



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Simulación numérica de la erosión
de una subcuenca del Río Yaqui para
escenarios de degradación del suelo
para los años 2000 y 2020**

TESINA

Que para obtener el título de
Especialista en hidráulica

P R E S E N T A

Ing. Miguel Ángel Hernández Hernández

DIRECTOR DE TESINA

Dr. Omar Salvador Areu Rangel



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme una educación de calidad desde mis estudios de bachillerato, por darme la mejor formación profesional y por permitirme conocer a personas muy valiosas en este trayecto. A la facultad de Ingeniería y a sus profesores que me orientaron en cada semestre cursado no solo en el ámbito académico sino también en el personal.

A mi asesor el Dr. Omar Salvador por la oportunidad y la confianza de permitirme trabajar con él, así como por la paciencia y la orientación dada para la realización de este trabajo. A mi tutor el Mtro. Gerardo Ruíz Solorio por sus consejos y el apoyo brindado.

A mis sinodales por el tiempo brindado en la revisión de este trabajo.

Al programa Único de Especializaciones de la Facultad de Ingeniería por permitirme cursar un posgrado de calidad con los mejores profesores del área.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por el apoyo económico brindado durante mi tiempo en el posgrado

A mis amigos que hice en mi tiempo de CCH y licenciatura por el apoyo brindado en todo momento, por permitirme que mi estancia en la facultad y el posgrado fuera más amena y por motivarme a seguir creciendo.

Pero sobre todo agradezco a mi familia, a mi madre y mis hermanos por todo el apoyo brindado desde que nací, por los sacrificios hechos para que yo lograra llegar a esta etapa de mi vida, por siempre apoyarme incondicionalmente y no permitir que me sintiera solo en ningún momento. A mi hermana y mi abuelita que hasta el último momento me mostraron su cariño y apoyo. Gracias infinitas.

Índice

I.	Objetivo.....	6
II.	Problemática.....	6
III.	Introducción	7
IV.	Erosión y degradación de suelo en cuencas.....	10
IV.I.	Factores que influyen en la degradación de suelo.....	10
IV.II.	Erosión hídrica	11
IV.II.a.	Remoción de las partículas de suelo	11
IV.II.b.	Transporte de material sólido	12
IV.II.c.	Depósito de material sólido.....	12
IV.III.	Erosión eólica.....	13
IV.IV.	Degradación química.....	13
V.	Zona de estudio	14
V.I.	Cuenca del Río Yaqui	14
V.II.	Subcuenca de estudio.....	16
V.II.a.	Características fisiográficas	20
VI.	Escenarios de uso de suelo para los años 2000 y 2020.....	22
VI.	Modelo numérico de IBER	26
VII.I.	Condiciones de contorno.....	28
VII.II.	Condiciones internas	29
VII.III.	Esquemas numéricos	30
VII.IV.	Proceso y postproceso	30
VII.V.	Transporte de sedimentos	31
VII.	Metodología	32
VIII.I.	Metodología ISO Cluster Unsupervised Classification	32
VIII.II.	Simulación de escenarios para tipo de suelo de los años 2000 y 2020	36
VIII.	Resultados	42
IX.	Conclusiones y discusión	49
X.	Bibliografía	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cuenca del río yaqui y principales presas. Elaboración propia con datos de INEGI (2014).	15
Figura 2. Climatología en la cuenca de río yaqui. Elaboración propia con datos de INEGI (2008). 16	16
Figura 3. Localización de la subcuenca de estudio. Elaboración propia.	17
Figura 4. Uso de suelo en la subcuenca de estudio. Elaboración propia con datos de INEGI (2018).	19
Figura 5. Litología de la subcuenca. Elaboración propia con datos de Servicio Geológico Mexicano (2015).	19
Figura 6. Perfil de elevaciones del cauce principal.	21
Figura 7. Portal de la aplicación de Google Earth.....	23
Figura 8. Herramienta de descarga de imágenes.	24
Figura 9. Imagen satelital tomada del 30 de diciembre del 2000. Elaboración propia a partir de datos del portal Earth Explorer.....	25
Figura 10. Imagen obtenida del 30 de enero de 2020. Elaboración propia a partir de datos del portal Earth Explorer.....	25
Figura 11. Esquema de las variables utilizadas en la definición de condiciones internas (E. Bladé 2014).	30
Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.	32
Figura 13. Reclasificación mediante "ISO Cluster Unsupervised Classification" para el año 2000. 33	33
Figura 14. Clasificación de uso de suelo año 2000. Elaboración propia.	34
Figura 15. Clasificación de uso de suelo año 2020. Elaboración propia.	35
Figura 16. Cambio de uso de suelo de vegetación a pastizal (2000-2020). Elaboración propia.	36
Figura 17. Mallado del Modelo digital de Elevaciones.	37
Figura 18. Modelación del Modelo digital de elevaciones en Iber.	38
Figura 19. Asignación de usos de suelo año 2000.	39
Figura 20. Asignación de usos de suelo 2020.	39
Figura 21. Hietograma propuesto.....	40
Figura 22. Parámetros para el cálculo de transporte de fondo.	41
Figura 23. Velocidad del flujo para la simulación del año 2000. Elaboración propia.....	43
Figura 24. Velocidad de flujo para la simulación del año 2020. Elaboración propia.	43
Figura 25. Profundidad de calado para la simulación del año 2000. Elaboración propia.	45
Figura 26. Profundidad de calado para la simulación del año 2020. Elaboración propia.	45
Figura 27. Erosión del suelo para la simulación del año 2000. Elaboración propia.	46
Figura 28. Erosión de suelo para la simulación del año 2020. Elaboración propia.	47
Figura 29. Erosión y cambio del uso de suelo para el periodo de 2000 a 2020. Elaboración propia.	48
Figura 30. Zonas potenciales de erosión. Elaboración propia.	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porcentaje de uso de suelo en la cuenca.	17
Tabla 2. Porcentaje de estructuras litológicas en la cuenca.	18
Tabla 3. Segmento del seccionamiento para el método de Taylor-Schwarz.	21
Tabla 4. Principales características fisiográficas.	22
Tabla 5. Ecuaciones usadas para condiciones internas.	30
Tabla 6. Área de uso de suelo para los escenarios del año 2000 y 2020.	34
Tabla 7. Parámetros utilizados para la simulación.	42

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.	9
Ecuación 2. Ecuación de Taylor Schwarz para pendiente media.	20
Ecuación 3. Ecuación de Kirpich para tiempo de concentración.	21
Ecuación 4. Ecuaciones de Saint Venant.	26
Ecuación 5. Ecuaciones de Manning.	26
Ecuación 6. Ecuación de Van Dorn para la fuerza de rozamiento.	27
Ecuación 7. Ecuación del coeficiente de arrastre superficial.	27
Ecuación 8. Ecuación de Viscosidad turbulenta.	27
Ecuación 9. Ecuación de transporte para la energía cinética.	28
Ecuación 10. Ecuación de la velocidad tangencial.	28
Ecuación 11. Ecuación de gasto unitario.	29
Ecuación 12. Ecuación de Meyer-Peter y Müller para el transporte de sedimentos.	32

I. Objetivo

Evaluar la erosión hídrica de una subcuenca del Río Yaqui mediante la identificación del uso de suelo a partir del análisis de imágenes satelitales para simular numéricamente los escenarios de los años 2000 y 2020.

