791.353	0.034	0.459	0.076	0.987	2.110	210.991
1981	462.2	1975.758	0.034	0.459	0.076	0.987	2.327	232.711
1982	133.7	440.510	0.034	0.459	0.076	0.987	0.519	51.885
1983	195.4	679.761	0.034	0.459	0.076	0.987	0.801	80.064
1984	373.8	1499.306	0.034	0.459	0.076	0.987	1.766	176.593
1985	248.45	903.629	0.034	0.459	0.076	0.987	1.064	106.432



1986	284.4	1064.880	0.034	0.459	0.076	0.987	1.254	125.425
1987	212.5	750.088	0.034	0.459	0.076	0.987	0.883	88.348
1988	251	914.813	0.034	0.459	0.076	0.987	1.077	107.750
1989	177.2	606.826	0.034	0.459	0.076	0.987	0.715	71.474
1990	312.85	1197.956	0.034	0.459	0.076	0.987	1.411	141.099
1991	335.5	1307.355	0.034	0.459	0.076	0.987	1.540	153.984
1992	282.5	1056.165	0.034	0.459	0.076	0.987	1.244	124.398
1993	212.9	751.754	0.034	0.459	0.076	0.987	0.885	88.544
1994	299.95	1137.018	0.034	0.459	0.076	0.987	1.339	133.922
1995	168.83	573.948	0.034	0.459	0.076	0.987	0.676	67.601
1996	264.36	974.041	0.034	0.459	0.076	0.987	1.147	114.726
1997	244.19	885.032	0.034	0.459	0.076	0.987	1.042	104.242
1998	159.78	538.868	0.034	0.459	0.076	0.987	0.635	63.470
1999	307.07	1170.529	0.034	0.459	0.076	0.987	1.379	137.869
2000	181.91	625.512	0.034	0.459	0.076	0.987	0.737	73.675
2001	145.99	486.355	0.034	0.459	0.076	0.987	0.573	57.284
2002	306.09	1165.899	0.034	0.459	0.076	0.987	1.373	137.323
2003	335.24	1306.082	0.034	0.459	0.076	0.987	1.538	153.834
2004	350.65	1382.237	0.034	0.459	0.076	0.987	1.628	162.804

Aporte de sedimentos **133.0153**



Tabla 31. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos para la cuenca de la Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes)

Fórmula Universal de Pérdida de Suelos en la cuenca de la Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes)								
Año	Precipitación media anual (mm)	R (MJ*mm/ha*hr*año)	K (Ton/hr/MJ*mm)	LS (Adimensional)	C (Adimensional)	P (Adimensional)	A (Ton/ha-año)	A (Ton/km ² -año)
1950	292.3	1101.349	0.035	0.405	0.060	0.967	0.905	90.478
1951	278.6	1038.343	0.035	0.405	0.060	0.967	0.853	85.302
1952	202.9	710.392	0.035	0.405	0.060	0.967	0.584	58.360
1953	374.9	1504.949	0.035	0.405	0.060	0.967	1.236	123.634
1954	209.7	738.453	0.035	0.405	0.060	0.967	0.607	60.665
1955	211.2	744.681	0.035	0.405	0.060	0.967	0.612	61.177
1956	265.7	980.041	0.035	0.405	0.060	0.967	0.805	80.512
1957	206	723.150	0.035	0.405	0.060	0.967	0.594	59.408
1958	506.7	2233.243	0.035	0.405	0.060	0.967	1.835	183.465
1959	244.5	886.382	0.035	0.405	0.060	0.967	0.728	72.818
1960	273.5	1015.175	0.035	0.405	0.060	0.967	0.834	83.398
1961	250.4	912.178	0.035	0.405	0.060	0.967	0.749	74.937
1962	267.2	986.769	0.035	0.405	0.060	0.967	0.811	81.065
1963	268.7	993.511	0.035	0.405	0.060	0.967	0.816	81.619
1964	368.3	1471.203	0.035	0.405	0.060	0.967	1.209	120.862
1965	175.5	600.115	0.035	0.405	0.060	0.967	0.493	49.300
1966	307.8	1173.982	0.035	0.405	0.060	0.967	0.964	96.445
1967	267	985.871	0.035	0.405	0.060	0.967	0.810	80.991
1968	624.3	2970.561	0.035	0.405	0.060	0.967	2.440	244.037
1969	213.9	755.923	0.035	0.405	0.060	0.967	0.621	62.100
1970	309	1179.665	0.035	0.405	0.060	0.967	0.969	96.911
1971	308	1174.929	0.035	0.405	0.060	0.967	0.965	96.522
1972	401.2	1641.999	0.035	0.405	0.060	0.967	1.349	134.893
1973	369.5	1477.320	0.035	0.405	0.060	0.967	1.214	121.364
1974	420.5	1745.198	0.035	0.405	0.060	0.967	1.434	143.371
1975	206.5	725.213	0.035	0.405	0.060	0.967	0.596	59.578
1976	394.9	1608.794	0.035	0.405	0.060	0.967	1.322	132.165
1977	319.3	1228.798	0.035	0.405	0.060	0.967	1.009	100.948
1978	505.4	2225.553	0.035	0.405	0.060	0.967	1.828	182.833
1979	273.7	1016.080	0.035	0.405	0.060	0.967	0.835	83.473
1980	375.9	1510.084	0.035	0.405	0.060	0.967	1.241	124.056
1981	486.9	2117.218	0.035	0.405	0.060	0.967	1.739	173.933
1982	188.4	651.475	0.035	0.405	0.060	0.967	0.535	53.520
1983	278.7	1038.799	0.035	0.405	0.060	0.967	0.853	85.339
1984	317.9	1222.083	0.035	0.405	0.060	0.967	1.004	100.396
1985	165.4	560.595	0.035	0.405	0.060	0.967	0.461	46.054



1986	473.3	2038.879	0.035	0.405	0.060	0.967	1.675	167.497
1987	403.9	1656.302	0.035	0.405	0.060	0.967	1.361	136.068
1988	232.4	834.128	0.035	0.405	0.060	0.967	0.685	68.525
1989	156	524.361	0.035	0.405	0.060	0.967	0.431	43.077
1990	496	2170.252	0.035	0.405	0.060	0.967	1.783	178.290
1991	275.8	1025.604	0.035	0.405	0.060	0.967	0.843	84.255
1992	294.1	1109.710	0.035	0.405	0.060	0.967	0.912	91.165
1993	185.1	638.242	0.035	0.405	0.060	0.967	0.524	52.433
1994	351.1	1384.483	0.035	0.405	0.060	0.967	1.137	113.738
1995	367.9	1469.167	0.035	0.405	0.060	0.967	1.207	120.695
1996	291.3	1096.712	0.035	0.405	0.060	0.967	0.901	90.097
1997	230.4	825.575	0.035	0.405	0.060	0.967	0.678	67.822
1998	251.5	917.010	0.035	0.405	0.060	0.967	0.753	75.334
1999	367.4	1466.622	0.035	0.405	0.060	0.967	1.205	120.485
2000	314	1203.437	0.035	0.405	0.060	0.967	0.989	98.864
2001	356.41	1411.067	0.035	0.405	0.060	0.967	1.159	115.922
2002	306.65	1168.544	0.035	0.405	0.060	0.967	0.960	95.998
2003	312.4	1195.814	0.035	0.405	0.060	0.967	0.982	98.238
2004	592.54	2763.302	0.035	0.405	0.060	0.967	2.270	227.010

Aporte de sedimentos

101.412



Tabla 32. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos para la cuenca de la Presa Chihuahua

Fórmula Universal de Pérdida de Suelos en la cuenca de la Presa Chihuahua								
Año	Precipitación media anual (mm)	R (MJ*mm/ha*hr*año)	K (Ton/hr/MJ*mm)	LS (Adimensional)	C (Adimensional)	P (Adimensional)	A (Ton/ha-año)	A (Ton/km ² -año)
1961	297.99	1127.855	0.038	2.813	0.015	0.990	1.742	174.218
1962	340.03	1329.601	0.038	2.813	0.015	0.990	2.054	205.381
1963	513.80	2275.388	0.038	2.813	0.015	0.990	3.515	351.476
1964	303.11	1151.851	0.038	2.813	0.015	0.990	1.779	177.925
1965	222.36	791.431	0.038	2.813	0.015	0.990	1.223	122.251
1966	379.66	1529.460	0.038	2.813	0.015	0.990	2.363	236.253
1967	473.48	2039.889	0.038	2.813	0.015	0.990	3.151	315.099
1968	552.49	2510.523	0.038	2.813	0.015	0.990	3.878	387.797
1969	349.93	1378.655	0.038	2.813	0.015	0.990	2.130	212.959
1970	273.29	1014.205	0.038	2.813	0.015	0.990	1.567	156.663
1971	534.67	2401.136	0.038	2.813	0.015	0.990	3.709	370.900
1972	468.80	2013.201	0.038	2.813	0.015	0.990	3.110	310.976
1973	443.40	1870.528	0.038	2.813	0.015	0.990	2.889	288.938
1974	430.20	1797.903	0.038	2.813	0.015	0.990	2.777	277.719
1975	286.90	1076.381	0.038	2.813	0.015	0.990	1.663	166.267
1976	494.60	2162.061	0.038	2.813	0.015	0.990	3.340	333.970
1977	351.00	1383.984	0.038	2.813	0.015	0.990	2.138	213.782
1978	567.10	2601.628	0.038	2.813	0.015	0.990	4.019	401.870
1979	395.30	1610.895	0.038	2.813	0.015	0.990	2.488	248.833
1980	401.00	1640.941	0.038	2.813	0.015	0.990	2.535	253.474
1981	601.20	2819.219	0.038	2.813	0.015	0.990	4.355	435.481
1982	271.00	1003.874	0.038	2.813	0.015	0.990	1.551	155.067
1983	352.32	1390.576	0.038	2.813	0.015	0.990	2.148	214.800
1984	399.88	1635.022	0.038	2.813	0.015	0.990	2.526	252.559
1985	448.16	1896.966	0.038	2.813	0.015	0.990	2.930	293.022
1986	739.20	3770.640	0.038	2.813	0.015	0.990	5.824	582.445
1987	643.61	3099.504	0.038	2.813	0.015	0.990	4.788	478.776
1988	264.49	974.638	0.038	2.813	0.015	0.990	1.506	150.551
1989	239.70	865.548	0.038	2.813	0.015	0.990	1.337	133.700
1990	486.80	2116.638	0.038	2.813	0.015	0.990	3.270	326.954
1991	469.79	2018.813	0.038	2.813	0.015	0.990	3.118	311.843
1992	461.00	1968.978	0.038	2.813	0.015	0.990	3.041	304.145
1993	253.29	924.886	0.038	2.813	0.015	0.990	1.429	142.866
1994	175.63	600.627	0.038	2.813	0.015	0.990	0.928	92.778
1995	335.70	1308.335	0.038	2.813	0.015	0.990	2.021	202.097
1996	500.70	2197.837	0.038	2.813	0.015	0.990	3.395	339.497
1997	439.70	1850.066	0.038	2.813	0.015	0.990	2.858	285.777



1998	342.49	1341.735	0.038	2.813	0.015	0.990	2.073	207.256
1999	397.41	1621.995	0.038	2.813	0.015	0.990	2.505	250.547
2000	504.11	2217.933	0.038	2.813	0.015	0.990	3.426	342.601
2001	269.21	995.806	0.038	2.813	0.015	0.990	1.538	153.821
2002	495.20	2165.570	0.038	2.813	0.015	0.990	3.345	334.512
2003	348.88	1373.437	0.038	2.813	0.015	0.990	2.122	212.153
2004	640.15	3076.246	0.038	2.813	0.015	0.990	4.752	475.183
Aporte de sedimentos								270.118



Tabla 33. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos para la cuenca de la Presa Rodrigo Gómez (La Boca)

Fórmula Universal de Pérdida de Suelos en la cuenca de la Presa Rodrigo Gómez (La Boca)								
Año	Precipitación media anual (mm)	R (MJ*mm/ha*hr*año)	K (Ton/hr/MJ*mm)	LS (Adimensional)	C (Adimensional)	P (Adimensional)	A (Ton/ha-año)	A (Ton/km ² -año)
1972	1091.2	6711.960	0.020	0.514	0.091	0.989	6.229	622.904
1973	1839.3	15418.064	0.020	0.514	0.091	0.989	14.309	1430.874
1974	719.8	3630.026	0.020	0.514	0.091	0.989	3.369	336.885
1975	978.9	5693.281	0.020	0.514	0.091	0.989	5.284	528.365
1976	1368.4	9548.527	0.020	0.514	0.091	0.989	8.862	886.151
1977	851.9	4631.915	0.020	0.514	0.091	0.989	4.299	429.865
1978	1547.4	11623.812	0.020	0.514	0.091	0.989	10.787	1078.748
1979	984.7	5744.051	0.020	0.514	0.091	0.989	5.331	533.077
1980	867.4	4756.296	0.020	0.514	0.091	0.989	4.414	441.408
1981	1116.7	6953.754	0.020	0.514	0.091	0.989	6.453	645.343
1982	771.1	4006.737	0.020	0.514	0.091	0.989	3.718	371.845
1983	1157.9	7352.614	0.020	0.514	0.091	0.989	6.824	682.360
1984	964.5	5568.100	0.020	0.514	0.091	0.989	5.167	516.748
1985	749.7	3847.682	0.020	0.514	0.091	0.989	3.571	357.084
1986	593.1	2766.905	0.020	0.514	0.091	0.989	2.568	256.783
1987	869.5	4773.258	0.020	0.514	0.091	0.989	4.430	442.982
1988	1036.6	6207.283	0.020	0.514	0.091	0.989	5.761	576.067
1989	613.8	2901.375	0.020	0.514	0.091	0.989	2.693	269.262
1990	991.3	5802.067	0.020	0.514	0.091	0.989	5.385	538.461
1991	854.2	4650.281	0.020	0.514	0.091	0.989	4.316	431.569
1992	776.9	4050.316	0.020	0.514	0.091	0.989	3.759	375.890
1993	1154.9	7323.229	0.020	0.514	0.091	0.989	6.796	679.632
1994	926.4	5242.860	0.020	0.514	0.091	0.989	4.866	486.564
1995	1040.65	6244.107	0.020	0.514	0.091	0.989	5.795	579.485
1996	839.7	4535.022	0.020	0.514	0.091	0.989	4.209	420.873
1997	966.9	5588.878	0.020	0.514	0.091	0.989	5.187	518.676
1998	927.9	5255.501	0.020	0.514	0.091	0.989	4.877	487.737
1999	789	4141.877	0.020	0.514	0.091	0.989	3.844	384.387
2000	1236.9	8145.744	0.020	0.514	0.091	0.989	7.560	755.966
2001	1233.4	8109.817	0.020	0.514	0.091	0.989	7.526	752.632
2002	1148.5	7260.720	0.020	0.514	0.091	0.989	6.738	673.831
2003	1565.7	11846.749	0.020	0.514	0.091	0.989	10.994	1099.438
2004	1210.5	7876.556	0.020	0.514	0.091	0.989	7.310	730.984
							Aporte de sedimentos	585.542



4.2.5.2. Análisis en cuencas intermedias y de emisión

Considerando los factores descritos dentro del Apartado 4.2.5, se construyó una tabla de cálculo para cada una de las presas con cuencas intermedias y de emisión tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- Se analizó el período que corresponde a la información batimétrica disponible para cada una de las presas tal y como se indica en el Apartado 4.1.
- Se utilizaron los datos de precipitación media anual de la Base de Datos Climatológica Nacional (Sistema CLICOM) (CICESE, 2020); a continuación se enlistan las estaciones climatológicas que fueron utilizadas para cada uno de los embalses estudiados:
 - **Presa Pico del Águila:** 10141-Canutillo, Durango en un período de 1987 a 2012.
 - **Presa Luis L. León:** 8049-Luis L. León, Chihuahua en un período de 1968 a 2004.
 - **Presa La Amistad:** 5186-Cabeceras, Coahuila en un período de 1990 a 2004
 - **Presa Marte R. Gómez (El Azúcar):** 19043-Madero, Nuevo León en un período de datos de 1961 a 1989.
- El factor de erosionabilidad K se calculó a partir de la determinación de la unidades de suelo existentes en cada una de las cuencas tal y como se presenta en la Carta de Edafología escala 1:250000 de México (INIFAP & CONABIO, 2001), asignándoles los valores que se indican en la Tabla 24 y ponderando cada uno de ellos en relación a la superficie que ocupan.
- El factor LS se calculó a partir del cálculo de la pendiente utilizando el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) 3.0 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2013d); la longitud de la pendiente se obtuvo a partir de la información dentro del Apartado 3.3 en donde se muestra la hidrografía de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos.



- El factor por cubierta vegetal C se calculó a partir de la determinación de los usos de suelo y cobertura vegetal tal y como se presenta en la Carta de Uso de suelo y Vegetación escala 1:250000 de las series correspondientes al período de análisis para cada uno de los embalses, asignándoles los valores que se indican en la Tablas 26 y 27 y ponderando cada uno de ellos en relación a la superficie que ocupan.
- El factor por prácticas mecánicas P se calculó a partir de la determinación de los usos de suelo y cobertura vegetal tal y como se presenta en la Carta de Uso de suelo y Vegetación escala 1:250000 de las series correspondientes al período de análisis para cada uno de los embalses, asignándoles los valores que se indican en la Tabla 28 y ponderando cada uno de ellos en relación a la superficie que ocupan.
- Para obtener el aporte de sedimentos a partir de la aplicación de la USLE, se obtiene la media de los valores obtenidos para cada uno de los años de análisis.
- El proceso detallado para cada una de las presas puede ser consultado dentro del Anexo electrónico: Fórmula Universal de Pérdida de Suelos.

A continuación, se muestran las tablas de cálculo para cada uno de los embalses con cuencas intermedias y de emisión.



Tabla 34. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos para la cuenca de la Presa Pico del Águila

Fórmula Universal de Pérdida de Suelos en la cuenca de la Presa Pico del Águila								
Año	Precipitación media anual (mm)	R (MJ*mm/ha*hr*año)	K (Ton/hr/MJ*mm)	LS (Adimensional)	C (Adimensional)	P (Adimensional)	A (Ton/ha-año)	A (Ton/km ² -año)
1987	472.5	2034.305	0.033	0.370	0.143	0.975	3.480	347.990
1988	325	1256.260	0.033	0.370	0.143	0.975	2.149	214.897
1989	403.5	1654.181	0.033	0.370	0.143	0.975	2.830	282.965
1990	500.5	2196.660	0.033	0.370	0.143	0.975	3.758	375.762
1991	482	2088.866	0.033	0.370	0.143	0.975	3.573	357.323
1992	399.5	1633.016	0.033	0.370	0.143	0.975	2.793	279.345
1993	673	3300.055	0.033	0.370	0.143	0.975	5.645	564.510
1994	185.2	638.642	0.033	0.370	0.143	0.975	1.092	109.247
1995	369	1474.770	0.033	0.370	0.143	0.975	2.523	252.275
1996	511	2258.749	0.033	0.370	0.143	0.975	3.864	386.383
1997	358	1419.060	0.033	0.370	0.143	0.975	2.427	242.745
1998	378.5	1523.465	0.033	0.370	0.143	0.975	2.606	260.605
1999	397	1619.836	0.033	0.370	0.143	0.975	2.771	277.090
2000	462.5	1977.455	0.033	0.370	0.143	0.975	3.383	338.265
2001	373.5	1497.769	0.033	0.370	0.143	0.975	2.562	256.209
2002	345.4	1356.133	0.033	0.370	0.143	0.975	2.320	231.981
2003	444	1873.854	0.033	0.370	0.143	0.975	3.205	320.543
2004	720	3631.464	0.033	0.370	0.143	0.975	6.212	621.201
2005	399.5	1633.016	0.033	0.370	0.143	0.975	2.793	279.345
2006	650	3142.679	0.033	0.370	0.143	0.975	5.376	537.589
2007	435.5	1826.938	0.033	0.370	0.143	0.975	3.125	312.517
2008	431.5	1805.010	0.033	0.370	0.143	0.975	3.088	308.766
2009	454.5	1932.404	0.033	0.370	0.143	0.975	3.306	330.558
2010	723	3653.065	0.033	0.370	0.143	0.975	6.249	624.896
2011	588.76	2739.036	0.033	0.370	0.143	0.975	4.685	468.541
2012	455	1935.208	0.033	0.370	0.143	0.975	3.310	331.038
							Aporte de sedimentos	342.792



Tabla 35. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos para la cuenca de la Presa Luis L. León (El Granero)

Fórmula Universal de Pérdida de Suelos en la cuenca de la Presa Luis L. León (El Granero)								
Año	Precipitación media anual (mm)	R (MJ*mm/ha*hr*año)	K (Ton/hr/MJ*mm)	LS (Adimensional)	C (Adimensional)	P (Adimensional)	A (Ton/ha-año)	A (Ton/km ² -año)
1968	251.2	915.692	0.043	0.509	0.072	0.980	1.400	140.040
1969	107	344.018	0.043	0.509	0.072	0.980	0.526	52.612
1970	251.8	918.330	0.043	0.509	0.072	0.980	1.404	140.443
1971	255	932.434	0.043	0.509	0.072	0.980	1.426	142.600
1972	368.1	1470.185	0.043	0.509	0.072	0.980	2.248	224.841
1973	311	1189.156	0.043	0.509	0.072	0.980	1.819	181.862
1974	407.5	1675.441	0.043	0.509	0.072	0.980	2.562	256.231
1975	43.4	131.302	0.043	0.509	0.072	0.980	0.201	20.081
1976	284	1063.044	0.043	0.509	0.072	0.980	1.626	162.575
1977	363.8	1448.344	0.043	0.509	0.072	0.980	2.215	221.500
1978	601.9	2823.758	0.043	0.509	0.072	0.980	4.318	431.847
1979	198.7	693.197	0.043	0.509	0.072	0.980	1.060	106.013
1980	374.6	1503.409	0.043	0.509	0.072	0.980	2.299	229.922
1981	471.5	2028.593	0.043	0.509	0.072	0.980	3.102	310.240
1982	193.5	672.055	0.043	0.509	0.072	0.980	1.028	102.780
1983	231.1	828.565	0.043	0.509	0.072	0.980	1.267	126.715
1984	261.9	963.055	0.043	0.509	0.072	0.980	1.473	147.283
1985	337.9	1319.126	0.043	0.509	0.072	0.980	2.017	201.739
1986	488.4	2125.926	0.043	0.509	0.072	0.980	3.251	325.125
1987	348.6	1372.025	0.043	0.509	0.072	0.980	2.098	209.829
1988	224.1	798.789	0.043	0.509	0.072	0.980	1.222	122.162
1989	224.7	801.330	0.043	0.509	0.072	0.980	1.226	122.550
1990	311.64	1192.198	0.043	0.509	0.072	0.980	1.823	182.327
1991	475.28	2050.215	0.043	0.509	0.072	0.980	3.135	313.547
1992	260	954.595	0.043	0.509	0.072	0.980	1.460	145.990
1993	258.29	946.999	0.043	0.509	0.072	0.980	1.448	144.828
1994	161.61	545.922	0.043	0.509	0.072	0.980	0.835	83.490
1995	203.03	710.925	0.043	0.509	0.072	0.980	1.087	108.724
1996	275.93	1026.194	0.043	0.509	0.072	0.980	1.569	156.940
1997	356.65	1412.272	0.043	0.509	0.072	0.980	2.160	215.984
1998	222.15	790.546	0.043	0.509	0.072	0.980	1.209	120.901
1999	206.3	724.388	0.043	0.509	0.072	0.980	1.108	110.783
2000	385.77	1561.092	0.043	0.509	0.072	0.980	2.387	238.743
2001	216.86	768.299	0.043	0.509	0.072	0.980	1.175	117.499
2002	275.24	1023.062	0.043	0.509	0.072	0.980	1.565	156.460
2003	331.61	1288.349	0.043	0.509	0.072	0.980	1.970	197.032
2004	574.06	2645.476	0.043	0.509	0.072	0.980	4.046	404.582
							Aporte de sedimentos	180.455



Tabla 36. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos para la cuenca de la Presa Internacional La Amistad

Fórmula Universal de Pérdida de Suelos en la cuenca de la Presa Internacional La Amistad									
Año	Precipitación media anual (mm)	R (MJ*mm/ha*hr*año)	K (Ton/hr/MJ*mm)	LS (Adimensional)	C (Adimensional)	P (Adimensional)	A (Ton/ha-año)	A (Ton/km ² -año)	
1990	982	5720.392	0.031	0.559	0.052	0.988	5.015	501.457	
1991	774	4028.501	0.031	0.559	0.052	0.988	3.531	353.144	
1992	368	1469.676	0.031	0.559	0.052	0.988	1.288	128.834	
1993	452	1918.404	0.031	0.559	0.052	0.988	1.682	168.170	
1994	493.5	2155.633	0.031	0.559	0.052	0.988	1.890	188.966	
1995	340	1329.454	0.031	0.559	0.052	0.988	1.165	116.542	
1996	318.9	1226.878	0.031	0.559	0.052	0.988	1.075	107.550	
1997	708.5	3549.157	0.031	0.559	0.052	0.988	3.111	311.124	
1998	482.5	2091.752	0.031	0.559	0.052	0.988	1.834	183.366	
1999	593	2766.261	0.031	0.559	0.052	0.988	2.425	242.494	
2000	697.5	3471.166	0.031	0.559	0.052	0.988	3.043	304.287	
2001	350.6	1381.988	0.031	0.559	0.052	0.988	1.211	121.147	
2002	524	2336.533	0.031	0.559	0.052	0.988	2.048	204.824	
2003	541	2439.771	0.031	0.559	0.052	0.988	2.139	213.874	
2004	787	4126.683	0.031	0.559	0.052	0.988	3.618	361.750	
Aporte de sedimentos							233.835		



Tabla 37. Estimación de aporte de sedimentos a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos para la cuenca de la Presa Marte R. Gómez

Fórmula Universal de Pérdida de Suelos en la cuenca de la Presa Marte R. Gómez								
Año	Precipitación media anual (mm)	R (MJ*mm/ha*hr*año)	K (Ton/hr/MJ*mm)	LS (Adimensional)	C (Adimensional)	P (Adimensional)	A (Ton/ha-año)	A (Ton/km ² -año)
1961	575	2651.420	0.050	0.425	0.067	0.968	3.671	367.086
1962	366.2	1460.521	0.050	0.425	0.067	0.968	2.022	202.207
1963	574.7	2649.522	0.050	0.425	0.067	0.968	3.668	366.823
1964	368.2	1470.694	0.050	0.425	0.067	0.968	2.036	203.616
1965	352.2	1389.976	0.050	0.425	0.067	0.968	1.924	192.440
1966	696.5	3464.112	0.050	0.425	0.067	0.968	4.796	479.602
1967	945.5	5404.825	0.050	0.425	0.067	0.968	7.483	748.291
1968	450.5	1910.022	0.050	0.425	0.067	0.968	2.644	264.440
1969	379.5	1528.622	0.050	0.425	0.067	0.968	2.116	211.636
1970	274.5	1019.705	0.050	0.425	0.067	0.968	1.412	141.177
1971	794.5	4183.784	0.050	0.425	0.067	0.968	5.792	579.239
1972	679.5	3345.103	0.050	0.425	0.067	0.968	4.631	463.125
1973	941.5	5370.725	0.050	0.425	0.067	0.968	7.436	743.570
1974	356.9	1413.528	0.050	0.425	0.067	0.968	1.957	195.701
1975	420.5	1745.198	0.050	0.425	0.067	0.968	2.416	241.620
1976	865	4736.943	0.050	0.425	0.067	0.968	6.558	655.824
1977	307.5	1172.563	0.050	0.425	0.067	0.968	1.623	162.340
1978	664.8	3243.585	0.050	0.425	0.067	0.968	4.491	449.070
1979	351.8	1387.977	0.050	0.425	0.067	0.968	1.922	192.164
1980	418.9	1736.558	0.050	0.425	0.067	0.968	2.404	240.424
1981	622	2955.350	0.050	0.425	0.067	0.968	4.092	409.164
1982	953.5	5473.310	0.050	0.425	0.067	0.968	7.578	757.773
1983	498	2181.974	0.050	0.425	0.067	0.968	3.021	302.091
1984	725.7	3672.552	0.050	0.425	0.067	0.968	5.085	508.460
1985	593.6	2770.123	0.050	0.425	0.067	0.968	3.835	383.520
1986	702.7	3507.945	0.050	0.425	0.067	0.968	4.857	485.670
1987	484.5	2103.313	0.050	0.425	0.067	0.968	2.912	291.201
1988	436	1829.686	0.050	0.425	0.067	0.968	2.533	253.318
1989	405	1662.142	0.050	0.425	0.067	0.968	2.301	230.121

Aporte de sedimentos **369.714**



4.3. EVOLUCIÓN DEL USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL EN LAS CUENCAS DE EMBALSES DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA 24 BRAVO-CONCHOS

La cobertura vegetal es un aspecto de máxima importancia para la retención del suelo, el minimizar daños por desastres naturales, la regulación del ciclo hidrológico y la mitigación del cambio climático. Si se consideran los aspectos antropogénicos que generan cambios de uso de suelo como la urbanización, el crecimiento de zonas agrícolas, el sobrepastoreo y la explotación excesiva de los recursos maderables, es posible afirmar que una parte considerable de la vegetación original ha sufrido alteraciones o ha sido eliminada por completo dentro del país (INEGI, 2017c), teniendo en cuenta que en México, existen 50 millones de hectáreas en un estado de alta degradación, situación que ha ido en aumento debido a los aspectos antropogénicos mencionados, provocando una tasa de deforestación de más de 600,000 hectáreas por año (Huerta-Olague et al., 2018).

Estos factores se encuentran directamente ligados con los procesos erosivos, y consecuentemente, con la producción de sedimentos que sucede en una cuenca, considerando que, al existir una pérdida de la cobertura vegetal original, la tasa de infiltración se puede ver disminuida, aumentando la escorrentía superficial, y con ello, una aceleración en los procesos de erosión. Por lo general, en zonas áridas estos procesos se caracterizan como irreversibles (López Bermúdez & Romero Díaz, 1998).

Desde el año 1978, el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) ha generado mapas en donde se muestra la cubierta vegetal y el uso de suelo en México, lo que le ha permitido seguir las variaciones y el estado sucesional de 12 ecosistemas vegetales y 58 tipos de vegetación a lo largo de 40 años a partir de la elaboración de seis series de información. Las series existentes son las siguientes (INEGI, 2017b):

- **Serie I:** Datos a partir de fotografías aéreas aplicando la metodología de mapa analógico con año de referencia de la información 1985 (INEGI, 1997a).



- **Serie II:** Datos a partir de mapas impresos aplicando la metodología de mapa analógico con año de referencia de la información 1993 (INEGI, 2001a).
- **Serie III:** Datos a partir de LANDSAT TM (30 m) aplicando la metodología de información digital con año de referencia de la información 2002 (INEGI, 2005a).
- **Serie IV:** Datos a partir de SPOT 5 (10 m) aplicando la metodología de información digital con año de referencia de la información 2007 (INEGI, 2009a).
- **Serie V:** Datos a partir de LANDSAT 5 TM (30 m) aplicando la metodología de información digital con año de referencia de la información 2011 (INEGI, 2013a).
- **Serie VI:** Datos a partir de LANDSAT 8 (30 m) aplicando la metodología de información digital con año de referencia de la información 2014 (INEGI, 2016).

Considerando la importancia que tiene la cobertura vegetal en los procesos de acumulación de sedimentos, se realizó una comparación de la evolución del uso de suelo y cobertura vegetal en cada una de las cuencas de los embalses estudiados a partir de las series existentes del INEGI, considerando el período de análisis que se describe en el Apartado 4.1. para cada uno de estos de acuerdo a la información de las curvas área elevación volumen disponible.

En las siguientes Figuras se muestra cada uno de los mapas de evolución de uso de suelo y cobertura vegetal, así como un análisis de los cambios en porcentaje de superficie a partir de una agrupación en los grandes grupos de uso de suelo y vegetación que se encuentran en la zona de estudio, siendo estos: agricultura, bosque, bosque secundario, cuerpo de agua, desprovisto de vegetación, matorral, matorral secundario, pastizal, pastizal secundario y zona urbana.



Presas Federalismo Mexicano (San Gabriel)

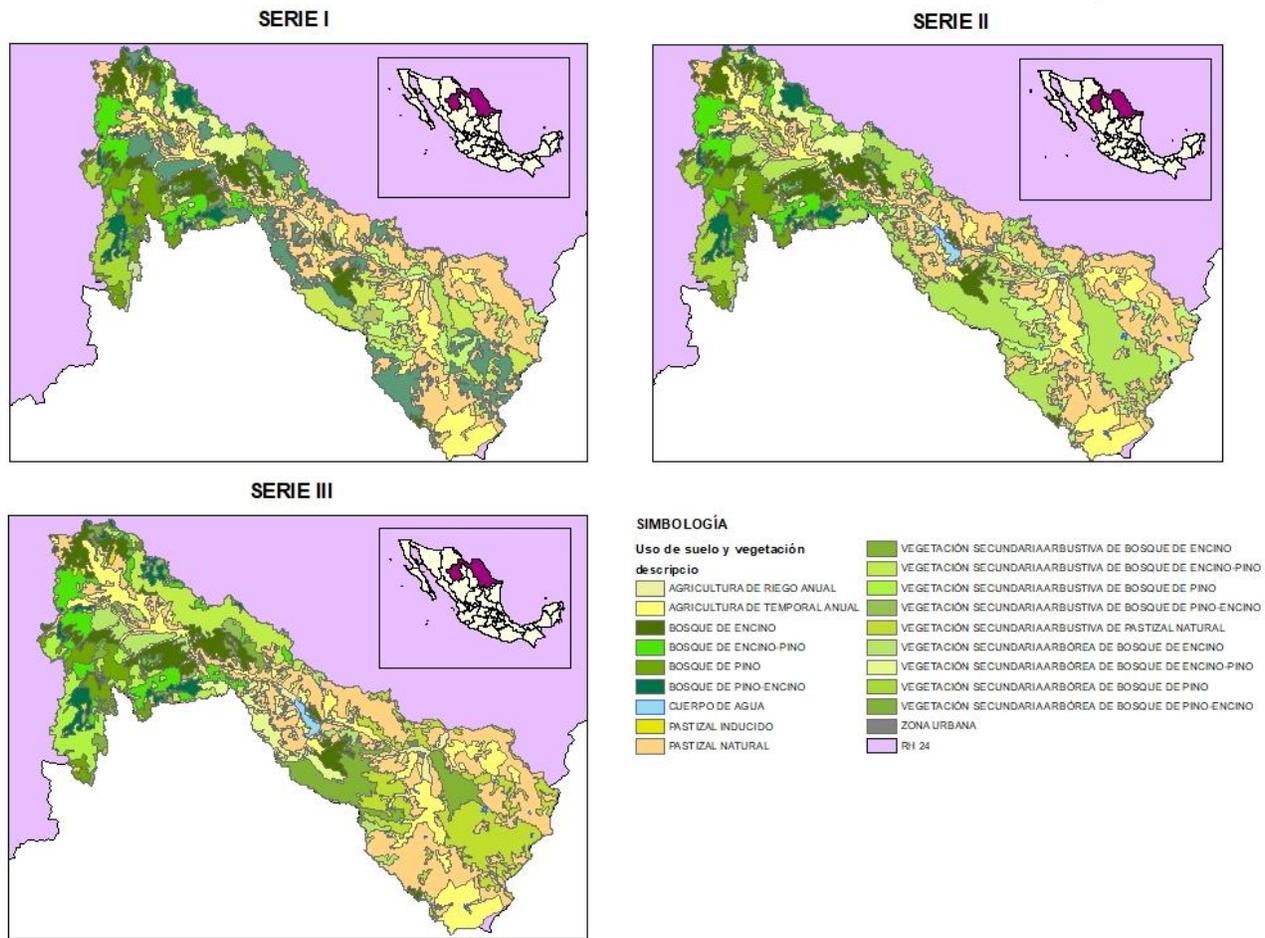


Figura 14. Evolución del uso de suelo y la cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel). Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 1997b), (INEGI, 2001b) e (INEGI, 2005b)

En la Tabla 38 es posible observar los cambios que ha tenido la vegetación en la cuenca de la presa Federalismo Mexicano (San Gabriel) en un período de 1985 a 2002, el cual guarda relación con el período de análisis para los registros de batimetría.

Es posible observar que la agricultura tuvo un aumento de 114.64%, habiéndose incrementado en mayor manera en el período de 1993 a 2002. Los bosques tuvieron un decremento bastante considerable, ya que desapareció alrededor del 50% de la superficie



existente al año 1985, situación que ocasionó un aumento en la vegetación secundaria que corresponde a este grupo.

En cuestión de matorrales, tanto los que corresponden a vegetación primaria como secundaria, tuvieron un decremento, desapareciendo por completo de la cuenca.

Los pastizales secundarios tuvieron un ascenso del 200.04% respecto al porcentaje de superficie existente para el período de la Serie I con fecha del año 1985.

Tabla 38. Evolución de los grupos de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca propia de la Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel)

Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel)			
Grupo de uso de suelo y vegetación	Serie I (1985)	Serie II (1993)	Serie III (2002)
Agricultura	12.02%	12.69%	13.78%
Bosque	35.82%	21.25%	19.96%
Bosque secundario	19.55%	33.94%	26.51%
Cuerpo de agua	0.00%	0.52%	0.52%
Matorral	0.37%	0.00%	0.00%
Matorral secundario	0.16%	0.16%	0.00%
Pastizal	26.04%	24.72%	26.93%
Pastizal secundario	6.04%	6.51%	12.08%
Zona urbana	0.00%	0.21%	0.21%



Presas Pico del Águila

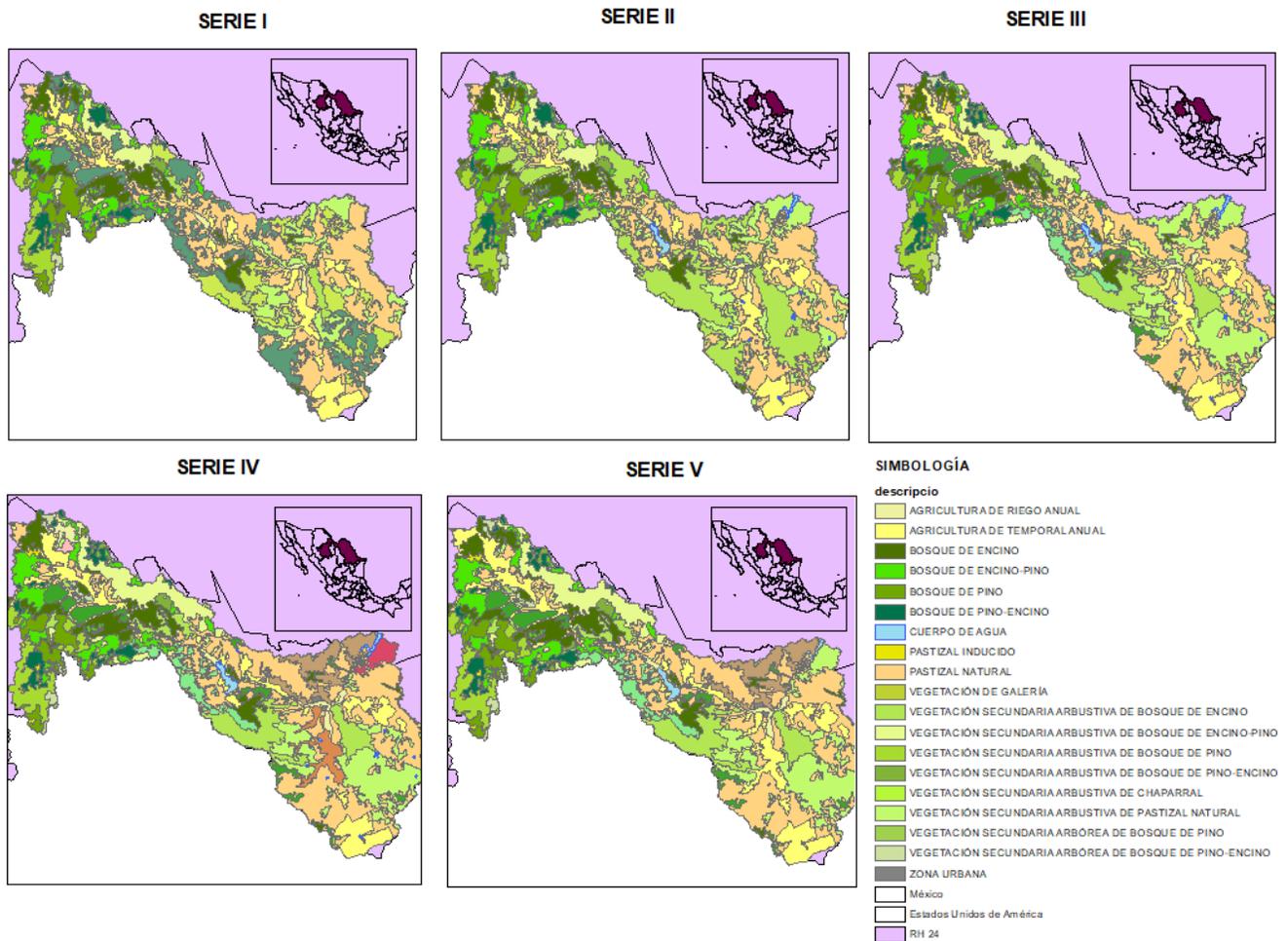


Figura 15. Evolución del uso de suelo y la cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Pico del Águila. Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 1997b), (INEGI, 2001b), (INEGI, 2005b), (INEGI, 2009b) e (INEGI, 2013b)

En la Tabla 39 es posible observar los cambios que ha tenido la vegetación en la cuenca de la presa Pico del Águila en un período de 1985 a 2011, el cual guarda relación con el período de análisis para los registros de batimetría.

Se observa un aumento de las superficies agrícolas de un 119.91%, así como un drástico decremento de las superficies donde se encuentran los bosques primarios del 57% de la superficie total ocupada en 1985. Se puede asumir que una porción de esta pérdida dio lugar a bosque secundario, habiéndose incrementado este grupo en un 130.57%.



Las superficies de matorrales y pastizales presentaron cambios no significativos en vegetación primaria ni en vegetación secundaria.

Tabla 39. Evolución de los grupos de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Pico del Águila

Presa Pico del Águila					
Grupo de uso de suelo y vegetación	Serie I (1985)	Serie II (1993)	Serie III (2002)	Serie IV (2007)	Serie V (2011)
Agricultura	11.10%	11.72%	12.73%	11.10%	13.31%
Bosque	33.61%	19.94%	18.75%	18.92%	19.37%
Bosque secundario	19.47%	32.15%	24.82%	25.43%	25.42%
Cuerpo de agua	0.00%	0.67%	0.67%	0.67%	0.67%
Matorral	0.34%	0.00%	0.00%	2.47%	0.00%
Matorral secundario	0.15%	0.15%	0.00%	3.94%	3.94%
Pastizal	27.34%	25.48%	27.52%	26.19%	26.02%
Pastizal secundario	7.99%	9.69%	15.31%	11.07%	11.06%
Zona urbana	0.00%	0.20%	0.20%	0.21%	0.21%



Presas La Boquilla (Lago Toronto)

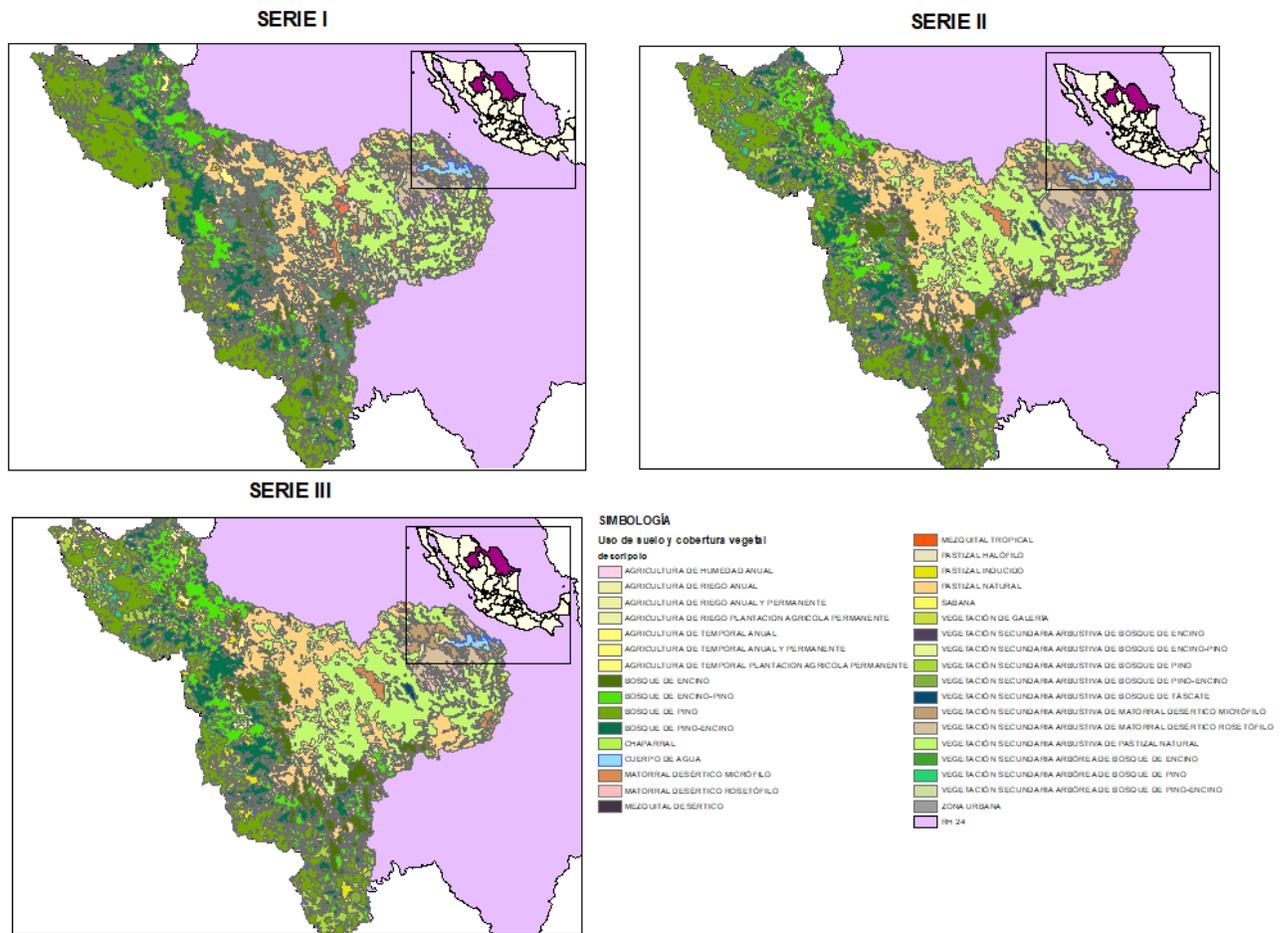


Figura 16. Evolución del uso de suelo y la cobertura vegetal en la cuenca de la Presa La Boquilla (Lago Toronto). Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 1997b), (INEGI, 2001b) e (INEGI, 2005b)

En la Tabla 40 es posible observar los cambios que ha tenido la vegetación en la cuenca de la presa La Boquilla (Lago Toronto) en un período de 1985 a 2002, el cual guarda relación con el período de análisis para los registros de batimetría.