II. Problemática

La erosión y la degradación del suelo son ocasionadas por un conjunto de procesos dinámicos que pueden ser de tipo físicos, químicos y biológicos. Estos procesos afectan la productividad de ecosistemas resultando irreversibles en algunos casos y generando también consecuencias indirectas, tales como: sociales, económicas y políticas. Las afectaciones directas de la erosión y degradación del suelo se relacionan con el medio ambiente de la región, como lo es la pérdida de ecosistemas y equilibrio ecológico, acumulación y arrastre de sedimentos que son transportados y llegan a azolvar cuerpos de agua (reduciendo la vida útil de obras civiles como presas, bordos, canales, etc.), así como alteraciones en el clima debido a la pérdida de vegetación que funciona como regulador natural de temperatura.

La erosión puede darse en cualquier sitio, sin embargo, es en las zonas áridas donde este problema tiende a acrecentarse debido principalmente, a la pérdida de la cubierta vegetal lo cual deja expuesta la superficie terrestre y se incrementan los procesos que ocasionan la desertificación y la degradación de los suelos. En México, estos problemas no son ajenos, ya que se estima que el 26% de territorio nacional se encuentra en proceso de desertificación, mientras que aproximadamente el 58% de la población se encuentra viviendo en zonas áridas (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2022).

Aunque en general la sequía puede presentarse en cualquier lugar de la Tierra y en cualquier tiempo, para el caso de México, las regiones arriba del paralelo 20°N, caracterizadas por su semi aridez o aridez, son las más vulnerables y expuestas al fenómeno. En los últimos años, la cuenca del Río Yaqui que abarca parte de los estados de Chihuahua, Sinaloa y Sonora ha enfrentado diferentes condiciones de sequía que han impactado adversamente a la población y principales actividades económicas de la zona (PRONACOSE, 2013). La erosión es un problema presente

en los suelos de México, siendo para estados como el de Sonora un riesgo para la producción futura de las actividades agrícolas, ganaderas y forestales del estado (Reyes, 2001).

El tener el conocimiento de las tasas de degradación considerando perspectivas de estimaciones a futuro permite proponer medidas de control de la erosión y recuperación de suelos degradados y mitigar efectos negativos en degradación de cuencas hídricas de las zonas implicadas.

III. Introducción

La erosión y degradación del suelo han resultado un problema muy estudiado debido a sus significativos impactos ambientales y en las consecuencias directas e indirectas de factores sociales y económicos (Issaka and Ashraf, 2017; Steinhoff-Knopp et al., 2021; Hermassi et al., 2023). Algunas investigaciones se han enfocado en los aspectos mecánicos de la erosión, como el impacto de las precipitaciones y la escorrentía superficial, los cuales demuestran ser en mayor medida, los factores dominantes en este fenómeno (Chen et al., 2018, Fang et al., 2017; Sun et al., 2021). Otras investigaciones han estudiado cómo la química del suelo, cobertura vegetal, cambios de uso de suelo y actividades humanas, intervienen en aspectos de erosión (Smith et al., 2015; Almohamad et al., 2020; Roxo et al., 2023).

Los riesgos potenciales derivados de la erosión del suelo han llevado a que las investigaciones se orienten a desarrollar nuevas metodologías cada vez óptimas y con el apoyo de nuevas tecnologías para identificar y cuantificar la degradación del suelo. Algunas de estas investigaciones han mostrado que la erosión del suelo no solo afecta la producción agrícola sino que también contribuye a la sedimentación en cuerpos de agua, pérdida de fertilidad y la disrupción de los hábitats naturales, implicando afectaciones en actividades económicas regionales (Pimentel, 2001; Wirtz et al., 2012; Mitsova et al., 2021; Novara et al., 2018; Xu et al., 2019).

Los factores físicos, como principales parámetros de la erosión de suelo incluyen la intensidad de la lluvia, velocidad del viento y topografía (Guerra et al., 2020; Wang et al., 2021; Wen et al., 2023), dado que fuertes lluvias pueden causar escorrentía superficial, separación y transporte de partículas de suelo, mientras que la erosión

por viento prevalece en zonas áridas y semi-áridas. Las pendientes del terreno también son un factor que influye en el rango de erosión, dado que con pendientes más pronunciadas generalmente se experimenta una mayor erosión. Dentro de los factores químicos que intervienen a la estructura del suelo volviéndolo susceptible a la erosión se tiene el pH del suelo, salinidad, y la presencia de materia orgánica que afecta la cohesión y estabilidad del suelo (Misra and Texeira, 2001; Nunes et al., 2017). La materia orgánica puede mejorar la estructura del suelo, la retención del agua y reducir riesgos de erosión. Algunos biólogos indican que la cobertura vegetal juega un rol crucial en la prevención de la erosión de suelo (Mahmouhdzadeh et al., 2007; Xiong et al., 2023). Entre los daños que la erosión puede producir son la reducción de la productividad de las zonas de cultivo y pérdida de suelo, el cual se puede considerar como un recurso no renovable. Otra afectación es el sedimento producido que degrada la calidad del agua y es un buen medio de transporte para agentes químicos contaminantes (Gracia y Maza, 1996).

La erosión del suelo tiene consecuencias tanto directas como indirectas que impactan significativamente en los ecosistemas y en las actividades humanas (Panangos et al., 2024). Directamente afecta en la pérdida de nutrientes de la cubierta del suelo, reduciendo la productividad agrícola y el rendimiento en los cultivos. Indirectamente, la erosión del suelo genera costos económicos derivados de la reducción de la agricultura, la producción ganadera e incrementa gastos en la reparación de infraestructura.

El transporte de sedimentos y la erosión en cuencas es un fenómeno que debe ser estudiado, especialmente en zonas donde las actividades económicas dependen de la agricultura y ganadería, o cuando se encuentran obras de almacenamiento que sean importantes para el desarrollo de las actividades económicas de la zona ya que pueden presentar problemas de azolve y por ende reducir la capacidad y vida útil de éstas.

El conocimiento de la naturaleza y la cantidad de sedimentos acumulados que potencialmente pueden generarse en una cuenca y son arrastrados por algún cauce son datos importantes que ayudan en el diseño de obras hidráulicas para poder

estimar parámetros como los niveles de azolve que se pueden generar, así como como los riesgos que ocasionarían a la infraestructura o reducción del tiempo de vida útil de estas mismas.

Existen actualmente diversas metodologías para el cálculo de la erosión de suelo y el transporte de sedimentos, existiendo tanto métodos empíricos como métodos cuantitativos en campo. Las mediciones en campo incluyen técnicas como marcadores de erosión, trampas de sedimentos o incluso el uso de isótopos radioactivos en el suelo (Boix -ayos et al., 2006; Hsieh et al., 2009). Estos métodos recopilan información directa de la pérdida de suelo y deposición de sedimentos, sin embargo, la desventaja de estos métodos es que requieren forzosamente del trabajo en campo del personal en el sitio de estudio, además de necesitar una labor intensiva por parte del equipo de trabajo. Los modelos empíricos como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) (Wischmeier y Smith, 1978) (Ecuación 1) estiman la degradación de suelo con base a parámetros como la precipitación, el tipo de suelo, la topografía y prácticas de conservación (Renard et al., 1997).

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Ecuación 1. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

donde:

A es la pérdida de suelo en ton/ha*año.

R es el factor de erosividad de la lluvia en Mj*mm/ha*año.

K es el factor de erosionabilidad del suelo en (t/ha)/(Mj.mm/ha).

L es el factor de longitud del terreno.

S es el factor de pendiente del terreno.

C es el factor de cobertura y manejo de la vegetación.

P es el factor de prácticas de conservación.

Este método si bien es sumamente usado debido a la facilidad de obtener actualmente los parámetros de cálculo y la simplicidad de este, no generan resultados igual de precisos que los métodos cuantitativos de campo, además de existir una gran diversidad de tipos de terreno que pueden afectar al entendimiento y procesamiento de los resultados.

Actualmente, en la rama de la ingeniería se ha hecho uso de diversas herramientas basadas en información satelital que en conjunto con software de procesamiento de datos proveen de resultados de calidad, siendo muy aplicables en el estudio de suelos e hidrología. El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), para el procesamiento de una base de datos de existentes, se ha convertido en una herramienta útil y práctica para el desarrollo de investigaciones con resultados de mucha calidad.

En el presente trabajo se plantea analizar información de una subcuenca ubicada sobre la cuenca del Río Yaqui para un periodo de 20 años (2000-2020) mediante la combinación de imágenes satelitales y el procesamiento de información con un Sistema de información Geográfica (SIG) para obtener una base de datos de uso de suelo que en conjunto con información del relieve de la subcuenca de estudio y datos hidrológicos pueda ser procesada mediante software de modelación numérica (IBER) para obtener resultados de erosión y pérdida de vegetación en el periodo de estudio, así como establecer zonas de potencial riesgo.

IV. Erosión y degradación de suelo en cuencas

IV.I. Factores que influyen en la degradación de suelo

El agua y el viento son los principales agentes que contribuyen a la erosión del suelo, sin embargo, la degradación del suelo es una mezcla de distintos factores que en conjunto potencializan y caracterizan este fenómeno.

Los principales factores que influyen en la pérdida de suelo son:

- Hidrología: La lluvia rompe la estructura del suelo, y el escurrimiento acarrea el material sólido.
- Topografía: La erosión está relacionada a las pendientes y distancias recorridas por el escurrimiento superficial. A mayores pendientes y longitudes recorridas mayor erosión.
- Erosionabilidad del suelo: La granulometría y la presencia de materia orgánica influyen en la resistencia a la disgregación y en el transporte. Las primeras partículas en ser transportadas son las más finas.

- Cobertura vegetal: Este determina el aporte del sedimento. Un ecosistema bien cubierto de vegetación mantiene el suelo en su sitio e incrementa la infiltración.
- Prácticas de cultivos y conservación de suelos: Cuando se cambia la vegetación natural del suelo, y este se usa para labores agrícolas, la erosión del suelo se acelera (Gracia y Maza, 1996).

IV.II. Erosión hídrica

La erosión en cuencas es causada principalmente por las lluvias y los escurrimientos. Dicha erosión reduce la productividad de las zonas de cultivo y produce pérdida de suelo, el cual es para fines prácticos, un recurso no renovable. Por otro lado, el sedimento producido degrada la calidad del agua y es un buen medio de transporte de contaminantes químicos.

El proceso de transporte de sedimentos empieza cuando este viaja desde las partes más altas de una cuenca hasta encontrar una salida, ya sea en los océanos, o por otra parte pueden depositarse en zonas interiores de las cuencas, como podrían ser los embalses de presas o en lagunas.

La pérdida de suelo en cuencas ocurre principalmente en tres fases:

- Remoción de las partículas de suelo
- Transporte
- Depósito de material sólido

IV.II.a. Remoción de las partículas de suelo

La remoción de las partículas del suelo se puede dar de dos formas:

- Erosión laminar: Es la remoción de una capa de suelo delgada y relativamente uniforme. Se produce cuando el impacto de las gotas de lluvias contra el terreno produce un desprendimiento de partículas de suelo, dichas partículas aún después de depositadas quedan en estado suelto.
- Erosión de canalillos: Una vez que se inicia el flujo superficial, el escurrimiento puede producir pequeños canalillos de varios milímetros de ancho y profundidad, estos aportan grandes cantidades de sedimento.

- Erosión de cárcavas: Cuando los canalillos son de tales dimensiones que no desaparecen por el comportamiento normal del suelo, se denominan cárcavas, que van desde pequeños agrietamientos de unos cuantos centímetros hasta las grandes barrancas que en su salida pueden alcanzar varios metros de ancho y profundidad.
- Erosión de canales: Una vez que el flujo se ha concentrado, y escurre en cauces o canales bien definidos, los esfuerzos cortantes ejercidos por el agua contra el fondo y las paredes de dichos canales producen erosión.
- Erosión eólica: La erosión por viento es un factor importante a tener en cuenta en la pérdida de suelo, sobre todo en zonas semidesérticas, áreas de dunas costeras, regiones montañosas expuestas, zonas semiáridas, y regiones húmedas con sequías periódicas.

IV.II.b. Transporte de material sólido

El transporte de sedimentos se puede dar de dos formas:

- Transporte de fondo: Se transportan principalmente las partículas gruesas que provienen de la erosión de canales.
- Transporte en suspensión: Se transporta el material fino proveniente de la erosión laminar.

El material en suspensión usualmente puede salir de la cuenca en cada avenida, mientras que el transporte de fondo solo recorre pequeñas distancias en cada tormenta.

El material de suspensión es usualmente, por magnitud, el principal aporte de sedimentos en una corriente, esto depende de características de la cuenca como topografía, suelo, vegetación, etc. (Gracia y Maza, 1996).

IV.II.c. Depósito de material sólido

Es la decantación y almacenamiento de aquellas partículas de sedimentos atraídas ya sea por el transporte de fondo o el transporte de suspensión. Este material se encuentra en los lechos del río o almacenado como azolve en embalses naturales como lagos y lagunas o en embalses artificiales como los vasos de las presas.

IV.III. Erosión eólica

El agente causal de este tipo de erosión es el viento que, en sus formas más extremas, como tolvaneras, remolinos y tornados puede contribuir enormemente a la pérdida de la capa fértil del suelo. Al igual que en el caso de la erosión hídrica, la presencia de vegetación ayuda a proteger el suelo de este tipo de erosión (Ortiz-Solorio y Estrada, 1993)

La erosión eólica afecta principalmente a las regiones áridas, semiáridas, subhúmedas y secas del país, aunque no es exclusiva de ellas. Las causas de la erosión eólica también se atribuyen a una insuficiente protección del suelo por la cubierta vegetal, a niveles bajos de humedad y a la destrucción de la estructura del suelo.

En escala nacional, 9.5% del territorio muestra evidencias de erosión eólica. Las entidades más afectadas son Chihuahua (28.5%), Tlaxcala (26%), Nuevo León (18.9%) y Durango (17.9%). En Campeche, Chiapas, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán no se encontró evidencia de este tipo de erosión (SEMARNAT, 2008).

IV.IV. Degradación química

Las causas de la degradación química del suelo involucran una amplia gama de actividades industriales y agrícolas, entre las que se encuentran los derrames de hidrocarburos, la aplicación excesiva de fertilizantes y pesticidas, el mal manejo de residuos peligrosos y residuos sólidos urbanos. En el caso de la disminución de la fertilidad, ésta se produce cuando la entrada de nutrimentos ya sea por fertilización química, biológica o por la conservación de residuos de la cosecha, es menor a su salida en forma de los productos de las cosechas, por las quemas y las lixiviaciones.

La degradación química es el proceso de degradación del suelo más extendido en el país (17.8% del territorio). Está presente en todas las entidades; pero la más afectada es Yucatán (55.1%), y las menos afectadas son Baja California Sur, Coahuila, Baja California y Sonora, donde la superficie con degradación química no excede 5.5% de su territorio.

La degradación química en el nivel ligero representa 55% de la superficie nacional con degradación química; la moderada, 43.2% y la fuerte y extrema en conjunto, 1.8% (SEMARNAT, 2008).

V. Zona de estudio

V.I. Cuenca del Río Yaqui

La Cuenca del Río Yaqui es una cuenca exorreica que abarca un área de aproximadamente 69,590 km² hasta la presa Álvaro Obregón y 71,452 km² hasta su desembocadura en el Golfo de California (Medina, 2008). La cuenca se caracteriza principalmente por un clima semi árido. Se presentan principalmente altas temperaturas en el verano y una baja precipitación la mayor parte del año. El Río Yaqui fluye a través de diversas elevaciones, con precipitaciones que varían siendo en las zonas montañosas de la cuenca donde se percibe una mayor precipitación, siendo esta de 580 mm anuales, en comparación con las zonas de llanuras y regiones cercanas a la costa con una precipitación media de 300 mm anuales (CONAGUA, 2024).