En la cuenca de este embalse, es posible observar un aumento del 139.89% en las superficies agrícolas en el período analizado; se tuvo aumento en la superficie de bosques secundarios, en el cuerpo de agua que conforma la presa, en los pastizales secundarios, y, por último, se aumentó la superficie de zonas urbanas.



Los decrementos existentes consisten principalmente en la superficie de bosques, matorrales y pastizales primarios, siendo el más afectado el primer grupo correspondiente a bosques en las partes altas de la cuenca, mismo que se observa considerablemente disminuido en la Figura 16.

Tabla 40. Evolución de los grupos de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca de la Presa La Boquilla (Lago Toronto)

Presa La Boquilla (Lago Toronto)			
Grupo de uso de suelo y vegetación	Serie I (1985)	Serie II (1993)	Serie III (2002)
Agricultura	4.18%	4.61%	5.85%
Bosque	50.71%	43.99%	40.96%
Bosque secundario	4.36%	6.99%	8.65%
Cuerpo de agua	0.00%	0.62%	0.54%
Desprovisto de vegetación	0.00%	0.00%	0.00%
Matorral	1.85%	1.76%	1.68%
Matorral secundario	5.26%	4.74%	4.71%
Pastizal	18.09%	17.75%	17.78%
Pastizal secundario	15.53%	19.46%	19.61%
Zona urbana	0.00%	0.00%	0.04%



Presas Francisco I. Madero (Las Vírgenes)

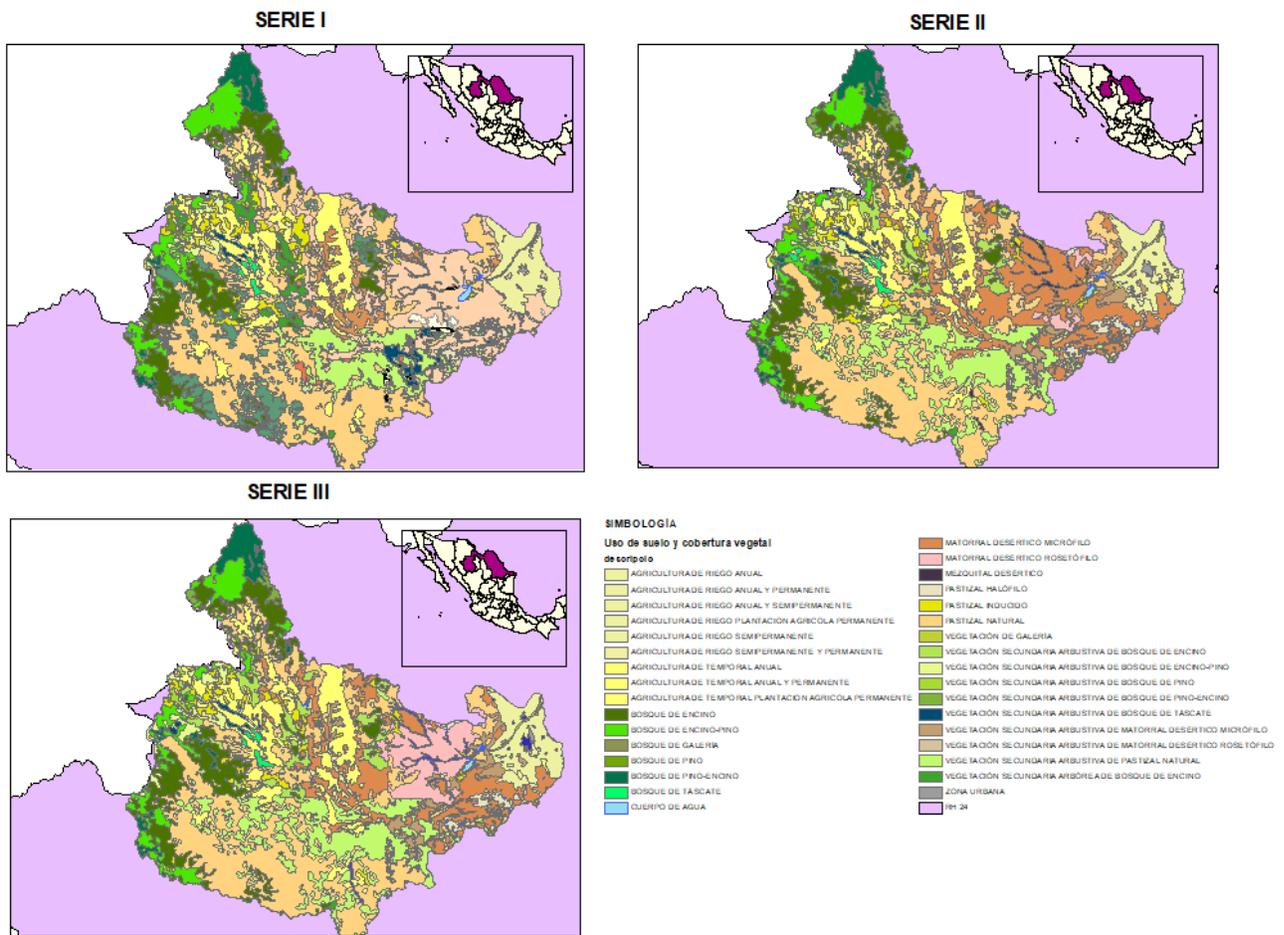


Figura 17. Evolución del uso de suelo y la cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes). Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 1997b), (INEGI, 2001b) e (INEGI, 2005b)

En la Tabla 41 es posible observar los cambios que ha tenido la vegetación en la cuenca de la presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes) en un período de 1985 a 2002, el cual guarda relación con el período de análisis para los registros de batimetría.

Las superficies agrícolas se incrementaron en un 113.77%, teniéndose aumentos también en los bosques, matorrales y pastizales secundarios, así como en zonas urbanas.



Los bosques disminuyeron un 75.37% en el período revisado, de igual manera, las superficies en donde existían matorrales y pastizales primarios tuvieron decrementos, sustituyéndose por vegetación secundaria.

Tabla 41. Evolución de los grupos de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes)

Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes)			
Grupo de uso de suelo y vegetación	Serie I (1985)	Serie II (1993)	Serie III (2002)
Agricultura	15.44%	16.72%	17.57%
Bosque	22.44%	17.24%	16.91%
Bosque secundario	4.14%	5.18%	5.91%
Cuerpo de agua	0.17%	0.18%	0.18%
Matorral	19.06%	16.73%	15.69%
Matorral secundario	1.14%	2.84%	2.68%
Pastizal	30.60%	30.32%	29.64%
Pastizal secundario	6.80%	10.59%	10.28%
Zona urbana	0.06%	0.21%	0.21%



Presa Luis L. León (El Granero)

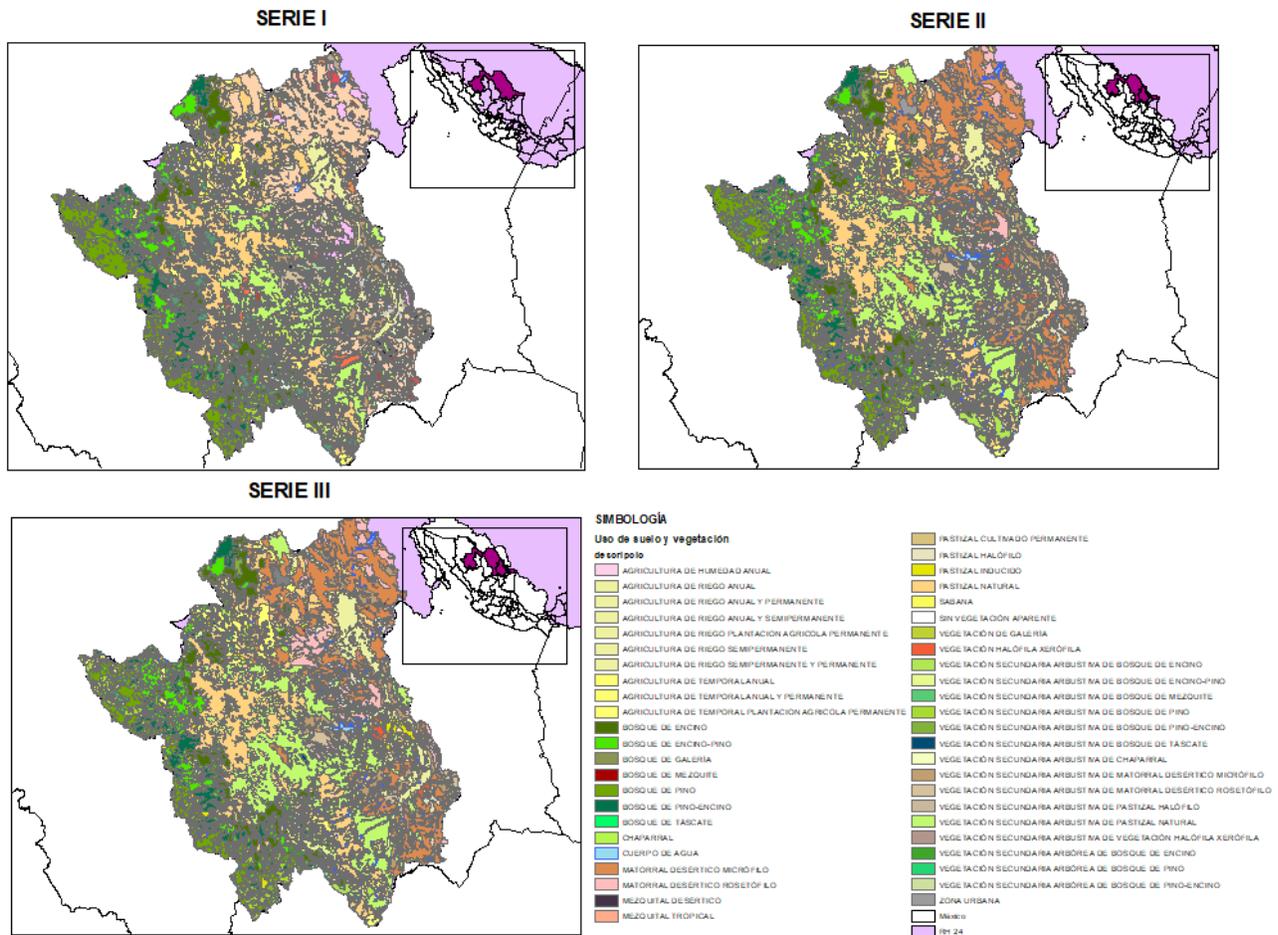


Figura 18. Evolución del uso de suelo y la cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Luis L. León (El Granero). Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 1997b), (INEGI, 2001b) e (INEGI, 2005b)

En la Tabla 42 es posible observar los cambios que ha tenido la vegetación en la cuenca de la presa Luis L. León (El Granero) en un período de 1985 a 2002, el cual guarda relación con el período de análisis para los registros de batimetría.

En la cuenca de esta presa para el período revisado, se tuvo un aumento de las superficies agrícolas de un 126.22%. De igual manera, las superficies de vegetación en bosques, matorrales y pastizales tuvieron un aumento en conjunto del 385.37%. Las zonas desprovistas de



vegetación tuvieron un ascenso poco significativo, pudiéndose considerar también dentro de esta categoría a las zonas urbanas.

Los bosques presentaron un descenso del 79.84%, situación que propició el aumento de la vegetación secundaria. La superficie de matorrales primarios disminuyó de igual manera.

Tabla 42. Evolución de los grupos de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Luis L. León (El Granero)

Presa Luis L. León (El Granero)			
Grupo de uso de suelo y vegetación	Serie I (1985)	Serie II (1993)	Serie III (2002)
Agricultura	8.70%	9.63%	10.98%
Bosque	25.81%	21.50%	20.61%
Bosque secundario	4.05%	6.17%	6.39%
Cuerpo de agua	0.10%	0.42%	0.39%
Desprovisto de vegetación	0.06%	0.07%	0.08%
Matorral	21.96%	18.73%	17.99%
Matorral secundario	6.51%	7.53%	6.75%
Pastizal	20.18%	20.23%	20.68%
Pastizal secundario	12.55%	15.30%	15.55%
Zona urbana	0.08%	0.43%	0.53%



Presas Chihuahua

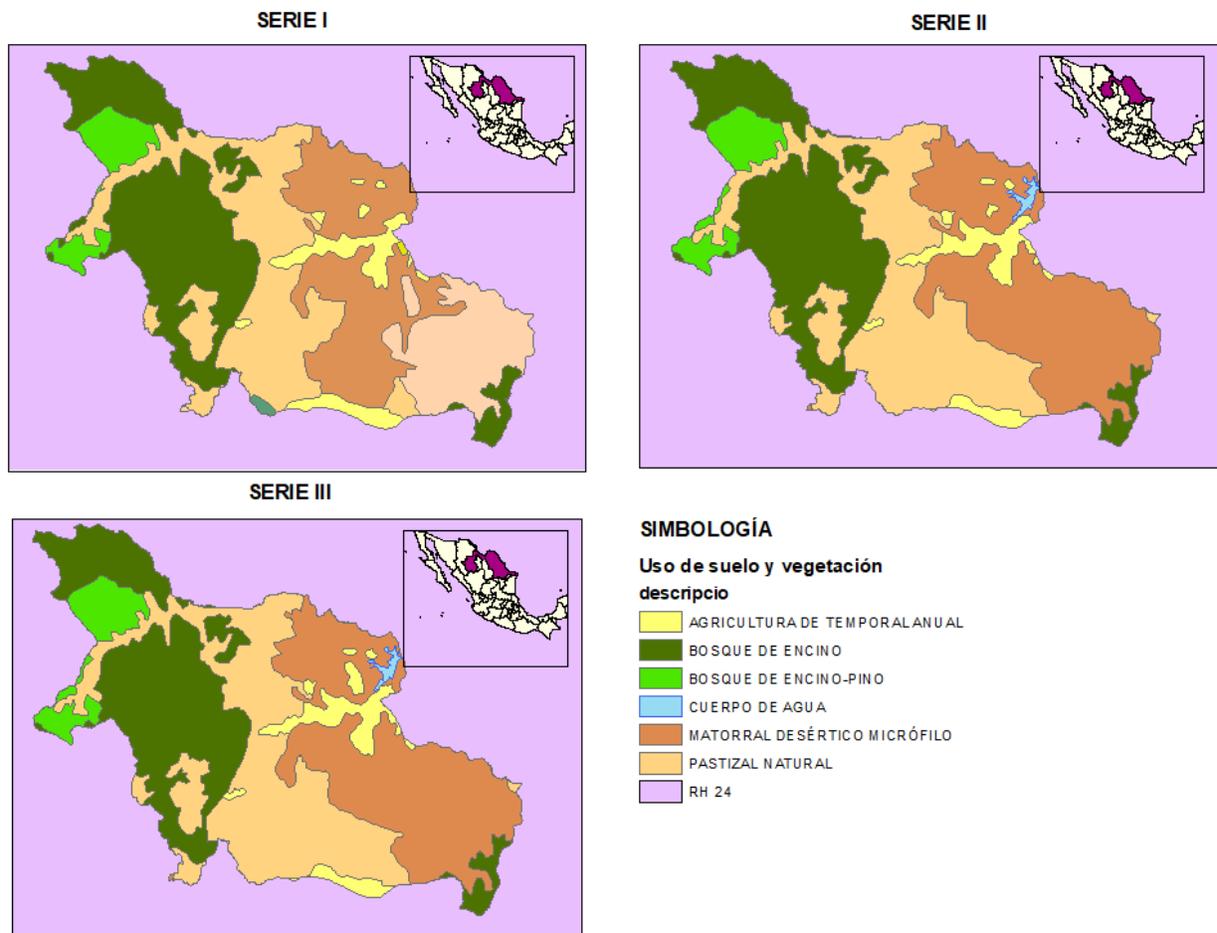


Figura 19. Evolución del uso de suelo y la cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Chihuahua. Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 1997b), (INEGI, 2001b) e (INEGI, 2005b)

En la Tabla 43 es posible observar los cambios que ha tenido la vegetación en la cuenca de la presa Chihuahua en un período de 1985 a 2002, el cual guarda relación con el período de análisis para los registros de batimetría.

No se observan cambios sustanciales en los cambios de uso de suelo y vegetación en esta cuenca, a excepción de una disminución en la superficie de matorrales primarios.



Tabla 43. Evolución de los grupos de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Chihuahua

Presa Chihuahua			
Grupo de uso de suelo y vegetación	Serie I (1985)	Serie II (1993)	Serie III (2002)
Agricultura	5.09%	4.80%	5.09%
Bosque	32.98%	33.28%	33.28%
Cuerpo de agua	0.00%	0.41%	0.41%
Matorral	35.49%	30.01%	29.71%
Pastizal	26.44%	31.51%	31.51%



Tabla 44. Evolución de los grupos de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Internacional La Amistad

Presa Internacional La Amistad			
Grupo de uso de suelo y vegetación	Serie I (1985)	Serie II (1993)	Serie III (2002)
Agricultura	5.56%	6.03%	6.81%
Bosque	15.42%	13.00%	12.51%
Bosque secundario	2.41%	4.61%	4.70%
Cuerpo de agua	0.20%	0.44%	0.41%
Desprovisto de vegetación	0.05%	0.10%	0.10%
Matorral	49.44%	45.90%	45.26%
Matorral secundario	4.00%	5.16%	4.80%
Pastizal	15.20%	15.13%	15.42%
Pastizal secundario	7.62%	9.22%	9.43%
Zona urbana	0.09%	0.44%	0.44%



Presas Rodrigo Gómez (La Boca)

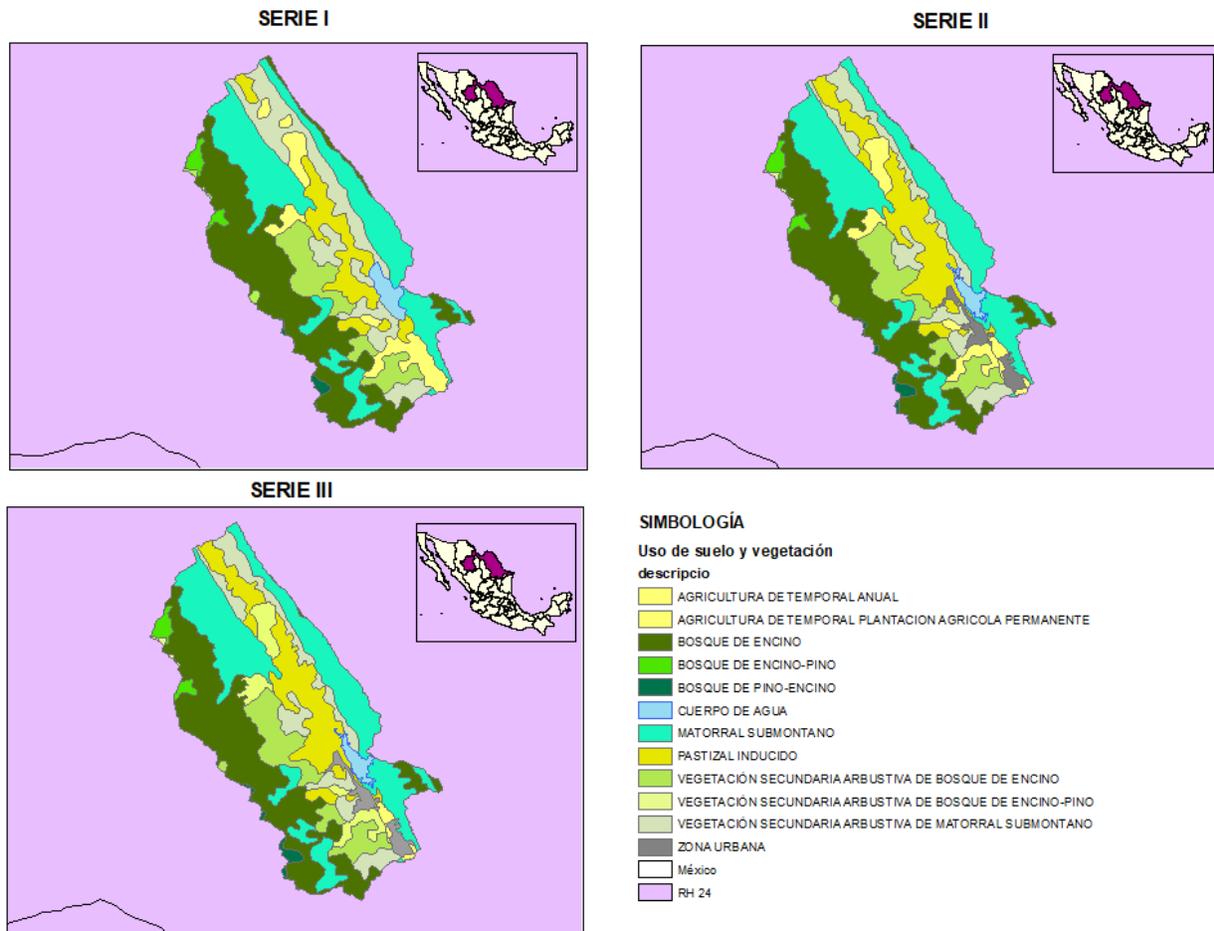


Figura 21. Evolución del uso de suelo y la cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Rodrigo Gómez (La Boca). Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 1997b), (INEGI, 2001b) e (INEGI, 2005b)

En la Tabla 45 es posible observar los cambios que ha tenido la vegetación en la cuenca de la presa Rodrigo Gómez (La Boca) en un período de 1985 a 2002, el cual guarda relación con el período de análisis para los registros de batimetría.

En la cuenca se han presentado disminuciones en las superficies agrícolas, en bosques primarios (situación que permitió un aumento de la vegetación secundaria) y en la superficie ocupada por cuerpos de agua, teniéndose también aumentos en las zonas urbanas.