En general, el sistema hidrográfico y de presas en la cuenca del río yaqui con una extensión aproximada de 410 [km] desempeña un papel crucial en el suministro de agua, la gestión de inundaciones y la generación de energía en la región. Las presas y ríos tributarios contribuyen significativamente al almacenamiento y regulación del flujo de agua en la cuenca. Las principales presas sobre la cuenca son (figura 1):

- La presa Lázaro Cárdenas ubicada en el municipio de Nacozari de García a 805.96 msnm cuenta con un vertedor de tipo libre con una elevación del Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) a 830.7 msnm lo que permite un almacenamiento de hasta 703.380 hm³. El propósito de la obra es para riego.
- La presa Plutarco Elías Calles ubicada en el municipio de Soyopa a 253.8 [msnm] cuenta con un vertedor controlado con una elevación del Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) a 290.5 msnm lo que permite un almacenamiento de hasta 2833.07 hm³. El propósito de la obra es para riego y generación de electricidad con una potencia instalada de 135 MW.

- La presa Álvaro Obregón ubicada en el municipio de Cajeme a 87.17 msnm cuenta con un vertedor de tipo libre con una elevación del Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) a 105.5 msnm lo que permite un almacenamiento de hasta 3023.14 hm³. El propósito de la obra es para riego, abastecimiento de agua potable y generación de electricidad con una potencia instalada de 19.2 MW (Sistema de seguridad de presas; monitoreo de Presas, 2024).

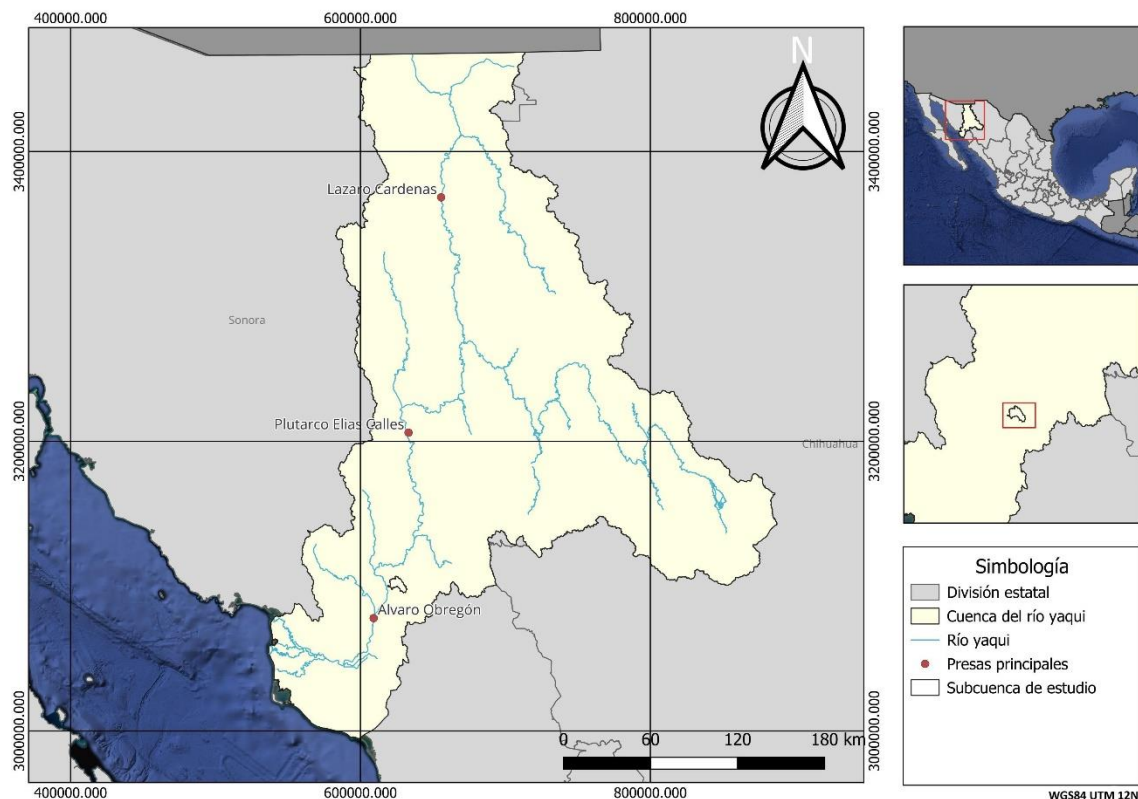


Figura 1. Cuenca del río yaqui y principales presas. Elaboración propia con datos de INEGI (2014).

El clima de la región (figura 2) destaca principalmente por sus zonas áridas, la mayor parte de la extensión de la cuenca cuenta con climas que van desde muy secos en la zona costera hasta climas templados y subhúmedos en la región oeste, con un énfasis principal a climas más fríos en el estado de Chihuahua.

Temperaturas más altas y condiciones extremas tienden a favorecer los periodos de sequía en la zona, siendo en la región este de la cuenca donde se han tenido mayores problemas de desertificación que propician los procesos erosivos en la

zona y por consiguiente un impacto en las actividades económicas del estado, siendo la agricultura y la ganadería las más afectadas (PRONACOSE, 2013).

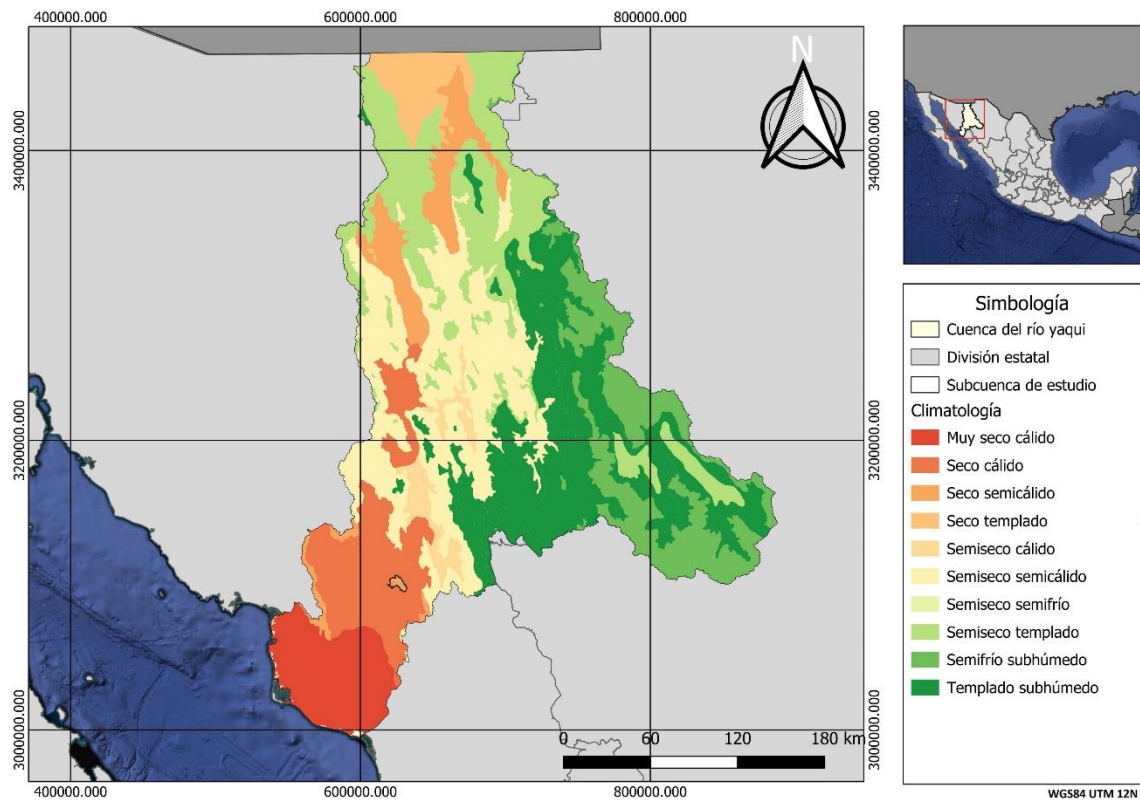


Figura 2. Climatología en la cuenca de río yaqui. Elaboración propia con datos de INEGI (2008).

V.II. Subcuenca de estudio

La región sobre la cuál será aplicada esta metodología propuesta, es una subcuenca de la Cuenca Yaqui que forma parte de la región hidrológica 9 “Sonora sur” (figura 3). La zona de estudio fue delimitada con el software QGIS, el cual permite generar una subcuenca a partir de las direcciones de flujo tomando como base un modelo digital de elevaciones, dicho modelo fue obtenido desde el portal de INEGI y se descargó el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) para el estado de sonora con la resolución de 15 [m].

La subcuenca consta de un área de 71 km², con elevaciones que van desde los 564 msnm en la zona más alta hasta 64 msnm en su zona de valles.

En cuanto a la hidrografía, las corrientes que se encuentran dentro de la cuenca son de carácter intermitente, es decir, estas dependen principalmente de los escurrimientos de las zonas más altas ocasionados por la precipitación en la zona.

El agua que escurre de esta subcuenca es un afluente hacia la presa Álvaro Obregón ubicada en la desembocadura de la región de estudio.

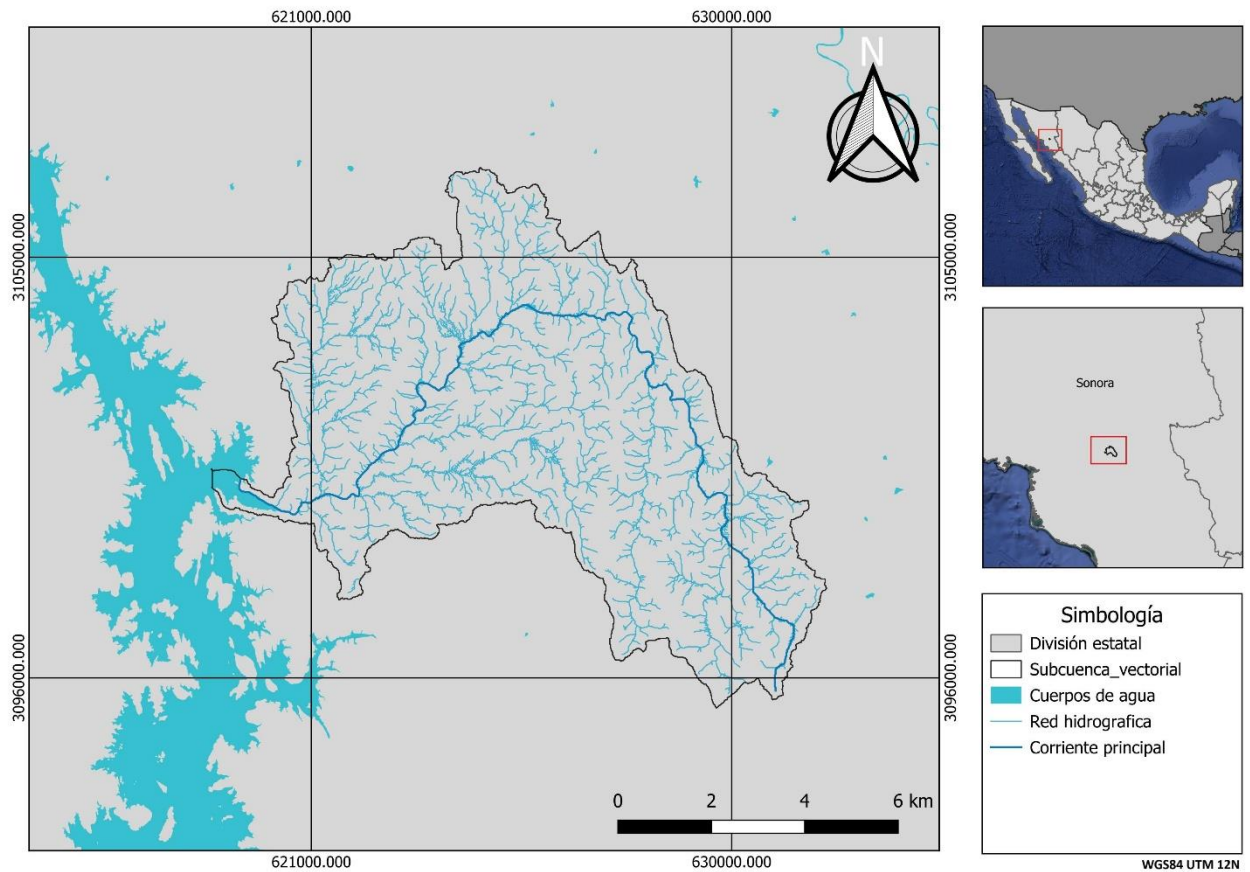


Figura 3. Localización de la subcuenca de estudio. Elaboración propia.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la zona está principalmente compuesta en cuanto concierne a uso de suelo en su mayoría por selva baja caducifolia siendo esta un 77% de la cubierta total, y en menor cantidad por pastizales cultivados (tabla 1).

Tabla 1. Porcentaje de uso de suelo en la cuenca.

Entidad	Área [km ²]	Porcentaje [%]
Cuerpos de agua	0.185	0.260
Pastizal cultivado	1.478	2.079

Pastizal inducido	10.71	15.067
Selva baja caducifolia	54.909	77.248
Selva baja espinosa caducifolia	0.999	1.405
Vegetación secundaria	2.8	3.939

La litología de la subcuenca está compuesta principalmente por toba riolítica en la región norte y por donde fluye el cauce principal (tabla 2). Sobre el cauce principal también se puede encontrar material de granito y granolito, lo cual sugiere que el magma volcánico se solidificó sobre la superficie. En menores cantidades se encuentra la ignimbrita riolítica, proveniente de explosiones volcánicas que producen un flujo piroclástico.

Tabla 2. Porcentaje de estructuras litológicas en la cuenca.

Litología	Área [km ²]	Porcentaje [%]
Andesita-Toba andesítica	1.388	1.953
Basalto-Andesita	4.122	5.799
Conglomerado poligénico	3.825	5.381
Conglomerado poligénico-Arenisca	8.227	11.574
Granito-Granodiorita	16.747	23.561
Ignimbrita-Toba riolítica	0.412	0.580
No aplicable	0.657	0.924
Toba riolítica-Andesita	35.702	50.228

La combinación del uso de suelo y las características litológicas nos muestran zonas de bosques que garantizan cierta estabilidad al suelo, así como el potencial uso de áreas aptas para cultivo y vegetación inducida. También se establece que las zonas con una mayor presencia de litología de clase volcánica son las zonas donde se puede tener un incremento la erosión del suelo. Esto se puede ver principalmente en las zonas de oeste de la cuenca, donde se destaca la presencia de roca volcánica (figuras 4 y 5).