Tabla 45. Evolución de los grupos de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Rodrigo Gómez (La Boca)

Presa Rodrigo Gómez (La Boca)			
Grupo de uso de suelo y vegetación	Serie I (1985)	Serie II (1993)	Serie III (2002)
Agricultura	7.23%	5.29%	5.38%
Bosque	30.31%	29.48%	29.40%
Bosque secundario	8.73%	9.01%	9.01%
Cuerpo de agua	1.81%	1.22%	1.23%
Matorral	27.44%	28.56%	28.56%
Matorral secundario	14.81%	10.47%	10.47%
Pastizal	9.14%	13.71%	13.70%



Presas Marte R. Gómez (El Azúcar)

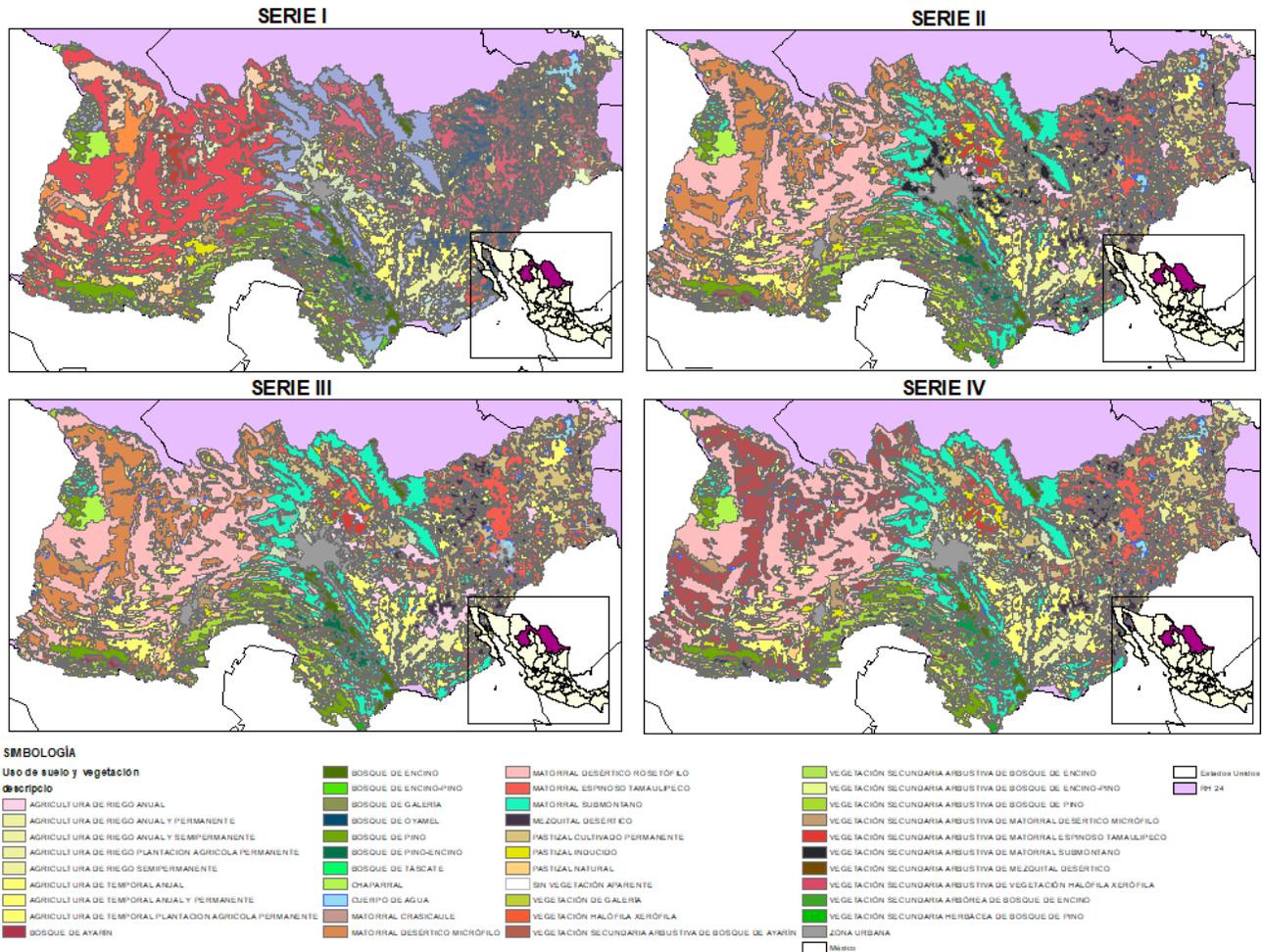


Figura 22. Evolución del uso de suelo y la cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Marte R. Gómez (El Azúcar). Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 1997b), (INEGI, 2001b), (INEGI, 2005b) e (INEGI, 2009b)

En la Tabla 46 es posible observar los cambios que ha tenido la vegetación en la cuenca de la presa Marte R. Gómez (El Azúcar) en un período de 1985 a 2007, el cual guarda relación con el período de análisis para los registros de batimetría.

Para la cuenca de este embalse, se tiene un aumento de la agricultura del 137.79% en el período revisado.

Se observó un decremento muy alto respecto a la cobertura vegetal correspondiente a matorrales, sin embargo, los matorrales secundarios se muestran inexistentes.



Se tuvo un aumento de la superficie de pastizales, contra una mínima disminución de pastizales secundarios.

Las zonas urbanas aumentaron en un 598.86%, habiendo un mayor crecimiento de la urbanización en el período de 2002 a 2007.

Tabla 46. Evolución de los grupos de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca de la Presa Marte R. Gómez (El Azúcar)

Presa Marte R. Gómez (El Azúcar)				
Grupo de uso de suelo y vegetación	Serie I (1985)	Serie II (1993)	Serie III (2002)	Serie IV (2007)
Agricultura	11.87%	16.17%	16.59%	16.35%
Bosque	6.94%	6.68%	6.71%	6.79%
Bosque secundario	1.44%	4.43%	4.30%	4.37%
Cuerpo de agua	0.46%	0.53%	0.53%	0.53%
Desprovisto de vegetación	0.13%	0.14%	0.14%	0.32%
Matorral	66.59%	52.49%	51.06%	51.11%
Matorral secundario	4.12%	4.29%	4.40%	4.13%
Pastizal	7.30%	12.99%	13.90%	12.75%
Pastizal secundario	0.64%	0.57%	0.57%	0.58%
Zona urbana	0.51%	1.71%	1.79%	3.07%

Capítulo 5: Presentación y discusión de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis de la acumulación de sedimentos en embalses de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos, para lo cual, se mostrarán primero los resultados de la estimación de la acumulación de sedimentos a partir de la comparación de curvas área elevación volumen, evaluando las tasas de aporte de sedimentos obtenidas para cuencas de cabecera, cuencas intermedias y de emisión.

Luego, se realizará la presentación de las tasas de aporte de sedimentos que fueron estimadas a partir de la aplicación de métodos empíricos, concluyendo este capítulo con la comparación de ambos grupos de resultados.



5.1. ANÁLISIS DE LA ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN VASOS DE ALMACENAMIENTO A PARTIR DE REGISTROS DE BATIMETRÍA

5.1.1. Cuencas de cabecera

Tabla 47. Acumulación de sedimentos en embalses estimada a partir de la comparación de registros de batimetría en cuencas de cabecera

Acumulación de sedimentos en embalses de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos					
Concepto de análisis	Federalismo Mexicano (San Gabriel)	La Boquilla (Lago Toronto)	Francisco I. Madero (Las Vírgenes)	Chihuahua	Rodrigo Gómez (La Boca)
	1979-2004	1942-2004	1948-2004	1958-2004	1961-2004
Clasificación de la cuenca (posición geográfica)	Cabecera	Cabecera	Cabecera	Cabecera	Cabecera
Clasificación de la cuenca (tamaño)	Grande	Muy grande	Muy grande	Intermedia-Pequeña	Intermedia-pequeña
Período de análisis (años)	25	62	56	46	43
Capacidad útil (hm ³)	307.84	3016.4	425	33.3	41.28
Área de la cuenca (km ²)	1539	21003	10600	393	266
Área regulada por embalses aguas arriba (km ²)	0	0	0	0	0
Porcentaje de pérdida sobre la capacidad útil	20.27%	10.52%	34.13%	10.12%	4.80%
Tasa anual de sedimentación al NAMO (hm³/año)	2.50	5.12	2.59	0.07	0.05
Tasa de aporte de sedimentos (m³/km²-año)	1622.06	243.78	244.37	186.49	173.26
Desnivel desde el nacimiento del cauce principal a la presa (m)	456	1167	1036.2	740	793.96
Longitud del cauce principal (m)	74708	384506	204393	28000	19956
Pendiente general del cauce principal %	0.61%	0.30%	0.51%	2.64%	3.98%

De acuerdo a la información que se muestra en la Tabla 47, se pueden identificar dos grupos principales de comportamiento de las tasas de aporte de sedimentos en cuencas de cabecera:



1. Presas La Boquilla (Lago Toronto) y Francisco I. Madero (Las Vírgenes) para cuencas muy grandes: Como es posible observar en la Figura 12, las cuencas de estos dos embalses se encuentran en el estado de Chihuahua y son contiguas una de la otra, situación que les otorga condiciones climatológicas, de uso de suelo y cobertura vegetal, edafológicas y topográficas muy parecidas.

Según el análisis realizado en el Apartado 4.3 (Véase Figuras 16 y 17), para estas cuencas fue posible observar un proceso de deforestación de los bosques primarios, dando lugar a vegetación secundaria. De igual manera, los pastizales presentaron una disminución, lo que puede deberse a actividades de sobrepastoreo, provocando el aumento de vegetación arbustiva; estos cambios de uso de suelo y vegetación propician una erosión del suelo más rápida, lo que ha incrementado la cantidad de sedimentos que ingresa a los embalses.

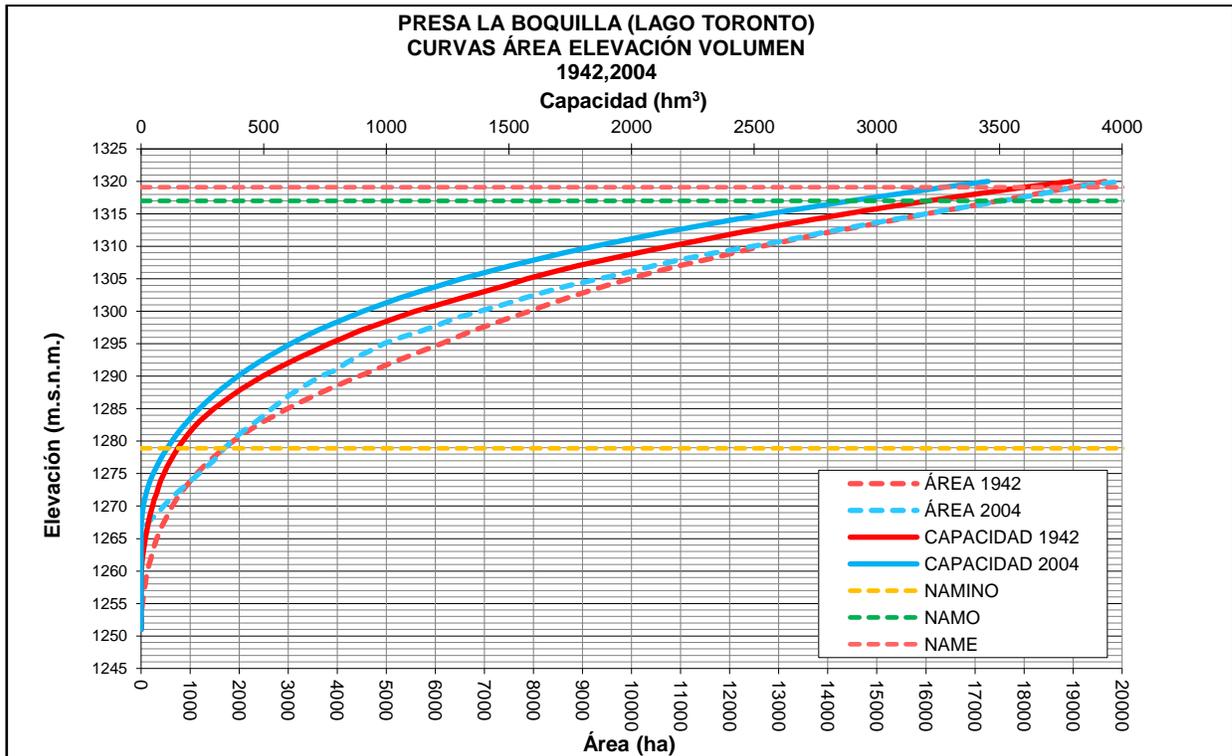
Ambas cuencas cuentan con pendientes medias que caracterizan al terreno como “accidentado medio a accidentado”, lo que provoca respuestas rápidas a los escurrimientos e incremento en la capacidad erosiva (Estrada Gutiérrez et al., 2015).

La información batimétrica disponible permitió que se analizará un período de años similar, teniendo información del año 1942 al año 2004 para la Presa La Boquilla (Lago Toronto) y del año 1948 al año 2004 para la Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes); con esto, fue posible obtener tasas de aporte de sedimentos de $243.78 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$ y $244.37 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$, respectivamente.

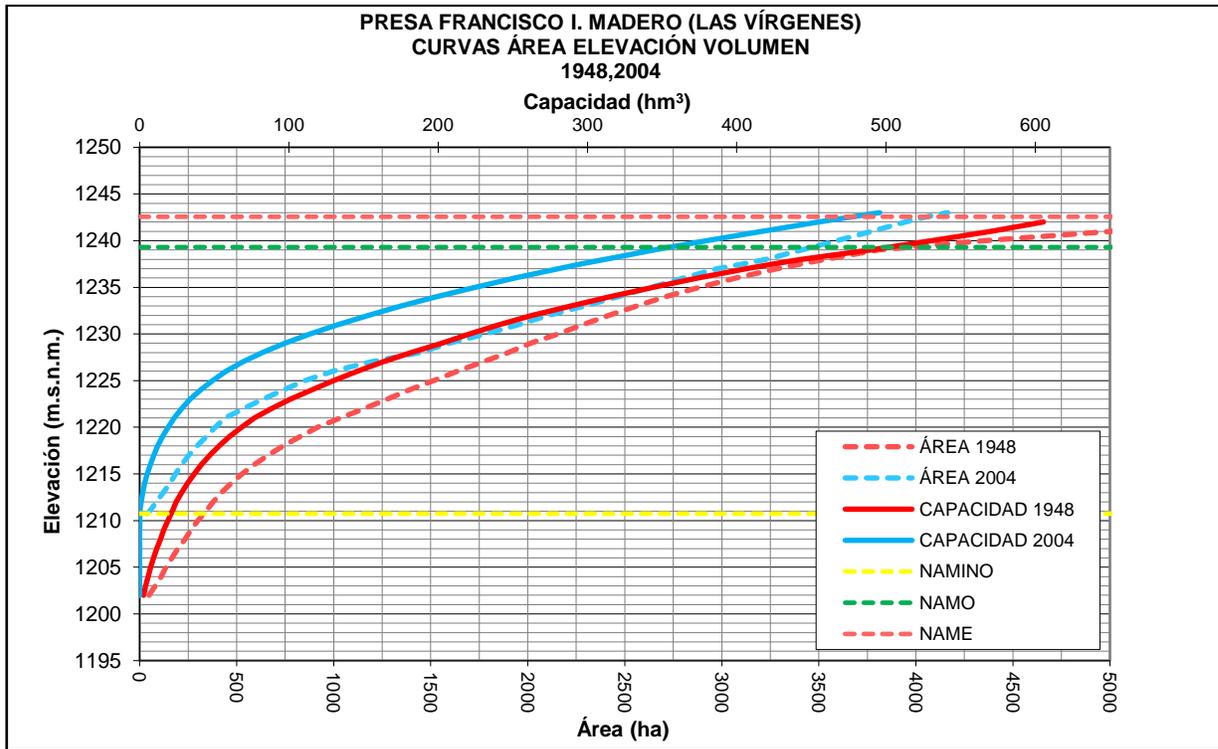
La tasa anual de sedimentación al NAMO de la cuenca de la presa La Boquilla (Lago Toronto) resulta ser del doble que la de la presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes), teniendo un valor de $5.12 \text{ hm}^3/\text{año}$ contra $2.59 \text{ hm}^3/\text{año}$; esto puede deberse principalmente a que la primera presa, cuenta con una capacidad útil siete veces mayor que la segunda, sin embargo, el porcentaje de pérdida sobre la capacidad útil de la presa Francisco I. Madero es de 34.13%, convirtiéndolo en el embalse más azolvado de la zona de estudio, por otra parte, la presa La Boquilla cuenta con un porcentaje de pérdida sobre la capacidad útil del 10.52%. En las Gráficas 1 y 2, es posible



observar el comportamiento de la disminución de la capacidad del embalse en el período de análisis.



Gráfica 1. Curvas área elevación volumen de la presa La Boquilla (Lago Toronto) para los años 1942 y 2004



Gráfica 2. Curvas área elevación volumen de la presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes) para los años 1948 y 2004

2. Presas Chihuahua y Rodrigo Gómez (La Boca) para cuencas intermedias-pequeñas: Las cuencas de estos embalses se localizan en estados diferentes, teniendo condiciones climatológicas ampliamente distintas. La primera se localiza como bien indica su nombre, en la porción centro del estado de Chihuahua, y la segunda, se localiza en el estado de Nuevo León, al oeste del territorio estatal.

La precipitación media mensual que se tiene para la zona de la presa Chihuahua según la Base de datos climatológica nacional (Sistema CLICOM), es de 412.7 mm y para la presa Rodrigo Gómez (La Boca) se tiene un valor de 1023.78 mm.

Sin embargo, estas cuencas cuentan con similitudes en cuanto a tamaño, clasificándose como intermedias-pequeñas, así como en sus grupos de suelo y vegetación. La capacidad útil de los embalses que conforman esta categoría es de 33.3 y 41.28 hm³, lo que podría categorizarlos como embalses pequeños. Con relación a los aspectos topográficos, el diferencial de elevación que guarda entre el inicio del cauce principal al punto donde se encuentra emplazada la presa son



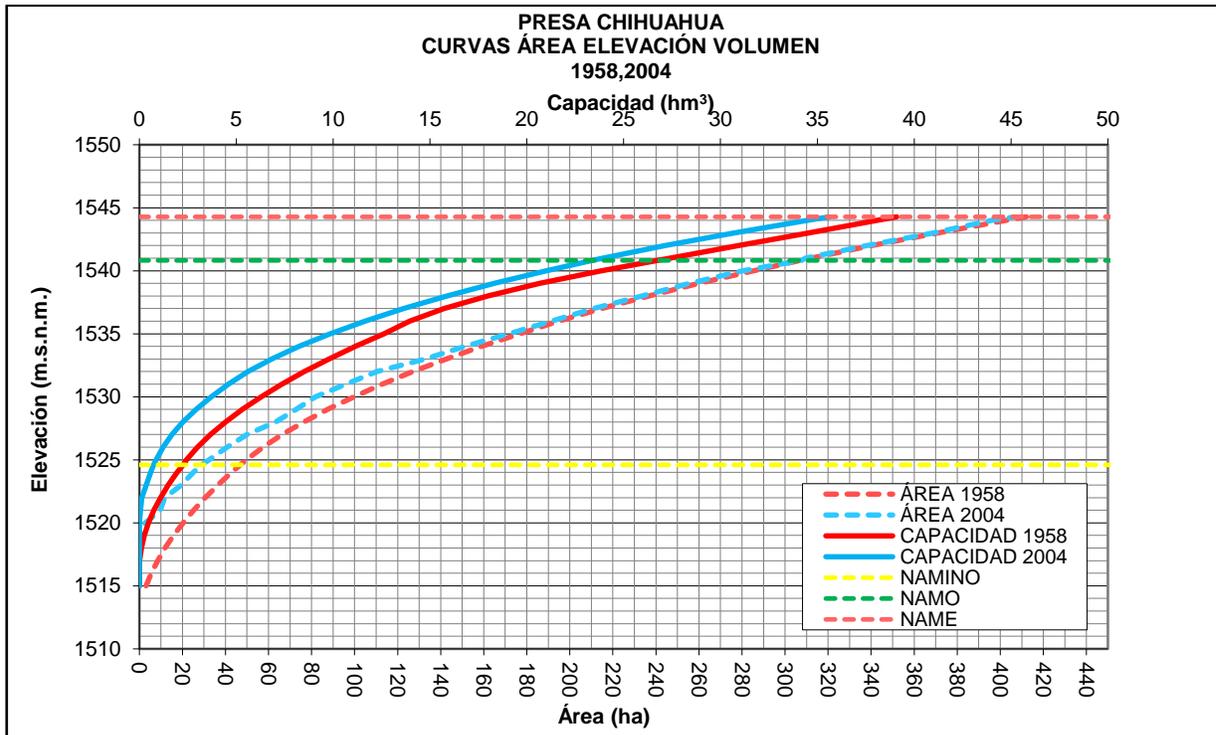
muy parecidos, teniendo para la presa Chihuahua un desnivel de 740 m y para la presa Rodrigo Gómez (La Boca) uno de 793 m, estos desniveles, aunados a las longitudes de los cauces principales con solo 8,000 km de diferencia, proporcionan resultados de pendientes generales del 2.64% y 3.98% respectivamente.

La información batimétrica disponible permitió que se analizará un período de años similar, teniendo información del año 1958 al año 2004 para la presa Chihuahua y del año 1961 al año 2004 para la presa Rodrigo Gómez (La Boca), con lo que se obtuvieron tasas de aporte de sedimentos de $186.49 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$ y $173.26 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$, respectivamente.