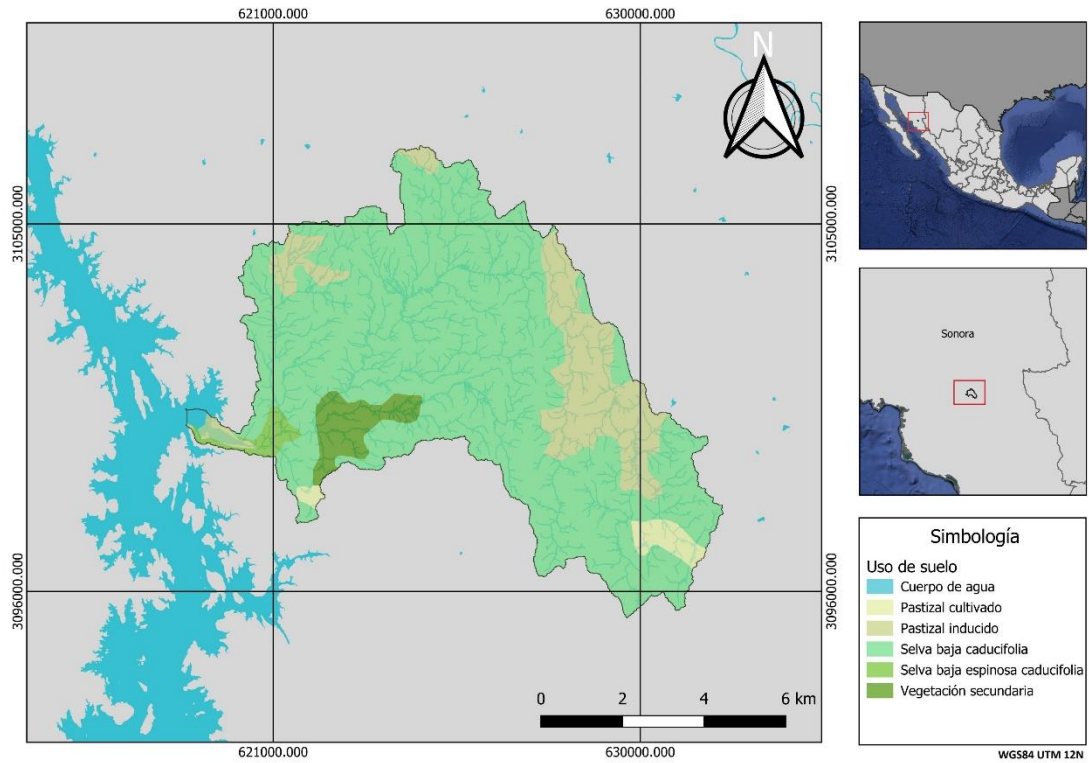


Figura 4. Uso de suelo en la subcuenca de estudio. Elaboración propia con datos de INEGI (2018).

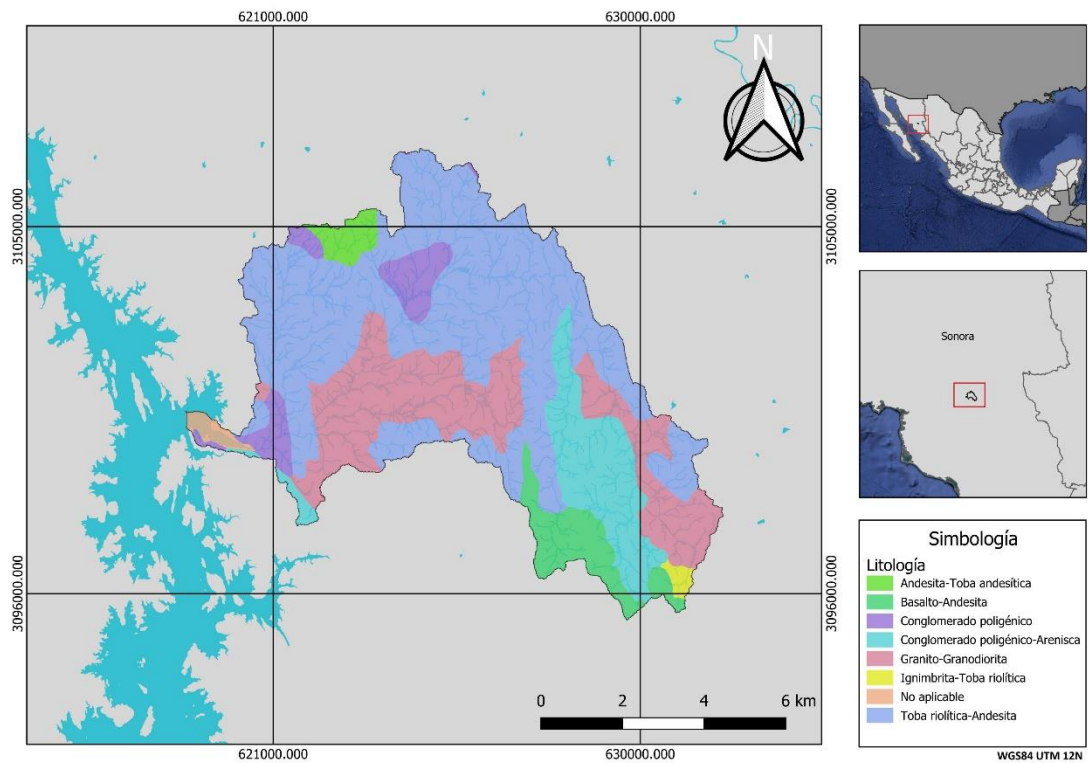


Figura 5. Litología de la subcuenca. Elaboración propia con datos de Servicio Geológico Mexicano (2015).

V.II.a. Características fisiográficas

Área de la cuenca

$A = 71 [km^2]$ obtenidos a partir de un Sistema de Información Geográfico (SIG)

Perímetro de la cuenca

$P = 72.457 [km]$ obtenidos a partir de un Sistema de Información Geográfico (SIG)

Longitud del cauce principal

$L_c = 25.268 [km]$ obtenidos a partir de un Sistema de Información Geográfico (SIG)

Coefficiente de compacidad

$$C_c = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} = 0.282 \frac{72.457}{\sqrt{71}} = 2.42 > 1 \text{ por lo tanto es una cuenca asimétrica}$$

Pendiente media del cauce por Taylor Schwarz

$$S_c = \left[\frac{L_c}{\frac{L_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{L_2}{\sqrt{S_2}} + \frac{L_3}{\sqrt{S_3}} + \dots + \frac{L_n}{\sqrt{S_n}}} \right]^2$$

Ecuación 2. Ecuación de Taylor Schwarz para pendiente media

donde:

n es el número de segmentos en el que se divide el cauce principal.

L_n son las distancias entre segmentos divididos del cauce en m.

S_n son las pendientes entre las distancias L_n del cauce.

Con ayuda de un SIG es posible importar las distancias y las elevaciones del cauce principal (figura 6).

Para el cálculo de la pendiente media se utilizaron segmentos de aproximadamente 14.5 m, los cuales procesados con una hoja de cálculo dieron como resultado:

$$S_c = \left[\frac{25268}{\frac{14.5}{\sqrt{0.276}} + \frac{14.5}{\sqrt{0.276}} + \frac{14.5}{\sqrt{0.276}} + \dots + \frac{14.5}{\sqrt{0.069}}} \right]^2 = 1.451\% = 0.01451$$

Tabla 3. Segmento del seccionamiento para el método de Taylor-Schwarz.

Δx [m]	Δy [msnm]	L [m]	S	S ^{1/2}	L/S ^{1/2}
0	435	14.44806	0.27685	0.52617	27.45897
14.44806	431	14.44806	0.27685	0.52617	27.45897
28.89611	427	14.44806	0.27685	0.52617	27.45897
43.34417	423	14.44806	0.27685	0.52617	27.45897
57.79223	419	14.44806	0.20764	0.45568	31.70688
72.24028	416	20.43264	0.19577	0.44245	46.18029
92.67292	412	14.44806	0	0	0
107.12098	412	14.44806	0.27685	0.52617	27.45897
121.56904	408	14.44806	0.34607	0.58827	24.56005
136.01709	403	14.44806	0.20764	0.45568	31.70688
150.46515	400	14.44806	0.13843	0.37206	38.83284
164.91321	398	14.44806	0.13843	0.37206	38.83284
...
25248.38586	64	14.44805	0.06921	0.26308	54.91792

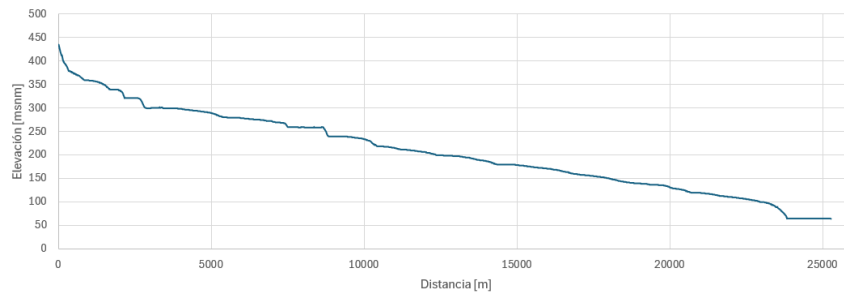


Figura 6. Perfil de elevaciones del cauce principal.

Tiempo de concentración por fórmula de Kirpich

$$t_c = 0.000325 \left(\frac{L_c}{\sqrt{S_c}} \right)^{0.77} = 0.000325 \left(\frac{25268}{\sqrt{0.01451}} \right)^{0.77} = 4.07 [hr] = 244.21 [min]$$

Ecuación 3. Ecuación de Kirpich para tiempo de concentración.

donde:

L_c es la longitud del cauce principal en m.

S_c es la pendiente media del cauce.

En la tabla 4 se muestra un resumen de las características fisiográficas obtenidas.

Tabla 4. Principales características fisiográficas.

Parámetro	Valor
Área de la subcuenca	71 [km ²]
Perímetro de la subcuenca	72.457 [km]
Longitud del cauce principal	25.268 [km]
Coefficiente de compacidad	2.42 > 1, por lo tanto es asimétrica
Pendiente media del cauce	0.01451
Tiempo de concentración	244.21 [min]

VI. Escenarios de uso de suelo para los años 2000 y 2020

El análisis del uso de suelo del área de estudio para los dos escenarios seleccionados fue procesado mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Las imágenes satelitales utilizadas en el estudio son de una buena calidad y permiten observar el cambio en la cubierta de vegetación en los 20 años de estudio.

Los escenarios de uso de suelo fueron obtenidos teniendo con base a imágenes satelitales adquiridas a través del portal de Google Earth (figura 7) que toma información de los satélites Landsat y Copernicus. A través de la herramienta de la línea de tiempo se lograron obtener imágenes para las fechas de diciembre del 2000 y enero del 2020.

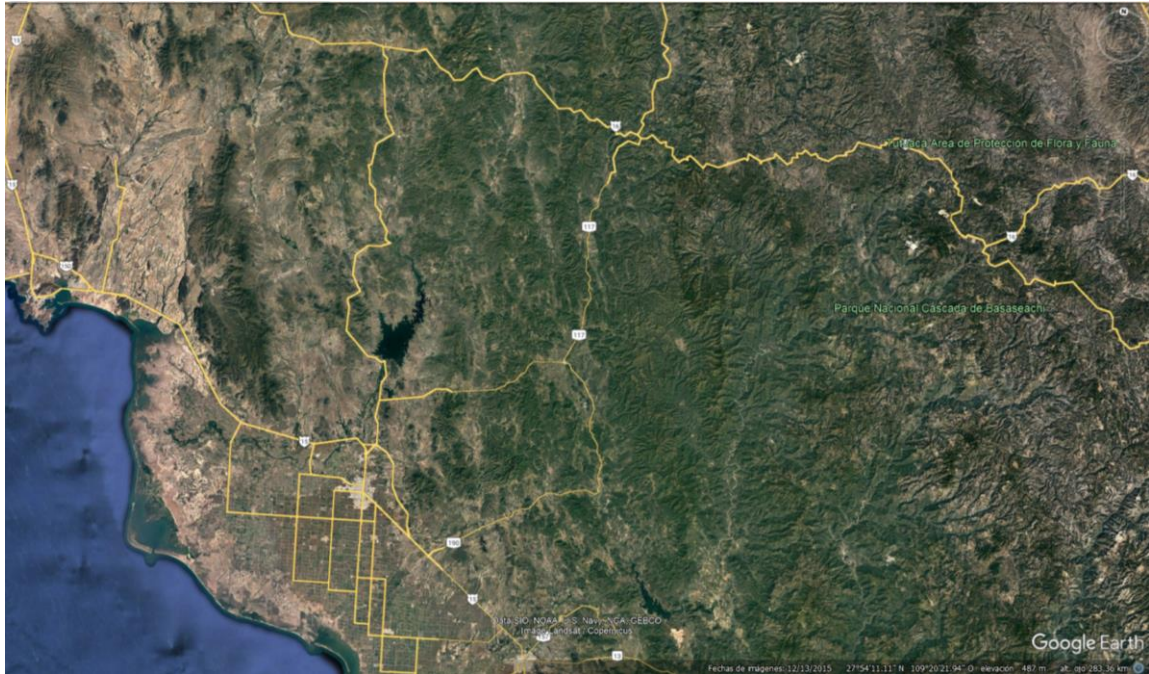


Figura 7. Portal de la aplicación de Google Earth.

Una vez encontradas las imágenes para la fecha requerida, se descargan directamente desde la aplicación de Google Earth (figura 8). Para esto, se debe establecer en la pantalla del visor la zona de donde se requiere obtener una imagen y solicita la descarga del material con la máxima calidad posible.

Es importante destacar que, si bien la línea del tiempo permite explorar la evolución de las imágenes satelitales tomadas, estas tienen ciertas limitantes y restricciones, ya que estas fotografías son tomadas cada cierto periodo de tiempo y la información del día, mes y año de las imágenes se observa desde un apartado en la zona inferior de la figura 7.