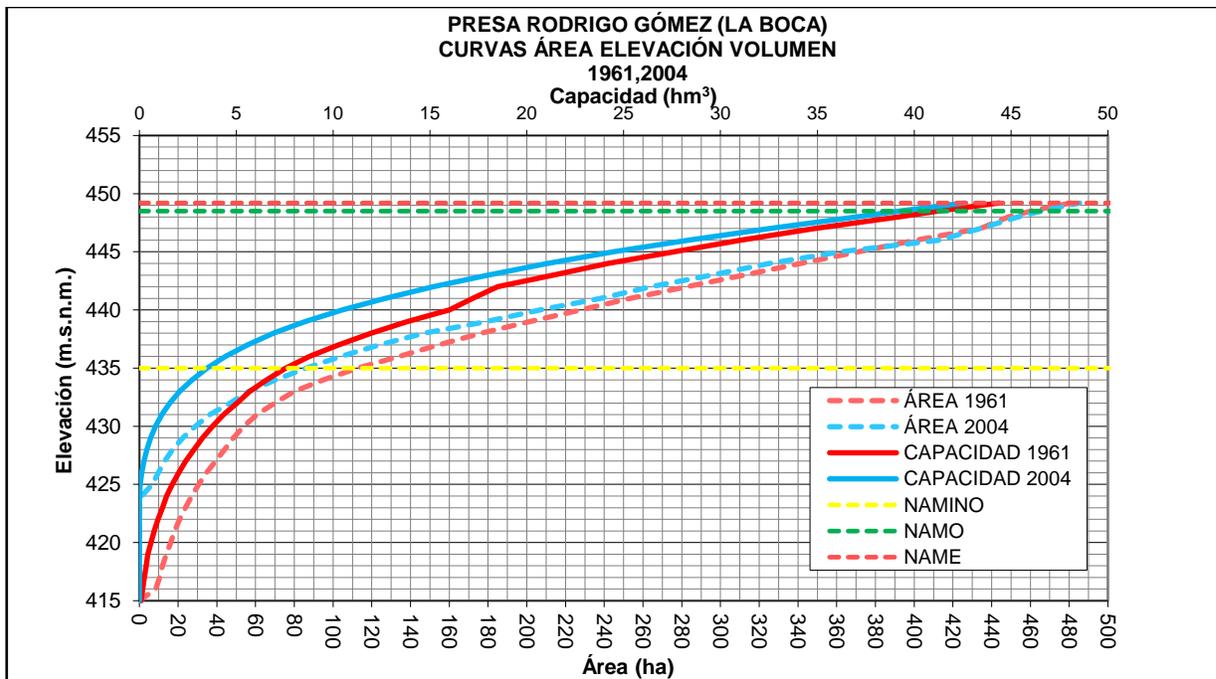
La tasa anual de sedimentación al NAMO guarda mucha relación, esto debido a que como se ha mencionado, las cuencas ocupan superficies similares, con esto se tiene un valor de $0.07 \text{ hm}^3/\text{año}$ para la presa Chihuahua y $0.05 \text{ hm}^3/\text{año}$ para la presa Rodrigo Gómez (La Boca).

En las Gráficas 3 y 4 es posible visualizar la pérdida de volumen que han tenido los embalses en el período de análisis, teniéndose que para la presa Chihuahua se ha perdido un 10.12% sobre la capacidad útil del embalse y un 4.80% para la presa Rodrigo Gómez (La Boca).

Es importante mencionar que de acuerdo al análisis de la evolución del uso de suelo y cobertura vegetal que se llevó a cabo en el Apartado 4.3, estas cuencas han sufrido muy pocas variaciones en el período analizado.



Gráfica 3. Curvas área elevación volumen de la presa Chihuahua para los años 1958 y 2004



Gráfica 4. Curvas área elevación volumen de la presa Rodrigo Gómez (La Boca) para los años 1961 y 2004

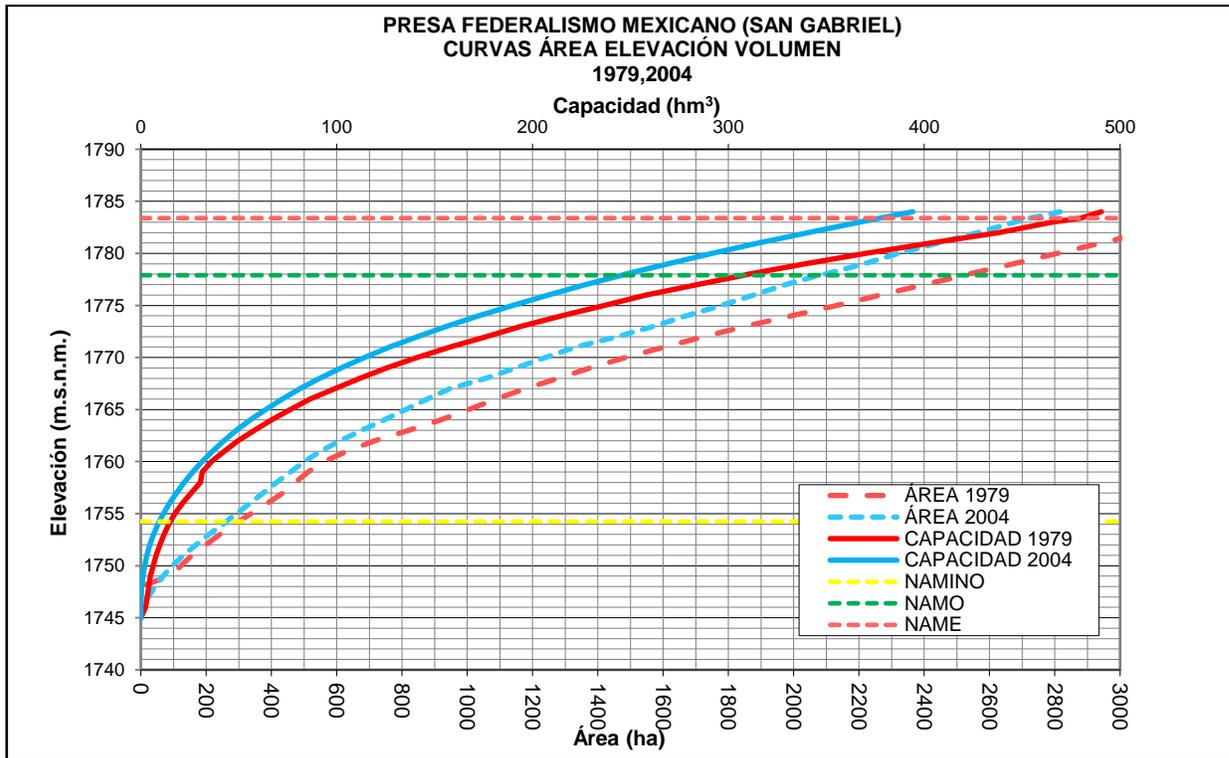
La estimación de la tasa de aporte de sedimentos para la presa Federalismo Mexicano (San Gabriel) muestra valores de $1622.06 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$, los cuales resultan muy elevados en



relación a los obtenidos para las otras presas con cuencas de cabecera estudiadas. Es posible visualizar este comportamiento en la Gráfica 5, en donde la distancia existente entre la línea azul que representa la capacidad del embalse en el año 2004 ha sido considerablemente desplazada de la línea roja que muestra su capacidad original a la altura que le corresponde al NAMO.

El análisis de la evolución del uso de suelo y cobertura vegetal en el período de análisis permite observar que en la cuenca se ha presentado una fuerte deforestación entre el año 1985 y 2002 que provocó la desaparición de alrededor del 50% de la superficie de bosques originales, siendo reemplazada por vegetación secundaria de menor densidad, teniendo esta un aumento de alrededor del 200%.

En la Tabla 47 se puede observar que la tasa anual de sedimentación al NAMO de la presa Federalismo Mexicano (San Gabriel) es muy similar a la de la presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes), sin embargo, siguiendo el procedimiento que se indica en el Apartado 4.1 en el punto 4.3, al dividir esta entre el área de la cuenca, siendo la cuenca de la presa Federalismo Mexicano (San Gabriel) diez veces menor que la de la presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes), la tasa de aporte de sedimentos que se obtiene para la primera presa es en gran manera más alta, lo que permite re afirmar que para cuencas más pequeñas, las tasas de aporte de sedimentos serán mayores.



Gráfica 5. Curvas área elevación volumen de la presa Federalismo Mexicano (San Gabriel) para los años 1979 y 2004



5.1.2. Cuencas intermedias y de emisión

Tabla 48. Acumulación de sedimentos en embalses estimada a partir de la comparación de registros de batimetría en cuencas intermedias y de emisión

Acumulación de sedimentos en embalses de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos				
Concepto de análisis	Pico del Águila	Luis L. León (El Granero)	Internacional La Amistad	Marte R. Gómez (El Azúcar)
	1987-2012	1968-2004	1968-2005	1946-2007
Clasificación de la cuenca (posición geográfica)	Intermedia	Intermedia	Intermedia	Emisión
Clasificación de la cuenca (tamaño)	Grande	Muy grande	Muy grande	Muy grande
Período de análisis (años)	25	36	37	61
Capacidad útil (hm ³)	50	350	4462	1080
Área de la cuenca (km ²)	1525	58340	327436	32220
Área regulada por embalses aguas arriba (km ²)	1539	36127	98657	9190
Porcentaje de pérdida sobre la capacidad útil	3.98%	12.02%	9.46%	27.62%
Tasa anual de sedimentación al NAMO (hm³/año)	0.08	1.17	11.41	4.89
Tasa de aporte de sedimentos (m³/km²-año)	52.20	20.02	34.85	151.77
Desnivel desde el nacimiento del cauce principal a presa (m)	613.1	1414	862.68	1170
Longitud del cauce principal (m)	129390	644705	1034019	260780
Pendiente general del cauce principal %	0.47%	0.22%	0.08%	0.45%

Considerando la información mostrada en la Tabla 48, para cuencas intermedias se obtuvo una tasa de aporte de sedimentos promedio de 35.69 m³/km²-año.

En primera instancia, se analizó la presa Pico del Águila, esta, cuenta con solamente un embalse aguas arriba y su cuenca se clasifica por su tamaño como grande. Para esta presa, se obtuvo una tasa de aporte de sedimentos de 52.20 m³/km²-año, una tasa anual de sedimentación al NAMO de 0.08 hm³/año y un porcentaje de pérdida sobre su capacidad útil del 3.98%. Esta



cuenca ha sufrido decrementos drásticos de las superficies que ocupaban los bosques primarios, incrementándose la vegetación secundaria. Es importante mencionar también, que ha existido un crecimiento acelerado de las superficies agrícolas, específicamente nogaleras que se ubican en las márgenes del río Florido.

Para la presa Luis L. León (El Granero), la cual cuenta con una cuenca considerada muy grande por su tamaño, se estimó una tasa anual de aporte de sedimentos de $20.02 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$, un volumen de sedimentos acumulados al NAMO de $1.17 \text{ hm}^3/\text{año}$ y un porcentaje de pérdida sobre la capacidad útil del 12.02%. La cuenca de esta presa se considera como altamente alterada por actividades antropogénicas debido a que, dentro de esta, se encuentran las superficies de tres distritos de riego, siendo estos el 103 Río Florido, 113 Alto Río Conchos y 005 Delicias (principal zona agrícola del estado de Chihuahua), además, se encuentran distintas ciudades importantes como Chihuahua, Hidalgo del Parral, Delicias, Meoqui y Camargo, así como otras de menor tamaño.

De acuerdo al análisis de la evolución de la vegetación en la cuenca, fue posible observar aumentos en las superficies ocupadas por vegetación secundaria. Aguas arriba de la estructura se localizan siete embalses con capacidades mayores a 10 hm^3 , así como otras de menor tamaño, las cuales regulan un 61.92% de la superficie total de la cuenca.

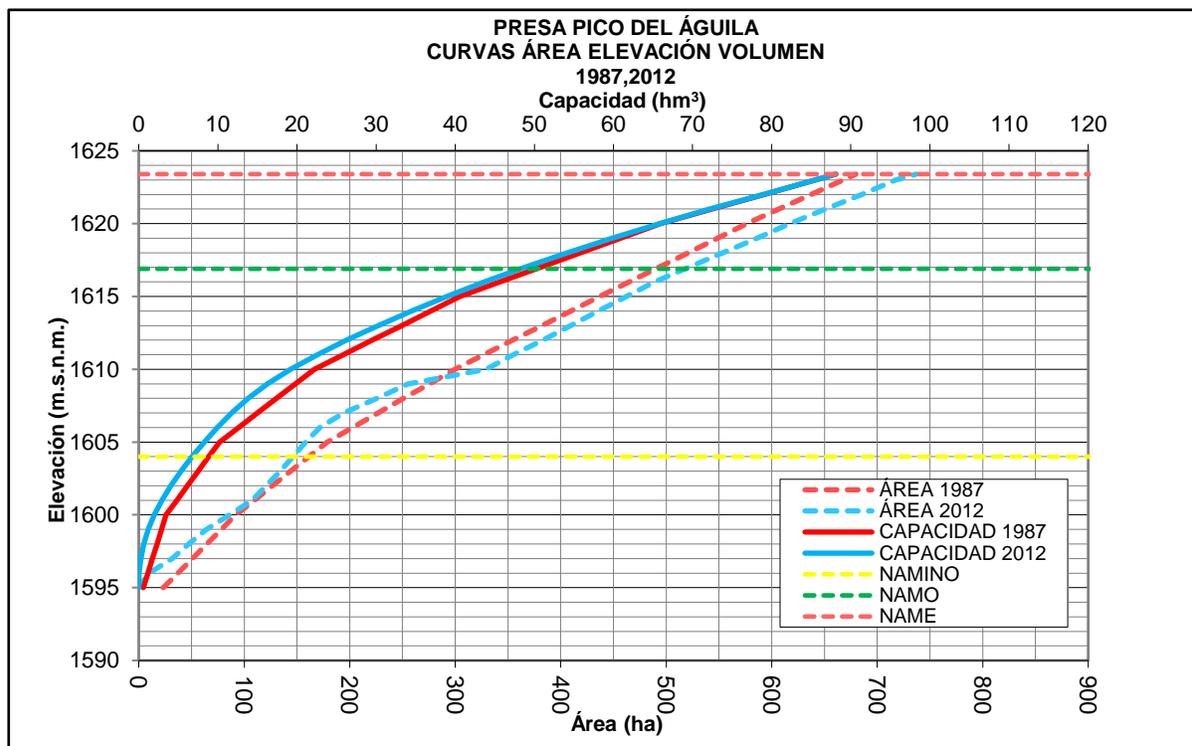
Por último, se analizó la presa Internacional La Amistad, para la cual se estimó una tasa de aporte de sedimentos de $34.85 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$, una tasa anual de sedimentación al NAMO de $11.41 \text{ hm}^3/\text{año}$ y un porcentaje de pérdida sobre su capacidad útil de 9.46%. La cuenca de esta presa se clasifica por su tamaño como muy grande; aguas arriba del embalse se encuentran once presas con una capacidad superior a 10 hm^3 y otras de menor capacidad que permiten la regulación del 30.13% de la superficie total de la cuenca.

Los períodos analizados para las presas con cuencas intermedias no fueron uniformes, teniendo que para la presa Pico del Águila se evaluó la sedimentación en el período de 1987 a 2012, para la presa Luis L. León (El Granero) de 1968 a 2004 y para la presa Internacional La

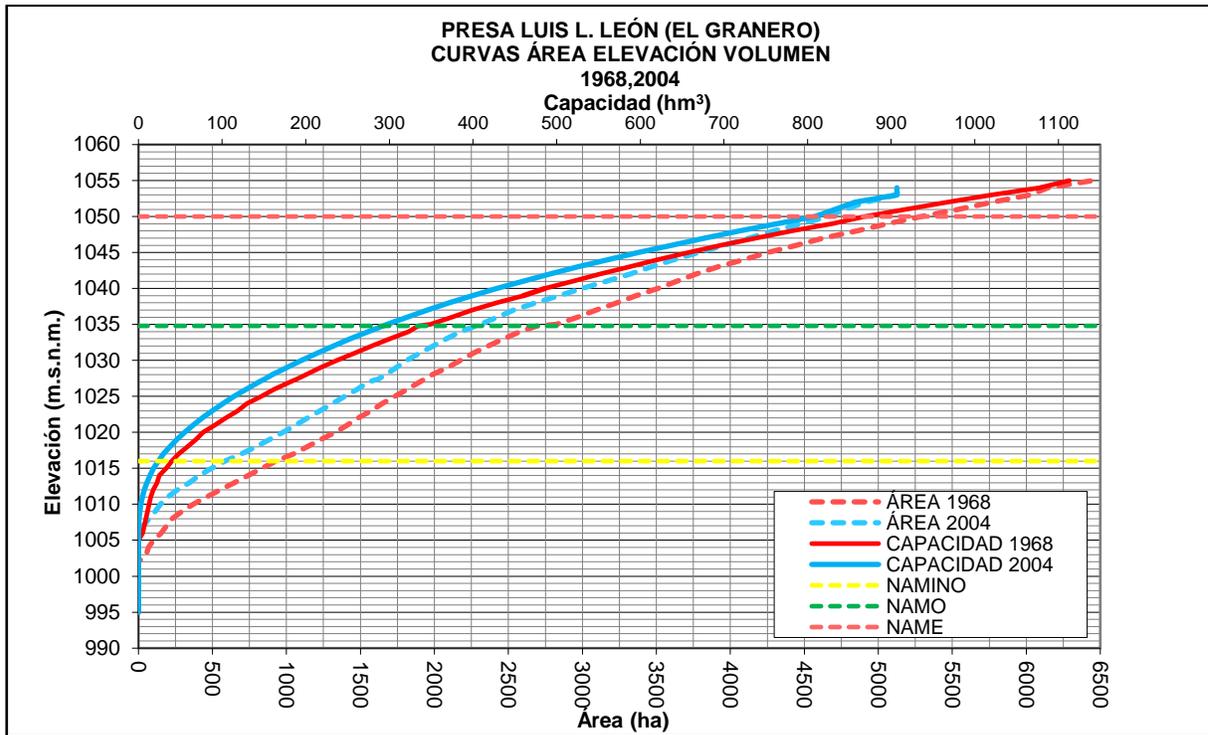


Amistad de 1968 a 2005; con esto, fue posible encontrar que entre más reciente es el período, la tasa de aporte de sedimentos en cuencas intermedias se incrementó, teniendo la más alta para la presa Pico del Águila, en segundo lugar la obtenida para la presa Internacional La Amistad y por último, la estimada para la presa Luis L. León (El Granero). Esta situación puede apreciarse mejor dentro del análisis de la evolución de uso de suelo y vegetación realizada en el Apartado 4.3, en donde los mapas muestran que la degradación más notable de la cobertura vegetal se observa entre las series III, IV y V (años 2002, 2007 y 2011 respectivamente).

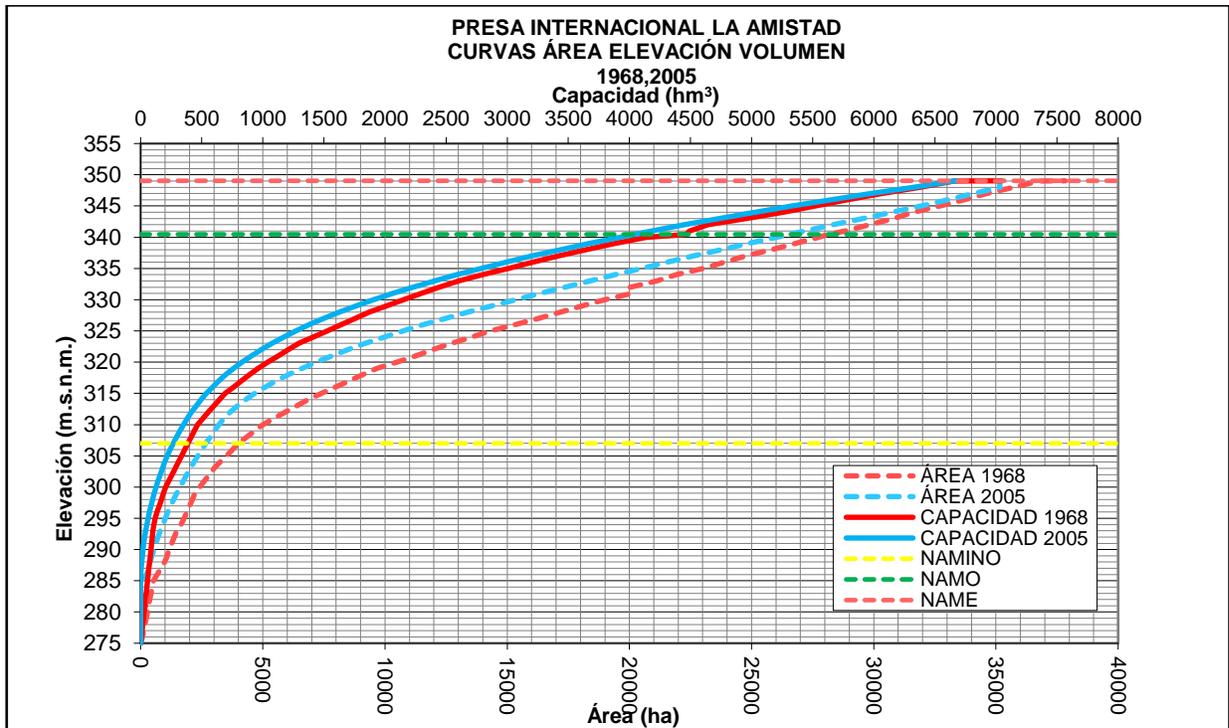
En las siguientes Gráficas es posible observar el comportamiento de la pérdida de capacidad útil que han presentado los embalses correspondientes a cuencas intermedias.



Gráfica 6. Curvas área elevación volumen de la presa Pico del Águila para los años 1987 y 2012



Gráfica 7. Curvas área elevación volumen de la presa Luis L. León (El Granero) para los años 1968 y 2004



Gráfica 8. Curvas área elevación volumen de la presa Internacional La Amistad para los años 1968 y 2005

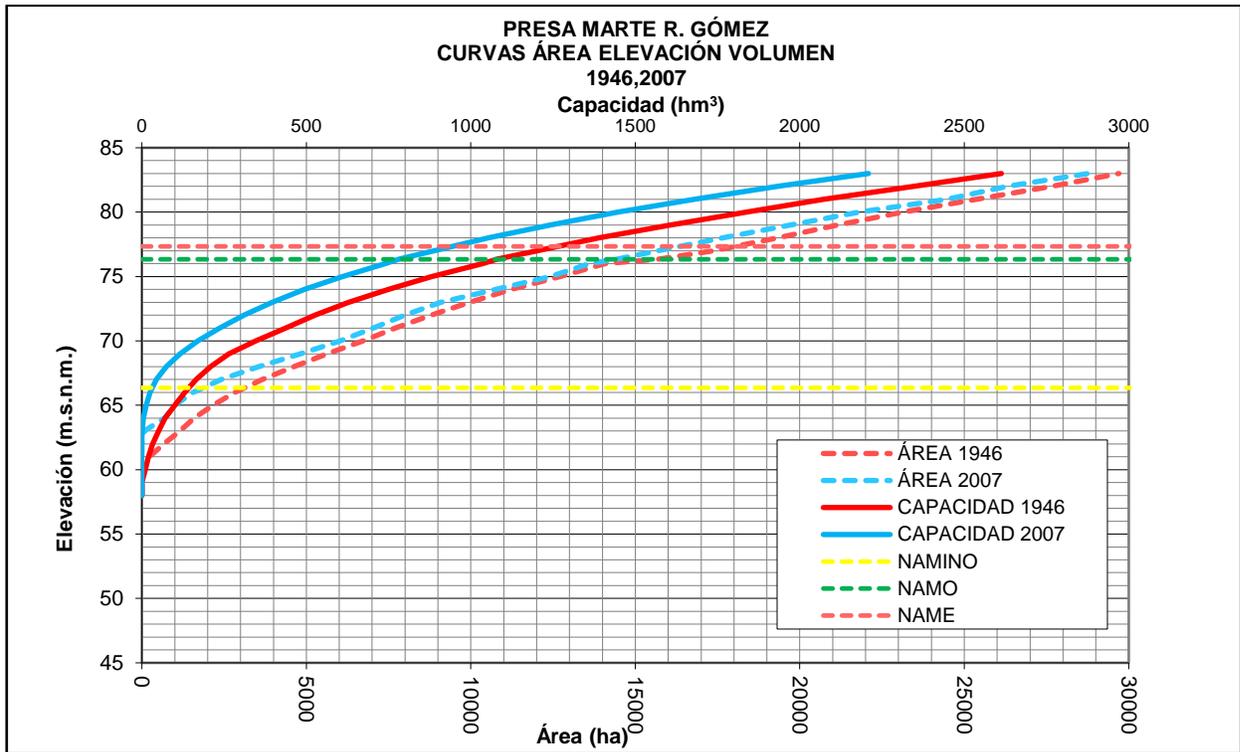


La cuenca de la presa Marte R. Gómez (El Azúcar) corresponde a la única cuenca de emisión analizada, esta, resulta ser la última presa del sistema hidrológico de la cuenca del Río Bravo. Cuenta con dos embalses con una capacidad útil mayor a los 10 hm^3 aguas arriba, los cuales regulan un 28.52% de la superficie total de su cuenca.

Los resultados obtenidos para este embalse son más similares a los estimados para otras cuencas de cabecera que los que se tienen para cuencas intermedias. Se estimó una tasa anual de sedimentación al NAMO de $4.89 \text{ hm}^3/\text{año}$ y una tasa de aporte de sedimentos de $151.77 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$, lo que ha provocado una pérdida sobre su capacidad útil de un 27.62% tal y como se muestra en la Gráfica 9.

De acuerdo al análisis de evolución de uso de suelo y cobertura vegetal que se llevó a cabo en el Apartado 4.3, la zona urbana en la cuenca de la presa Marte R. Gómez tuvo un incremento del 598.86% y las zonas desprovistas de vegetación aumentaron en un 248.12%, situación que puede ser relacionada con que en esta cuenca se localizan asentamientos humanos importantes como la zona metropolitana de Monterrey y la ciudad de Saltillo, entre otras, las cuales se caracterizan por contar con actividades industriales intensivas.

La zona metropolitana de Monterrey ha tenido un crecimiento increíblemente rápido, colocándola como la tercera ciudad más poblada de México, teniéndose que en los últimos 35 años, la población de la zona se duplicó y se tuvo un incremento de la extensión de la zona metropolitana en ocho veces su tamaño (INEGI, 2000), lo que ha presentado una urbanización acelerada, arrasando con la vegetación existente.



Gráfica 9. Curvas área elevación volumen de la presa Marte R. Gómez (El Azúcar) para los años 1979 y 2004



5.2. ANÁLISIS DE LA ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN VASOS DE ALMACENAMIENTO A PARTIR DE MÉTODOS EMPÍRICOS

Tabla 49. Tasas de aporte de sedimentos estimadas a partir de la aplicación de métodos empíricos

Tasas de aporte de sedimentos (m^3/km^2 -año) en embalses de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos. Métodos empíricos									
Método	Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel)	Presa Pico del Águila	Presa La Boquilla (Lago Toronto)	Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes)	Presa Luis L. León (El Granero)	Presa Chihuahua	Presa Internacional La Amistad	Presa Rodrigo Gómez (La Boca)	Presa Marte R. Gómez (El Azúcar)
Clasificación de la cuenca (posición geográfica)	Cabecera	Intermedia	Cabecera	Cabecera	Intermedia	Cabecera	Intermedia	Cabecera	Emisión
Clasificación de la cuenca (tamaño)	Grande	Grande	Muy grande	Muy grande	Muy grande	Intermedia-Pequeña	Muy grande	Intermedia-pequeña	Muy grande
Área de la cuenca (km^2)	1539	1525	21003	10600	58340	393	327436	266	32220
Área regulada por embalses aguas arriba (km^2)	0	1539	0	0	36127	0	98657	0	9190
Comparación de registros de batimetría	1622.06	52.20	243.78	244.37	20.02	186.49	34.85	173.26	151.77
Fórmula Universal de Pérdida de Suelos	372.53	342.79	133.02	101.41	180.45	270.12	233.84	585.54	369.71
Valores Promedio de Aporte de Sedimentos para Cuencas de Diferentes Tamaños (Mediciones de Estados Unidos)	481	481	238	238	238	481	238	481	238
Método del Buró de Reclamación de Suelos de Estados Unidos (USBR)	264.83	265.38	145.56	170.23	115.19	362.01	77.60	395.86	131.97
Método de Namba	351.71	427.13	640.94	585.24	760.40	473.72	575.13	677.73	720.20
Método de Owen y Branson	-485.99	-512.57	-545.72	-506.12	-562.10	-90.37	-588.56	169.63	-517.45

Para el análisis de los resultados obtenidos a partir de la aplicación de métodos empíricos que permitieron la estimación de las tasas de aporte de sedimentos en los embalses estudiados, se enlistan cada uno de estos métodos y los aspectos importantes encontrados en relación a lo mostrado en la Tabla 49:

1. Fórmula Universal de Pérdida de Suelos: Este es un método que considera dentro de su análisis que el proceso de erosión en un área determinada es resultado de la interacción de la lluvia, el suelo, la topografía y el uso de suelo y la cobertura vegetal, así como del manejo de la tierra, fundamentándose en la capacidad que posee la precipitación para provocar erosión y la resistencia que tiene el suelo para evitarla.



Se estimaron tasas de aporte de sedimentos con valores similares teniendo una media de $138.29 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$ para las presas La Boquilla (Lago Toronto), Francisco I. Madero (Las Vírgenes) y Luis L. León (El Granero), esto se debe a que son cuencas contiguas con regímenes de precipitación, características topográficas y rasgos fisiográficos muy parecidos.

Se puede identificar otro grupo de resultados para las presas Federalismo Mexicano (San Gabriel) y Pico del Águila, las cuales cuentan con una tasa de aporte de sedimentos media de $357.66 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$. Las cuencas de estas dos presas guardan similitud en cuanto al de tipo de suelo y vegetación con relación a las mencionadas en el primer grupo, sin embargo, por tener una precipitación media más alta, los valores de las tasas de aporte de sedimentos ascienden.

Algo similar sucede con la cuenca de la presa Chihuahua, las características de uso de suelo y cobertura vegetal y tipo de suelo son parecidas a las del primer grupo, sin embargo, al tener una precipitación media anual 100 mm mayor que el promedio de dicho grupo, el resultado estimado para la tasa de aporte de sedimentos de este embalse es de $270.12 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$.

Una parte considerable de la cuenca de la presa Internacional La Amistad es ocupada por las cuencas de las presas Federalismo Mexicano (San Gabriel), Pico del Águila, La Boquilla (Lago Toronto), Francisco I. Madero (Las Vírgenes), Chihuahua y Luis L. León (El Granero), es por esto, que los valores del factor de erosionabilidad del suelo (K), factor de manejo de vegetación (C) y el factor de prácticas mecánicas en el manejo de la vegetación agrícola (P) son bastante similares a los de estas presas, sin embargo, la precipitación media anual que se tiene para la presa Internacional La Amistad es un 66% mayor que la media para el grupo mencionado, lo que resulta en una tasa de aporte de sedimentos de $233.84 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$.

La vegetación existente en las cuencas de las presas Rodrigo Gómez (La Boca) y Marte R. Gómez (El Azúcar) consiste principalmente en matorrales primarios, lo que propicia valores de los factores de manejo de vegetación (C) similares; de igual manera, el tipo de suelo de ambas cuencas guarda similitud, por lo que el factor de erosionabilidad del suelo (K) también resulta parecido, siendo ambos factores un poco más altos para la presa Marte R. Gómez (El Azúcar). A



pesar de guardar dichas similitudes, para la presa Rodrigo Gómez (La Boca) la precipitación media anual tiene un valor dos veces más alto que la que se tiene en la presa Marte R. Gómez, lo que da como resultado tasas de aporte de sedimentos de $369.71 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$ y $585.54 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$, respectivamente.

Este método no permite la identificación de resultados por grupos de cuencas de cabecera, intermedias o emisión ya que no toma en cuenta la existencia de embalses aguas arriba.

2. Valores promedio de aporte de sedimentos para cuencas de diferentes tamaños (Mediciones de Estados Unidos): Para este método fue necesario dividir las cuencas de los nueve embalses estudiados en una clasificación dada por su tamaño, debido a que los valores de aporte de sedimentos son fijos para cuatro rangos de área de cuenca en km^2 ; de esta manera, fue posible obtener dos grupos de resultados. El primero tiene un rango de 259 a 2590 km^2 e incluye a las presas Federalismo Mexicano (San Gabriel), Pico del Águila, Chihuahua y Rodrigo Gómez (La Boca) con una tasa de aporte de sedimentos de $481 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$.

El segundo grupo corresponde a las cuencas con superficie mayor de 2590 km^2 e incluye a las presas La Boquilla (Lago Toronto), Francisco I. Madero (Las Vírgenes), Luis L. León (El Granero), Internacional La Amistad y Marte R. Gómez, para las cuales se obtiene una tasa de aporte de sedimentos de $238 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$.

Al tener este método rangos muy amplios y el hecho de que solo consideran el área de la cuenca, no es posible obtener resultados para grupos de cuencas de cabecera, intermedias o de emisión, pudiéndose estimar solo un valor medio de tasa de aporte de sedimentos para los embalses que se estudiaron.

3. Método del Buró de Reclamación de Suelos de Estados Unidos (USBR): Este método, al igual que el de valores promedio de aporte de sedimentos para cuencas de diferentes tamaños (Mediciones de Estados Unidos), trabaja directamente con el área de la cuenca, la diferencia, es que se lleva a cabo a partir de la aplicación de una ecuación.



Se obtuvieron valores similares para las presas Federalismo Mexicano (San Gabriel) y Pico del Águila con una tasa de aporte de sedimentos promedio de $265.10 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$; otro grupo se conformó por las presas La Boquilla (Lago Toronto), Francisco I. Madero (Las Vírgenes), Luis L. León (El Granero) y Marte R. Gómez (El Azúcar) con una tasa de aporte de sedimentos promedio de $140.74 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$; un tercer grupo con las presas Chihuahua y Rodrigo Gómez (La Boca) con una tasa de aporte de sedimentos media de $378 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$; y por último, el valor obtenido para la presa Internacional La Amistad de $77.60 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$.

Es posible observar que conforme las áreas de las cuencas aumentan, las tasas de aporte de sedimentos disminuyen, por lo que para la presa Internacional La Amistad, la cual tiene una cuenca con una superficie de $327,436 \text{ km}^2$, la tasa de aporte de sedimentos es considerablemente menor que las obtenidas para cuencas de menor tamaño, a pesar de que se encuentren clasificadas como grandes y muy grandes.

Debido a que este método solo considera como variable el área de la cuenca, no es posible identificar resultados específicos para cuencas de cabecera, intermedias o de emisión.

4. Método de Namba: Para aplicar este método, es necesario contar con datos de precipitación media anual, desnivel máximo de cotas en la cuenca y la relación entre las áreas con suelo desnudo y las que están cubiertas con vegetación. De acuerdo con la configuración de la fórmula (Ecuación 3), es posible observar que la variable con más impacto en los resultados es el desnivel máximo de cotas en la cuenca, seguida por la precipitación media anual y, por último, la relación entre las áreas de suelo desnudo y las cubiertas con vegetación, misma que podría considerarse como despreciable ya que no modifica los resultados finales.

Considerando estos aspectos, las tasas de aporte de sedimentos obtenidas a partir de la aplicación de este método se enlistan a continuación:

- 1. Presa Luis L. León (El Granero):** $760.4 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$. Cuenta con el desnivel más alto de todas las cuencas estudiadas debido a que su cauce principal, el río Conchos, inicia en la Sierra Madre Occidental a una elevación de 2409 m.s.n.m. y el embalse se encuentra a



una elevación de 995 m.s.n.m. en su desplante, dando como resultado un desnivel de 1414 metros.

2. **Presa Marte R. Gómez (El Azúcar):** 720.20 m³/km²-año. El diferencial de elevación entre cotas máximas y mínimas de esta cuenca ocupa el segundo lugar de todas las cuencas analizadas, además, para esta presa se tiene una precipitación media anual de 558.78 mm, lo que incide en una tasa de aporte de sedimentos considerablemente alta.
3. **Presa Rodrigo Gómez (La Boca):** 677.73 m³/km²-año. El desnivel de la cuenca de esta presa es de 793.96 metros, pudiéndose considerar como un valor bajo de acuerdo a los que se tienen para las cuencas de los otros embalses, sin embargo, la tasa de aporte de sedimentos para esta presa es alta debido al valor de precipitación media anual de 1023.78 mm, el cual resulta ser el más alto de todas las presas analizadas.
4. **Presa La Boquilla (Lago Toronto):** 640.94 m³/km²-año. Para la presa La Boquilla (Lago Toronto) se tiene un desnivel de 1167 metros, considerado como un valor alto, es por esto que a pesar de que su precipitación media anual es de 292.24 mm, la tasa de aporte de sedimentos obtenida muestra valores elevados.
5. **Presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes):** 585.24 m³/km²-año. El desnivel máximo con el que cuenta la cuenca de esta presa tiene un valor de 1036.2 metros y se tiene una precipitación media anual de 313.78 mm.
6. **Presa Internacional La Amistad:** 575.13 m³/km²-año. A pesar de que esta cuenta con un valor de precipitación media anual considerado de medio a alto respecto a los valores que se tienen para los otros embalses, su desnivel es de 862.68 metros, por lo que la tasa de aporte de sedimentos se encuentra por debajo de la media estimada por este método.
7. **Presa Chihuahua:** 473.72 m³/km²-año. Esta cuenca guarda similitud topográfica con la cuenca de la presa Rodrigo Gómez (La Boca), sin embargo, su precipitación media anual resulta ser un 40% menor, por lo que la tasa de aporte de sedimentos estimada para este embalse es mucho más baja que la presa con la que se realiza la comparación.



8. **Presa Pico del Águila:** $427.13 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$. La cuenca de este embalse cuenta con un desnivel considerado como bajo respecto a los que se tienen para otros embalses, así como una precipitación media anual que se encuentra por debajo del promedio que se tiene para todas las presas analizadas.

9. **Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel):** $351.71 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$. Debido a que el desnivel máximo de cotas en la cuenca es el menor respecto a todos los embalses analizados y la precipitación media anual se encuentra por debajo del promedio que se tiene para estos, la presa Federalismo Mexicano (San Gabriel) presenta la tasa de aporte de sedimentos menor a partir de la aplicación del método de Namba.

Debido a que este método considera como factor principal la topografía del embalse y la precipitación, no existen patrones definidos para cuencas de cabecera, intermedias o de emisión.

5. **Método de Owen y Branson:** Este método considera como variable principal el cociente entre el desnivel máximo de cotas en la cuenca y la longitud total del cauce principal y en segunda instancia, al porcentaje de suelo desnudo en la cuenca, el cual se puede considerar como despreciable debido a que con valores muy pequeños cercanos al 0% como es el caso de las superficies de las cuencas estudiadas no se tienen impactos en el resultado final.

Se obtuvieron resultados negativos para todas las presas estudiadas a excepción de la presa Rodrigo Gómez (La Boca); esto, debido a que se clasifica como una cuenca intermedia-pequeña con una pendiente fuerte y un tramo corto de cauce principal, lo que da como resultado un cociente entre el desnivel máximo y la longitud del cauce bastante alto en comparación a los obtenidos para los otros embalses.



Es posible observar que para la presa Chihuahua, la cual tiene características topográficas similares, el valor de la tasa de aporte de sedimentos obtenido por este método se acerca más a un rango positivo que los correspondientes a otras cuencas.

Tomando en cuenta estos aspectos, el método de Owen y Branson podrá ser utilizado solamente cuando los cocientes entre el desnivel máximo de cotas y la longitud del cauce principal sean iguales o mayores a 0.032, mismos que se obtendrán al tenerse pendientes accidentadas en tramos cortos de cauces.

5.3. COMPARACIÓN DE LA ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS ESTIMADOS A PARTIR DE REGISTROS DE BATIMETRÍA Y MÉTODOS EMPÍRICOS

Tomando en cuenta lo analizado en los Apartados 5.1 y 5.2, se realizaron gráficas de comparación para visualizar los resultados de la estimación de tasas de aporte de sedimentos a partir de la comparación de registros existentes de batimetría y la aplicación de métodos empíricos.

1. Fórmula Universal de Pérdida de Suelos

Como se observa en la Gráfica 10, para cuencas de cabecera, a partir de la aplicación de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos, se obtuvieron valores similares para la presa La Boquilla (Lago Toronto) y la presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes), los cuales se encuentran alrededor de un 50% debajo de los valores obtenidos a partir de la comparación de registros de batimetría. Estas dos cuencas se clasifican por su tamaño como muy grandes, por lo que se puede decir que, para presas de esta categoría en zonas áridas, como lo es la zona de estudio, el método muestra valores bajos comparados con la realidad.

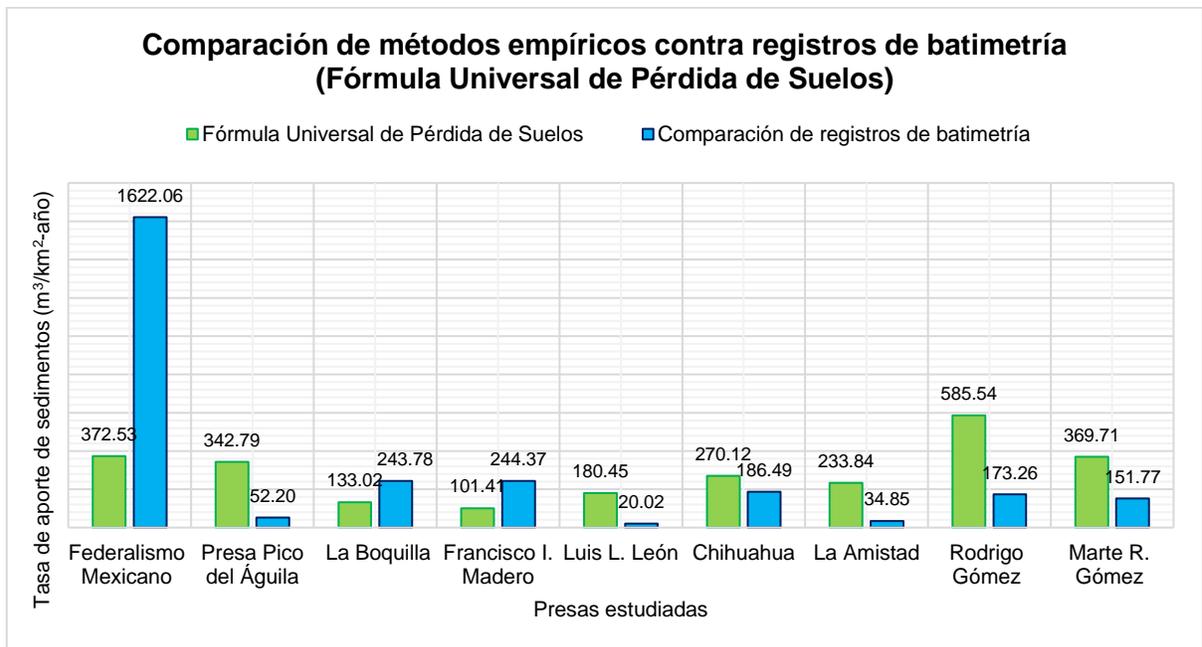
En el caso de la presa Federalismo Mexicano (San Gabriel), como ya se había mencionado, los resultados que se obtienen a partir de la comparación batimétrica son muy elevados y no guardan consistencia con los que se tienen para otros embalses, por lo que el resultado obtenido a partir de la aplicación de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos no tiene similitud con lo que se tiene en la realidad.



Para el caso de la presa Chihuahua, la cual se clasifica por su tamaño como cuenca intermedia-pequeña, el valor obtenido por el método es un 69% más alto que la tasa de aporte de sedimentos real obtenida a partir de registros de batimetría.

Como se había comentado en Apartados anteriores, la presa Chihuahua y la Rodrigo Gómez (La Boca) guardan similitudes en aspectos de tamaño, topográficos y capacidad útil, sin embargo, al ser la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos un método que le da alto peso a la erosividad de la lluvia, para el segundo embalse, se obtiene un valor considerablemente alto debido a los regímenes de precipitación que se tienen en la zona de su cuenca.

En cuestión de las cuencas intermedias, los valores obtenidos por la Fórmula Universal de Pérdida de suelos son sensiblemente mayores a los que efectivamente se tienen en las presas, esto, debido a que el método no considera si la cuenca analizada es modificada por embalses aguas arriba.



Gráfica 10. Comparación de tasas de aporte de sedimentos estimadas a partir del método de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos y registros de batimetría

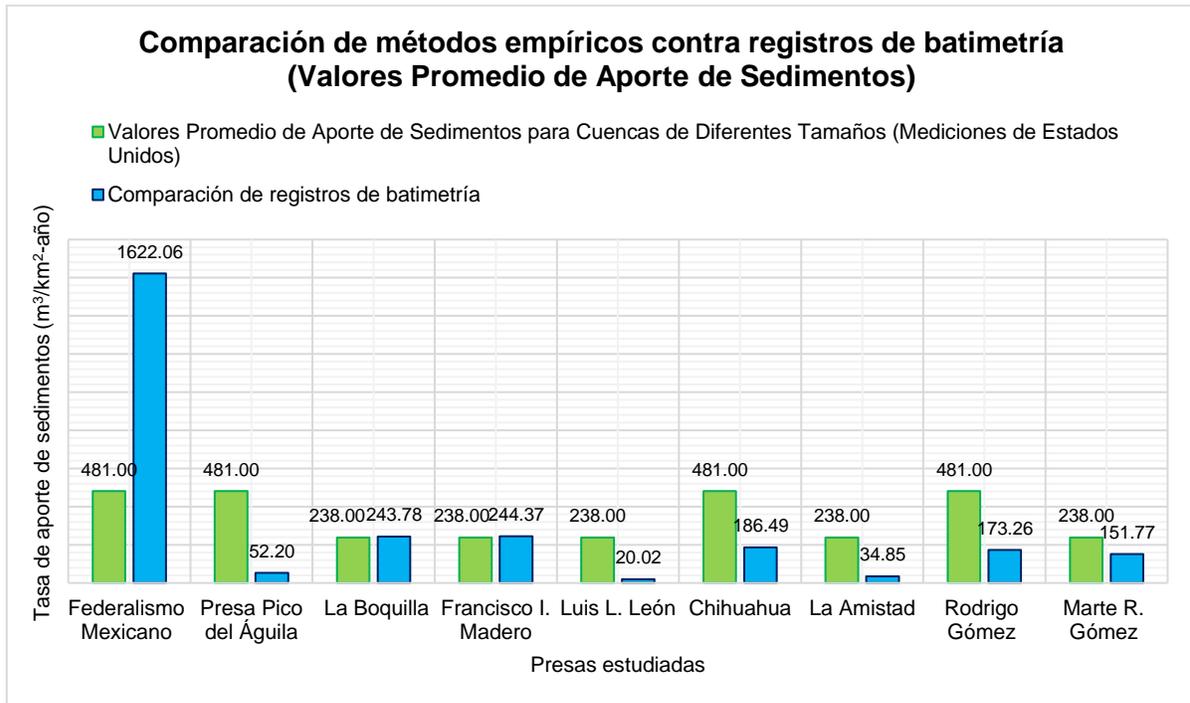


2. Valores Promedio de Aporte de Sedimentos para Cuencas de Diferentes Tamaños (Mediciones de Estados Unidos)

Tal y como se muestra en la Gráfica 11, para cuencas de cabecera se encontraron resultados consistentes en el rango de áreas de más de 2590 km² que corresponden a cuencas muy grandes de cabecera, siendo estas las presas La Boquilla (Lago Toronto) y Francisco I. Madero (Las Vírgenes), para las cuales por medio del método se obtiene una tasa de aporte de sedimentos de 238 m³/km²-año contra una tasa media de aporte de sedimentos estimada a partir de la comparación de registros de batimetría para los dos embalses de 244 m³/km²-año.

Para cuencas intermedias-pequeñas de cabecera, este método no mostró consistencia, proporcionando valores alrededor de un 40% más altos que los obtenidos a partir de la comparación batimétrica. Es posible afirmar que entre más pequeña sea la cuenca de un embalse, su tasa de aporte de sedimentos será mayor, sin embargo, valores más bajos para estas cuencas pueden deberse a que han sido poco alteradas en materia de uso de suelo y cobertura vegetal en el período analizado.

Los valores que se obtienen para cuencas intermedias y de emisión se encuentran considerablemente más altos que lo estimado a partir de las batimetrías, lo que indica que este método no puede ser aplicado para la estimación de aporte de sedimentos en cuencas que cuenten con estructuras aguas arriba.



Gráfica 11. Comparación de tasas de aporte de sedimentos estimadas a partir del método de valores promedio de aporte de sedimentos y registros de batimetría

3. Método del Buró de Reclamación de Suelos de Estados Unidos (USBR)

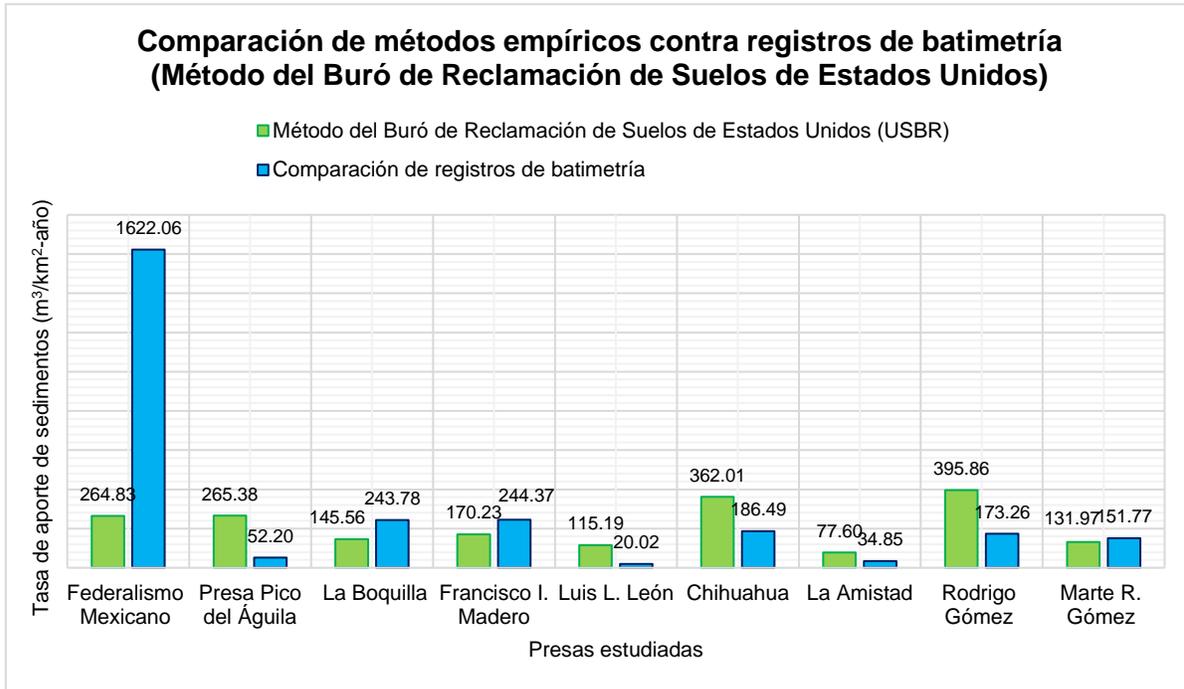
En relación a lo que se muestra en la Gráfica 12, por el método del USBR para cuencas de cabecera muy grandes los valores que se obtienen oscilan entre un 60 y 70% por debajo de lo que las batimetrías indican para las presas La Boquilla (Lago Toronto) y Francisco I. Madero (Las Vírgenes).

Para las presas Chihuahua y Rodrigo Gómez (La Boca), al ser un método que trabaja solamente con el área de la cuenca, se obtienen valores entre un 45 y 50% más elevados que lo que se estima a partir de la comparación de registros de batimetría.

Los resultados que se tienen a partir de la aplicación del método para la presa Marte R. Gómez son consistentes con los que se obtienen de la comparación de batimetrías, a pesar de que es una cuenca de emisión.



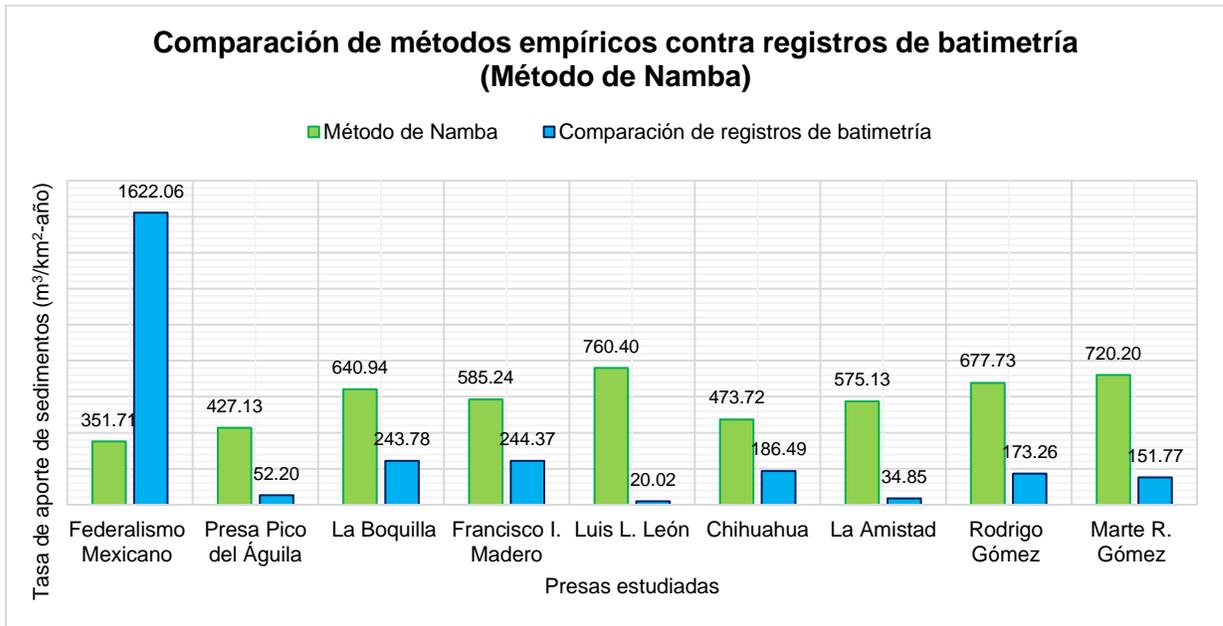
Por otra parte, al igual que en los otros métodos, los resultados obtenidos para cuencas intermedias no permiten encontrar patrones claros de comportamiento que se relacionen con la existencia de embalses aguas arriba.



Gráfica 12. Comparación de tasas de aporte de sedimentos estimadas a partir del método del Buró de Reclamación de Suelos de Estados Unidos y registros de batimetría

4. Método de Namba

Como se mencionó en el Apartado 5.2, este método trabaja casi en su totalidad con el desnivel máximo de cotas en la cuenca, situación que al ser en su mayoría cuencas con pendientes de medias a accidentadas, se obtienen valores muy altos en comparación con los estimados a partir de la comparación batimétrica para todos los grupos de cuenca, exceptuando la tasa de aporte de sedimentos que se tiene para la presa Federalismo Mexicano (San Gabriel), que podría considerarse como fuera de rango respecto a lo que estima para los otros embalses. En la Gráfica 13 es posible ver la comparación.

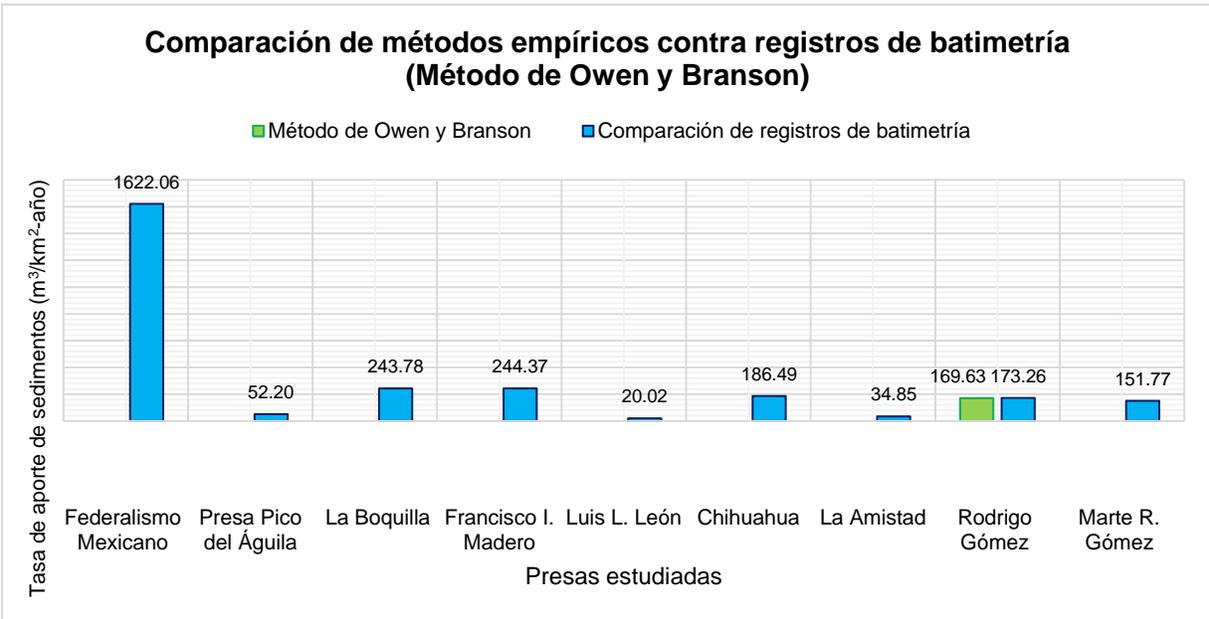


Gráfica 13. Comparación de tasas de aporte de sedimentos estimadas a partir del método de Namba y registros de batimetría

5. Método de Owen y Branson

Como se mencionó anteriormente, este método considera como variable principal el desnivel máximo de cotas en la cuenca y la longitud total del cauce principal, situación que arroja resultados negativos para todas las cuencas en donde los cauces principales tienen longitudes muy grandes, lo que disminuye su pendiente general y el cociente entre desnivel y longitud.

De esta forma, la única presa que pudo ser analizada por este método fue la Rodrigo Gómez (La Boca), debido a que cuenta con una pendiente fuerte en un tramo corto de cauce principal. Los resultados que se obtienen para esta presa a partir de la aplicación del método tienen un alto grado de similitud con lo estimado a partir de la comparación batimétrica (Véase Gráfica 14).



Gráfica 14. Comparación de tasas de aporte de sedimentos estimadas a partir del método de Owen y Branson y registros de batimetría

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se establecen las principales conclusiones obtenidas en la investigación, así como las recomendaciones y áreas de oportunidad para la consecución de investigaciones futuras.

6.1. CONCLUSIONES

En el caso de cuencas de cabecera, se puede concluir que fue posible identificar dos grupos de acuerdo a una clasificación por su tamaño, siendo estas las muy grandes y las intermedias-pequeñas.

El grupo de cuencas muy grandes que se encuentra conformado por la presa La Boquilla (Lago Toronto) y Francisco I. Madero (Las Vírgenes), resultó tener una tasa de aporte de sedimentos promedio del orden de $244 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$.

A partir del análisis realizado, se encontró que se tienen porcentajes de pérdida sobre la capacidad útil del orden de 10.52% y del 34.13% en estas dos presas respectivamente. Su importancia radica en que son la fuente de abastecimiento de 74,476 hectáreas productivas en el Distrito de Riego 005 Delicias (CONAGUA, 2020m), y su vida útil ha sido superada, teniendo



la presa La Boquilla (Lago Toronto) 104 años en operación a partir de la terminación de su construcción y la presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes), 71 años, por lo que con estos porcentajes de volumen azolvado en sus vasos de almacenamiento, una de las actividades económicas más importantes del estado de Chihuahua se podría poner en riesgo, al disminuir la capacidad de agua aprovechable para riego.

Se encontró que la presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes) es la más afectada por la sedimentación en toda la zona de estudio, debido a que en su cuenca se tienen amplias superficies agrícolas de temporal, así como zonas donde se practica el pastoreo de forma intensiva, lo que ha ocasionado fuerte erosión de los suelos que la conforman. Adicionalmente fue posible evaluar que el porcentaje de pérdida de la superficie de bosques originales fue de aproximadamente un 75.37%, al tiempo que se incrementó exageradamente la superficie que corresponde a matorrales y vegetación secundaria de bosques y pastizales, siendo este incremento del orden de 529.08%.

De acuerdo a la tasa anual de sedimentación al NAMO que fue posible definir en el período de análisis, la presa Francisco I. Madero (Las Vírgenes) corre el riesgo de perder la totalidad de su capacidad útil en los próximos 70 años. Sin embargo, éste dato resulta ser alentador ya que no considera que desde el año 2004, fecha en que se realizó la última batimetría para este embalse, el deterioro de los escasos suelos de la cuenca, la deforestación, el sobrepastoreo, y los incendios forestales han ido en aumento acelerado a la fecha. Por otra parte, se tienen las afectaciones al ciclo hidrológico debidas a las modificaciones del uso de suelo y cobertura vegetal y los impactos del cambio climático, por lo que el período previsto para la pérdida de la totalidad de la capacidad útil de este embalse podrá verse drásticamente acortado si no se toman medidas de control para generación de sedimentos. Se considera este caso como el más representativo, por la pérdida acelerada de capacidad útil que se ha presentado en este embalse, sin embargo, esta situación prevalece en toda la cuenca del río Bravo y afectará de manera similar a todas sus presas.



En el caso de las cuencas intermedias-pequeñas, la tasa de aporte de sedimentos promedio obtenida fue de $179.87 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$. Este grupo se encuentra conformado por la presa Chihuahua y la presa Rodrigo Gómez (La Boca), las cuales cuentan con regímenes de precipitación muy distintos, sin embargo, sus condiciones topográficas, de tipo y uso de suelo y vegetación, así como la superficie que ocupa su cuenca y la capacidad útil de sus vasos de almacenamiento son similares. Para estas cuencas no se encontró un impacto negativo considerable en la degradación de su cobertura vegetal, lo que permite concluir que si bien, los factores climatológicos representan un componente fundamental en el comportamiento de los sedimentos, la topografía, el área de la cuenca y la cobertura vegetal son aspectos con mayor impacto en la producción de los mismos en cuencas intermedias-pequeñas que se localizan en zonas áridas. Esta situación puede ser comprobada a partir de la aplicación de los métodos empíricos realizada, debido a que los métodos que no consideran la precipitación como una variable proporcionan resultados altamente similares para este grupo de cuencas.

En el caso de la presa Federalismo Mexicano (San Gabriel), la cual se clasificó como cuenca de cabecera grande, se obtuvo una tasa de aporte de sedimentos de $1622.06 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$. Esta se encuentra en la misma zona que las presas La Boquilla (Lago Toronto) y Francisco I. Madero (Las Vírgenes), de igual manera, se encuentra aguas arriba de la presa Pico del Águila, la cual cuenta con una tasa de aporte de sedimentos consistente con otras cuencas intermedias, por lo que los resultados obtenidos para este embalse no pueden ser considerados como confiables, ya que no guardan similitud con los que se tienen para otras cuencas de cabecera. Dentro del análisis realizado para la presa Pico del Águila no fue posible observar alteraciones que ocasionen que las tasas de aporte de sedimentos estén fuera del rango obtenido para los otros embalses, lo que impide verificar alguna situación extrema que haya provocado los resultados excesivamente altos que se tienen para la Presa Federalismo Mexicano (San Gabriel).

A partir del análisis realizado en cuencas de cabecera, es posible concluir que la zona de estudio está presentando una fuerte producción de sedimentos, teniendo una media de 211.97



$\text{m}^3/\text{km}^2\text{-año}$ contra una tasa de aporte de sedimentos específica de 50 a $100 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$ establecida por el Banco Mundial para la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos (Véase Figura 1) (Annandale et al., 2016).

En el grupo de cuencas intermedias estudiadas se obtuvo una tasa de aporte de sedimentos promedio de $35.69 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$. Es posible observar que las cuencas de estos tres embalses cuentan con características distintas, sobre todo en el tamaño de su superficie, sin embargo, el contar con presas aguas arriba que generan un represamiento del escurrimiento de sus afluentes impacta directamente en la disminución de las tasas de aporte de sedimentos, lo que permite concluir que la mayor parte de los sedimentos que se generan en un sistema hidrológico se depositan en los embalses localizados en las cabeceras, lo que confirma que la construcción de estructuras que permitan la retención de los azolves aguas arriba de las presas de almacenamiento incidirá directamente en la conservación de su vida útil, permitiendo un manejo sustentable de estas.

Gracias al análisis de la evolución de uso de suelo y vegetación para diferentes períodos se encontró que en la zona de estudio se ha presentado una degradación de la vegetación mayor en el período de 2002 a 2011. Esta situación impactó directamente en el aumento de las tasas de aporte de sedimentos en cuencas intermedias, por lo que se reafirma que una de las mejores maneras de evitar la sedimentación de un embalse radica en prácticas adecuadas de control de suelos, así como de prácticas de mitigación de la deforestación.

Para el caso de la única cuenca de emisión analizada, siendo ésta la de la presa Marte R. Gómez (El Azúcar), se encontró que a pesar de localizarse en la salida del sistema hidrológico y contar con dos embalses aguas arriba, la antropización en aumento que se ha presentado en su cuenca ha propiciado incrementos en el transporte de sedimentos, provocando tasas de aporte de sedimentos considerablemente elevadas en relación a las que se tienen para cuencas intermedias.

En la Figura 23 es posible observar el comportamiento de las tasas de aporte de sedimentos en la zona de estudio a partir de los resultados encontrados.

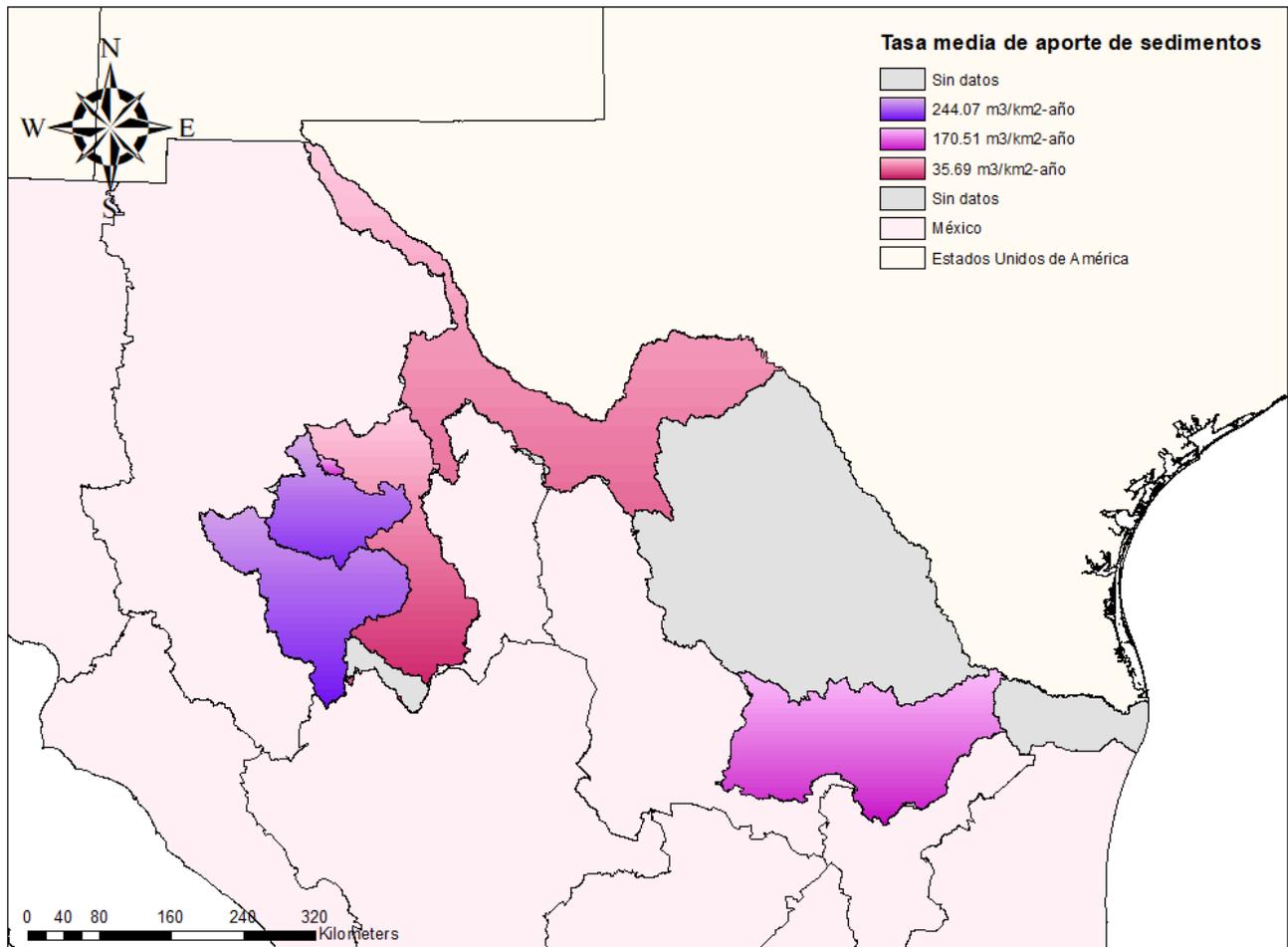


Figura 23. Mapa de zonificación de las tasas medias de aporte de sedimentos en la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos. Fuente: Elaboración propia

Se llevó a cabo la estimación de las tasas de aporte de sedimentos por medio de cinco métodos empíricos con la finalidad de realizar una comparación con los resultados obtenidos a partir de la información batimétrica disponible; de esta manera, se emplearon: (1) la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos, (2) el método de valores promedio de aporte de sedimentos para cuencas de diferentes tamaños (mediciones de Estados Unidos), (3) el método del Buró de Reclamación de Suelos de Estados Unidos (USBR), (4) el método de Namba y (5) el método de Owen y Branson.

En primera instancia respecto a los métodos empíricos, es posible concluir que no es recomendable utilizar estos métodos en cuencas intermedias o de emisión, ya que ninguno de



ellos considera la existencia de estructuras aguas arriba y los resultados obtenidos difieren en gran manera de la producción de sedimentos real que se ha dado para estas cuencas en la zona de estudio. Estos métodos resultan ser algunos de los más comunes al momento de definir la capacidad de azolves para un embalse nuevo, por lo que es posible que las grandes presas que se han construido en períodos más recientes en cuencas intermedias o de emisión cuentan con diseños de capacidad de azolves conservadores.

En cuencas de cabecera, el método de valores promedio de aporte de sedimentos para cuencas de diferentes tamaños (mediciones de Estados Unidos) proporciona resultados consistentes con los obtenidos a partir de la comparación de registros de batimetría para las cuencas clasificadas como muy grandes, sin embargo, para las cuencas intermedias-pequeñas, los valores se encuentran sensiblemente más altos, teniendo una tasa de aporte de sedimentos del orden de $481 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$ contra $179.88 \text{ m}^3/\text{km}^2\text{-año}$. Esta situación es similar a lo encontrado por el método del Buró de Reclamación de Estados Unidos (USBR), en donde al ser el área la única variable, se tiene que conforme el tamaño de la cuenca es más pequeño, su tasa de aporte de sedimentos será más grande, situación que resulta contrario a lo obtenido en esta investigación, en donde al encontrarse las cuencas intermedias-pequeñas con alteraciones mínimas en el uso de suelo y cobertura vegetal, las tasas de aporte de sedimentos son menores a las teóricas.

Respecto al método de Namba, los valores obtenidos para las cuencas muy grandes resultaron ser 2.5 veces mayores que los estimados a partir de la comparación batimétrica, y para el caso de las cuencas intermedias-pequeñas, 3.2 veces mayores. La variable principal de este método es la topografía de la cuenca, es por esto que conforme se presentan disminuciones en los desniveles en las cuencas de los embalses estudiados se obtienen tasas de aporte de sedimentos de menor valor.

El método de Owen y Branson proporcionó valores negativos para todas las cuencas analizadas excepto la de la presa Rodrigo Gómez (La Boca). Esta situación se debe a que la



variable principal que considera el método es el cociente que existe entre el desnivel máximo de cotas en la cuenca y la longitud total del cauce principal; la cuenca de este embalse cuenta con un desnivel considerable respecto a la longitud de su cauce principal, lo que propicia que el valor del cociente H/L sea mayor, convirtiendo la ecuación en positiva. Por lo tanto, se concluye que este método podrá ser utilizado solamente cuando los cocientes entre el desnivel máximo de cotas y la longitud del cauce principal sean iguales o mayores a 0.032, mismos que se obtendrán al tenerse pendientes accidentadas en tramos cortos de cauces.

Se observó que al aplicar la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos se obtienen valores un 50% por debajo de los obtenidos a partir de la información batimétrica para cuencas muy grandes, de manera contraria, para cuencas intermedias pequeñas, se estiman resultados un 69% más altos. Algunos autores han definido a la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos como el método más prometedor para la predicción de aporte de sedimentos (Gómez Hernández & Mújica García, 2009), sin embargo, los resultados obtenidos demuestran que éste método, al igual que los otros cuatro aplicados, no guarda relación con las tasas de aporte de sedimentos reales que se están presentando en la zona de estudio.

De manera general, se puede concluir que los embalses de la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos han perdido un porcentaje considerable de su capacidad útil y no existen acciones contundentes ni permanentes, que frenen esta pérdida que va en aumento conforme pasan los años. Al ser una zona árida y semi árida, la gestión de los escasos recursos hídricos que se encuentran almacenados en presas representa un reto que se afronta cada día, sin embargo, es de vital importancia que esta, a partir de un enfoque integrado, considere también la gestión de la acumulación de sedimentos a largo plazo, de manera que se pueda lograr un manejo sustentable de los embalses que no comprometa ni el derecho humano al agua de las poblaciones que se abastecen de estas presas, ni los otros usos, así como los compromisos internacionales existentes.



6.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda ampliamente la actualización de la información batimétrica de los embalses que se localizan en la zona de estudio, debido a que la información oficial con la que cuenta la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) tiene fecha del 2004 para seis de los embalses estudiados, exceptuando la presa Internacional La Amistad la cual cuenta con una batimetría del año 2005, la presa Marte R. Gómez (El Azúcar) con fecha del año 2007 y la presa Pico del Águila con fecha del año 2012. De igual forma, se sugiere que la batimetría realizada en 2004 para la presa Federalismo Mexicano (San Gabriel) sea revisada debido a las inconsistencias observadas en los resultados obtenidos a partir de sus datos.

Resulta esencial que el organismo competente de la operación de las presas se encargue del monitoreo del transporte de sedimentos para la generación de datos actualizados, debido a que la información existente en la materia que compete a esta investigación es mínima. Con esto, se busca el generar y aplicar estrategias para el manejo de sedimentos, lo que permitirá fomentar una perspectiva más amplia respecto a la gestión de los recursos hídricos almacenados, con el objetivo de darle un uso sustentable a estos embalses.

Hasta el momento, la política pública en materia de agua en México no considera específicamente la regulación de los sedimentos como un aspecto fundamental dentro de la gestión de los recursos hídricos, por lo que se recomienda la búsqueda de instrumentos institucionales que permitan la construcción de propuestas para que esta pueda ser llevada a cabo, considerando esta problemática como un factor que compromete la seguridad hídrica de toda la región.

Considerando la relación encontrada entre el aumento de las tasas de aporte de sedimentos con los cambios de uso de suelo y cobertura vegetal en la zona de estudio, se exhorta a la implementación de programas de manejo de cuencas para la disminución de la erosión, así como a un incremento de los recursos asignados para la conservación de éstas áreas, tomando como ejemplo que en el caso de la cuenca del río Conchos, se tiene una asignación considerablemente



mínima de 3 a 5 millones de pesos anuales (Montero Martínez & Ibáñez Hernández, 2017) que no permite la atención integral para la recuperación de la cobertura vegetal que ha sido perdida a causa de la deforestación, el sobrepastoreo y la apertura irrestricta de superficies agrícolas.

De igual manera, a partir del conocimiento de que en cuencas intermedias las tasas de aporte de sedimentos son mucho menores gracias a que las presas aguas arriba almacenan la mayoría de los sedimentos que transitan por los cauces, es importante que una alternativa para la disminución de la acumulación de sedimentos en los vasos de almacenamiento sea la construcción de estructuras de retención en las cabeceras de las cuencas, considerando las presas filtrantes de gaviones como una opción con un costo beneficio alto.

El que todos los actores involucrados se apropien de la problemática resulta altamente necesario, esto incluye a usuarios, instancias gubernamentales, organizaciones de la sociedad civil, así como la academia, con el propósito de llevar a cabo estrategias transversales con objetivos claros. Es importante mencionar que el sector agrícola es el principal usuario de los recursos hídricos embalsados en las presas de la zona de estudio, por lo que el lograr involucrarlos de manera activa en programas de conservación de agua y suelo, como lo es el programa de pago por servicios ambientales, resulta altamente recomendable y con beneficios importantes para dichos usuarios, para los habitantes de las cuencas altas y para el medio ambiente y los ecosistemas que en éste último se desarrollan.



Referencias

- Annandale, G. W., Morris, G. L., & Karki, P. (2016). Extending the Life of Reservoirs. In International Bank for Reconstruction and Development/World Bank Group (Ed.), *Sustainable sediment management for dams and run-of-river hydropower*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1596/978-1-4648-0838-8>
- Arreguín Cortéz, F., López Pérez, M., Rodríguez López, O., & Montero Martínez, M. J. (2015). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático* (Primera). IMTA.
- Auel, C., Kantoush, S. A., & Sumi, T. (2016). Positive effects of reservoir sedimentation management on reservoir life - examples from Japan. *International Symposium on "Appropriate Technology to Ensure Proper Development, Operation and Maintenance of Dams in Developing Countries."*
- Branson, F. A., & Owen, J. R. (1970). Plant cover, runoff, and sediment yield relationships on Mancos Shale in Western Colorado. *Water Resources Research*, 16(3), 783–790.
- Brune, G. M. (1953). *Trap Efficiency of Reservoirs*.
- Campos Aranda, D. F. (1992). *Procesos del Ciclo Hidrológico*.
- 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*, III, 163–173.
- Cervantes-Zamora, Y., Lucero, Márquez, R., Espinoza-Rodríguez, J. M., Miranda-Viquez, E., & Pineda-Velázquez, A. (1990). "Provincias Fisiográficas de México". *Extraído de Clasificación de Regiones Naturales de México II, IV.10.2. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México.*
- CICESE. (2020). *Base de datos climatológica nacional (Sistema CLICOM)*. <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- CILA. (1944). *Tratado entre el gobierno de los Estados Unidos Mexicanos y el gobierno de los Estados Unidos De America de la distribucion de las aguas internacionales de los rios Colorado, Tijuana y Bravo, desde Fort Quitman , Texas, hasta El Golfo de México* (p. 28).
- CILA Sección Mexicana. (2007). *Presa Internacional de la Amistad Tablas de Elevaciones-Áreas-Capacidades Levantamiento batimétrico de 2005*.
- Comisión Mundial De Represas. (2000). *Represas y Deasarrollo, un nuevo marco para la toma de decisiones*. <http://adivima.org.gt/archivos/Informe Comision Mundial de Represas 2000.pdf>
- Comission Internationale Des Grands Barrages. (1997). Sediment yield at Spanish reservoirs and its relationship with the drainage basin area. *Dix-Neuvieme Congrès Des Grands Barrages*, 863–874.
- CONABIO. (2001). *Subcuencas hidrológicas en Mapas de regiones hidrológicas. Escala 1:1000000. Secretaría de Recursos Hidráulicos, Jefatura de Irrigación y control de Ríos, Dirección de Hidrología*.
- CONAGUA. (2020a). *Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades original de la presa Chihuahua del año 1958*.
- CONAGUA. (2020b). *Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades original de la presa Francisco I. Madero del año 1948*.
- CONAGUA. (2020c). *Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades original de la presa Pico del Águila del año 1987*.
- CONAGUA. (2020d). *Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades por el método de curva-*



- intervalo de la presa Chihuahua del año 2004.*
- CONAGUA. (2020e). *Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades por el método de curva-intervalo de la presa Francisco I. Madero del año 2004.*
- CONAGUA. (2020f). *Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades por el método de curva-intervalo de la presa La Boquilla del año 1942.*
- CONAGUA. (2020g). *Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades por el método de curva-intervalo de la presa La Boquilla del año 2004.*
- CONAGUA. (2020h). *Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades por el método de curva-intervalo de la presa Luis L. León del año 2004.*
- CONAGUA. (2020i). *Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades por el método de curva-intervalo de la presa Pico del Águila del año 2012.*
- CONAGUA. (2020j). *Cálculo de elevaciones-áreas-capacidades por el método de curva-intervalo de la presa San Gabriel del año 2004.*
- CONAGUA. (2020k). *Levantamiento topobatimétrico 2004 Presa Rodrigo Gómez La Boca.*
- CONAGUA. (2020l). *Levantamiento topobatimétrico de la presa Marte R. Gómez del año 2007.*
- CONAGUA. (2020m). *Sistema Nacional de Seguridad de Presas.*
<https://presas.conagua.gob.mx/inventario/tgeneralidades.aspx?DSP,777>
- CONAGUA, & SEMARNAT. (2009). *Presas de México.*
- Cortés T., H. G. (1991). *Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados.* Colegio de Posgraduados, Montecillos, México.
- Estrada Gutiérrez, G. (2019). *Apuntes de clase, Hidrología de Cuencas. Maestría en Ingeniería en Hidrología-Universidad Autónoma de Chihuahua.*
- Estrada Gutiérrez, G., Silva Hidalgo, H., Villalba, M. D. L., Astorga Bustillos, F., & Franco Estrada, B. (2015). Tasa de acumulación de sedimentos en embalses del río Conchos, Chihuahua, México. *1er Congreso Iberoamericano Sobre Sedimentos y Ecología.*
- FAO. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos* (p. 86).
- García, E., & CONABIO. (2001). “*Climas*” (*clasificación de Köppen, modificado por García*). *Escala 1:1000000. México.*
- Gómez Hernández, A., & Mújica García, L. A. (2009). *Cálculo de las fuerzas actuantes en la cortina y obra de excedencias de la Presa Maximiliano R. López.* Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gottschalk, D. J. (1964). Reservoir sedimentation. In *Handbook of applied hydrology.* McGraw-Hill Book Co.
- Gracia Sánchez, J. (1997a). Pérdida de suelo en cuencas. In *Manual de Ingeniería de Ríos.* UNAM. http://eias.entalca.cl/isi/publicaciones/unam/perdida_de_suelo_en_cuencas.pdf
- Gracia Sánchez, J. (1997b). Sedimentación en embalses. In *Manual de Ingeniería de Ríos.* UNAM.
- Huerta-Olague, J. de J., Oropeza-Mota, J. L., Guevara-Gutiérrez, R. D., Ríos-Berber, J. D., Martínez-Menes, M. R., Barreto-García, O. A., Olguín-López, J. L., & Mancilla-Villa, O. R. (2018). Efecto de la cobertura vegetal de cuatro cultivos sobre la erosión del suelo. *Idesia (Arica)*, 36(2). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292018005000701>
- IMTA. (2019). *¿Qué es una cuenca?* <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-es-una-cuenca-211369?idiom=es>



- INEGI. (1997a). “Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie I (continuo nacional)”, digitalización 1968-1986.
http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250ks2gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- INEGI. (1997b). “Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie I (continuo nacional)”, digitalización 1968-1986.
- INEGI. (2000). *Perfil sociodemográfico del área metropolitana de Monterrey : XII Censo General de Población y Vivienda 2000.*
- INEGI. (2001a). “Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie II (continuo nacional).”
http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250ks2gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- INEGI. (2001b). “Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie II (continuo nacional).”
- INEGI. (2005a). “Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie III (continuo nacional)”, escala: 1:250000. Dirección General de Geografía. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250ks3gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- INEGI. (2005b). “Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie III (continuo nacional)”, escala: 1:250000. Dirección General de Geografía. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2009a). “Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie IV (continuo nacional)”, escala: 1:250000. Dirección General de Geografía. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250ks4gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- INEGI. (2009b). “Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie IV (continuo nacional)”, escala: 1:250000. Dirección General de Geografía. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2010). *Guía para la interpretación de cartografía edafología. C.*
- INEGI. (2013a). “Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación escala 1:250 000, serie V (capa unión)”, escala: 1:250000. edición: 2a. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250s5ugw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- INEGI. (2013b). “Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación escala 1:250 000, serie V (capa unión)”, escala: 1:250000. edición: 2a. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2013c). *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM).*
<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI. (2013d). *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM).*
- INEGI. (2016). “Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Unión)”, escala: 1:250 000. edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2017a). *Guía para la interpretación de cartografía uso de suelo y vegetación. Scale 1:250,000: Series VI., 204.*



- INEGI. (2017b, December). INEGI Presenta Carta del Uso de Suelo y Vegetación Serie VI. *Comunicado de Prensa Núm: 535/17*.
- INEGI. (2017c, December 5). INEGI Presenta Carta del Uso de Suelo y Vegetación Serie VI. *Comunicado de Prensa Núm: 535/17*. <http://www.inegi.org.mx>
- INEGI. (2019). “*División política estatal 1:250000. 2019*”, *escala: 1:250000. edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía*.
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463674658>
- INIFAP, & CONABIO. (2001). “*Edafología*”. *Escalas 1:250000 y 1:1000000. México*.
- INIFAP, & CONAFOR. (2007). *Riesgo a la erosión hídrica y proyección de acciones de manejo y conservación del suelo en 32 microcuencas de San Luis Potosí* (Issue Libro Técnico No. 3).
- Jiménez, O., Farias, H. D., & Rodríguez, C. (2015). Procesos de sedimentación en embalses en ambientes tropicales. Estudios de casos en Costa Rica y República Dominicana. *Ingeniería Del Agua, 12*(3). <https://doi.org/10.4995/ia.2005.2561>
- López Bermúdez, F., & Romero Díaz, A. (1998). Erosión y desertificación: implicaciones ambientales y estrategias de investigación. *Papeles de Geografía, 28*, 77–89.
<file:///C:/Users/ASUS/Downloads/Dialnet-ErosionYDesertificacion-105585.pdf>
<http://revistas.um.es/geografia/article/view/45421/43461>
- Maderey-R, L. E., & Torres-Ruata, C. (1990). “*Hidrografía*”. *Extraído de Hidrografía e hidrometría, IV.6.1 (A). Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1: 4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México*.
- Martínez-Austria, P. F. (2018). *Visión general de la cuenca del río Bravo. June*.
- Martínez Salvador, A., Conesa García, C., García Lorenzo, R., & Pérez Cutillas, P. (2015). Estimación de aportes sedimentarios a embalses de pequeñas cuencas mediterráneas mediante GeoWEPP. Ensayo en la cuenca vertiente del río Mula al embalse de la Cierva (cuenca del río Segura). *Limnetica, 34*(1), 41–56.
- Meléndez de la Cruz, J. F. (2019). La identificación de las cabeceras de cuencas hidrográficas: métodos y aplicaciones. *Investigaciones Sociales, 22*(40), 111–120.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15381/is.v22i40>
- Mendoza, I. C. (2013). Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental, XXXIV*(2), 3–16.
- Miranda, F., & Hernández X, E. (1963). *Los tipos de vegetación de México y su clasificación*. <https://es.scribd.com/doc/208224437/Miranda-y-Hernandez-X-1963-BSBM28-29-176-Sobretiro-e>
- Montero Martínez, M. J., & Ibáñez Hernández, Ó. F. (2017). *La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático* (Primera). IMTA.
- Moriasi, D. N., Steiner, J. L., Duke, S. E., Starks, P. J., & Verser, A. J. (2018). Reservoir Sedimentation Rates in the Little Washita River Experimental Watershed, Oklahoma: Measurement and Controlling Factors. *Journal of the American Water Resources Association, 54*(5), 1011–1023.
- Morris, G. L., & Fan, J. (1998). *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and management of dams, reservoirs and watersheds for sustainable use*. McGraw-Hill Book Co.
- Ordóñez, J. (2011). *¿Qué es cuenca hidrológica?* Sociedad Geográfica de Lima.
http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca_hidrologica.pdf



- Palau Ybars, A. (2004). La sedimentación en embalses. *Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*.
- PAOT. (1996). *Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente*. <http://www.paot.org.mx/centro/inegi/amb1997/>
- Ramírez León, J. M., & Aparicio, J. (2008). Estimación de la Producción de Sedimentos en Cuencas : Aplicación a una Cuenca en México. *XX Congreso Nacional de Hidráulica*.
- Reyna, S., Reyna, T., Lábaque, M., Riha, C., & Rafaelli, S. (2011, November). Sedimentos en embalses- Aplicación de modelos. *Memorias Del Quinto Simposio Regional Sobre HIDRÁULICA DE RÍOS*.
- Rocha Felices, A. (2004). Aspectos sedimentológicos del Manejo de Cuencas en zonas áridas sujetas al Fenómeno de El Niño. *II Simposio Latinoamericano de Control de La Erosión*. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Aspectos+sedimentol?gicos+del+manejo+de+cuencas+en+zonas+?ridas+sujetas+al+fen?meno+de+el+ni?o#0>
- Rocha Felices, A. (2006). La problemática de la sedimentación de embalses en el aprovechamiento de los ríos peruanos, aplicada al embalse de Poechos. *Primer Congreso Internacional de Hidráulica, Hidrología, Seaniemiento y Medio Ambiente*.
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. LIMUSA.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (1976). *Boletín Hidrológico No. 29 Región Hidrológica Num. 24 (Cuenca del Bajo río Bravo y Conchos)*.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos. (1969). *Boletín Hidrológico Num. 34 Región Hidrológica Num. 24 Oriente (Región del medio Bravo y río Salado)*.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos. (1974). *Boletín hidrológico Num. 53 Región Hidrológica Num. 24 Oriente Bajo Río Bravo. In Tomo II*.
- SEMARNAT. (2011). *ACUERDO por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de la Región Hidrológica número 24 Bravo-Conchos*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5192916&fecha=02/06/2011
- SEMARNAT, & CONAGUA. (2016). *ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 regiones hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5443858&fecha=07/07/2016
- Shrestha, B., Babel, M. S., Maskey, S., Van Griensven, A., Uhlenbrook, S., Green, A., & Akkharath, I. (2013). Impact of climate change on sediment yield in the Mekong River basin: A case study of the Nam Ou basin, Lao PDR. *Hydrology and Earth System Sciences, 17*(1), 1–20. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1-2013>
- Tadesse, A., & Dai, W. (2019). Prediction of sedimentation in reservoirs by combining catchment based model and stream based model with limited data. *International Journal of Sediment Research, 34*(1), 27–37. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.08.001>
- U.S. Bureau of Reclamation. (1987). *Design of Small Dams* (3rd ed.).
- U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (1982). *Reservoir sedimentation technical guidelines for Bureau of Reclamation* (R. I. Strand & E. L. Pemberton (eds.)).
- United States Department of Agriculture, & National Resources Conservation Service. (1983). Chapter 6. Sediment sources, yields and delivery ratios. In *National Engineering Handbook*.



- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1965). *Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains*.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*.
- Zambrano Nájera, J. (2015). *Estimación de la producción y transporte de sedimentos en cuencas urbanas pequeñas a escala de evento mediante un modelo de base física basado en SIG* [Universitat Politècnica de Catalunya].
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/95706?show=full>



Anexo Electrónico

- Comparación de curvas área elevación volumen
- Fórmula Universal de Pérdida de Suelos



Curriculum Vitae

Maestra en Ingeniería en Hidrología (2019-2020) e Ingeniera civil (2013-2017) por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua.

Ha sido coordinadora de componentes del Gobierno Federal ejecutados a través de la Secretaría de Desarrollo Rural de Gobierno del Estado de Chihuahua para el aprovechamiento sustentable de suelo y agua del año 2018 al 2019.

Actualmente se encuentra realizando actividades de coordinación y ejecución de proyectos de recarga artificial de acuíferos, pago por servicios ambientales y conservación y restauración de cuencas hidrográficas. De igual forma, se encarga de la gestión y vinculación interinstitucional en materia de manejo de recursos hídricos dentro de la Dirección de Desarrollo Rural del Gobierno Municipal de Chihuahua.

Se encuentra cursando la Maestría en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, con fecha de conclusión en septiembre 2022.

Domicilio Permanente: Av. Fedor Dostoyevski 3301 Col. José María Ponce de León
Chihuahua, Chihuahua, C.P. 31136

Esta tesis/disertación fue mecanografiada por Ing. Yazmin Azalea Acosta Rodríguez.