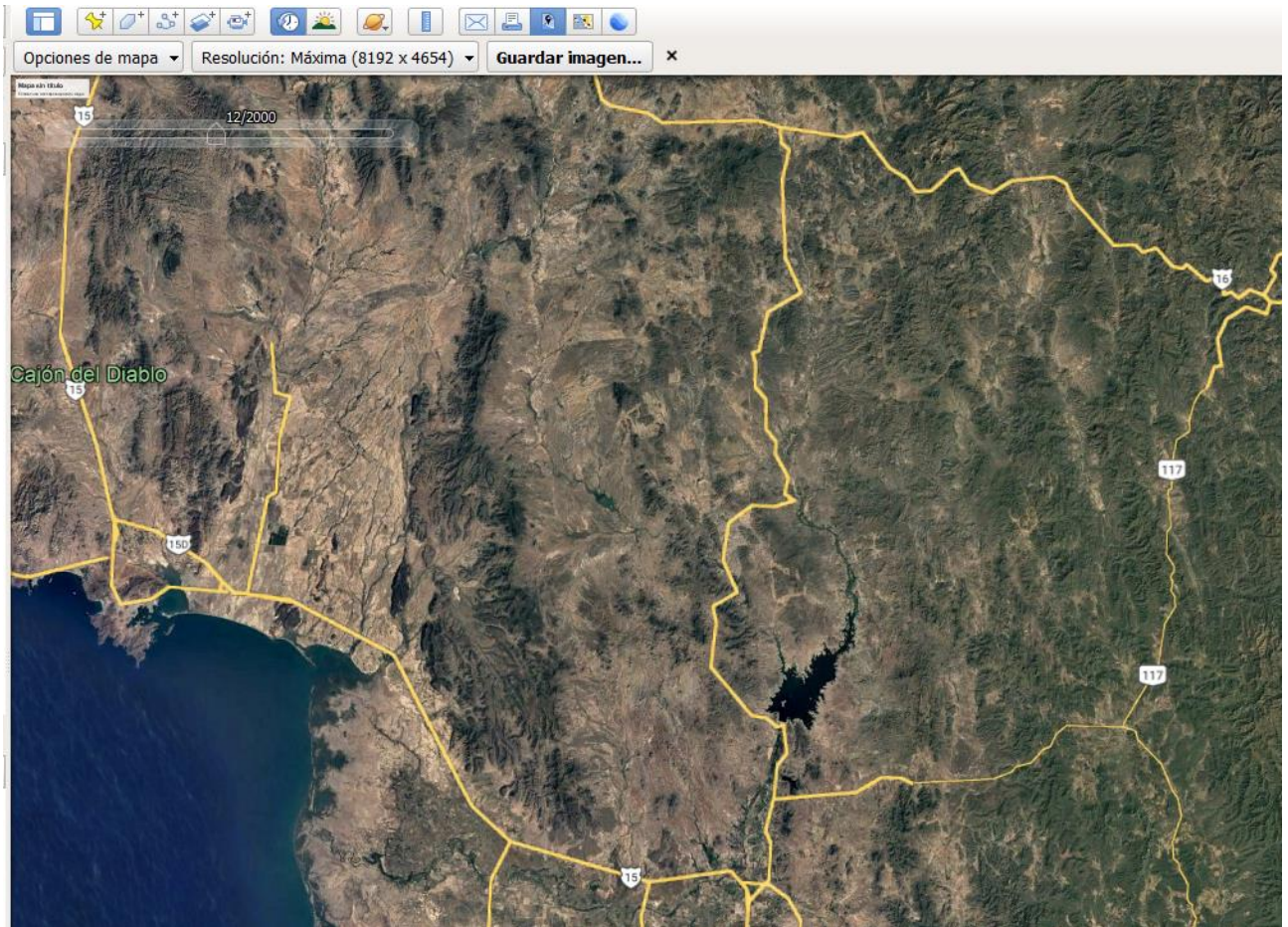


Figura 8. Herramienta de descarga de imágenes.

Una vez identificadas y descargadas las imágenes para los dos años de estudio (2000 y 2020), mediante el procesador de información geográfica QGis, se georreferenciaron correctamente y se hizo un recorte al parteaguas de la cuenca para solo obtener la información dentro de la región de interés (Figuras 9 y 10).

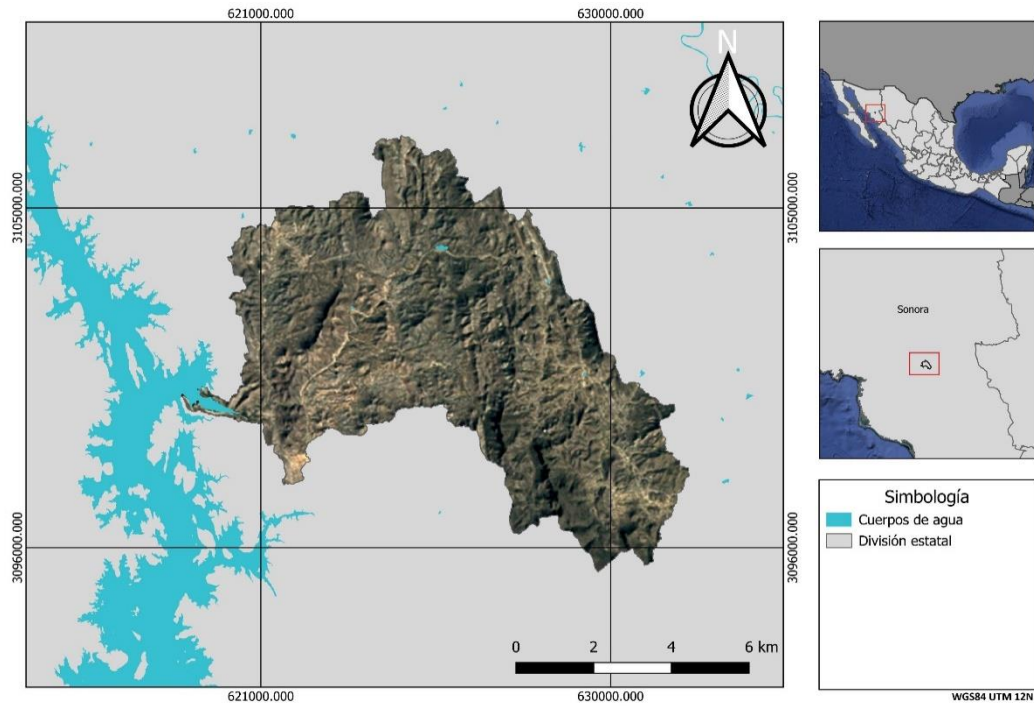


Figura 9. Imagen satelital tomada del 30 de diciembre del 2000. Elaboración propia a partir de datos del portal Earth Explorer.

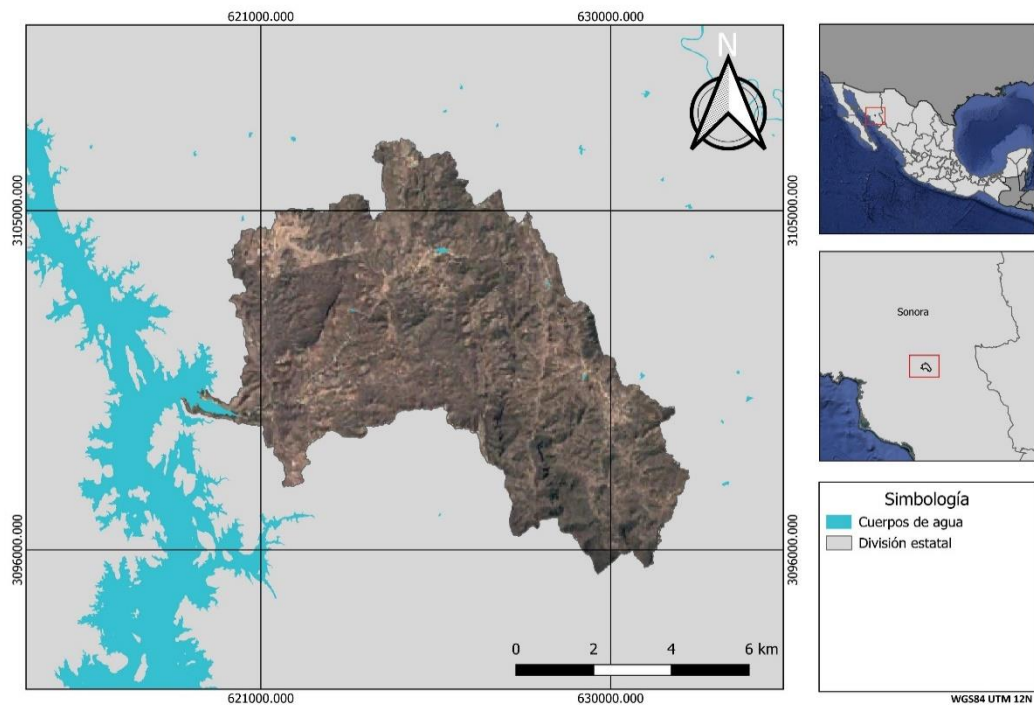


Figura 10. Imagen obtenida del 30 de enero de 2020. Elaboración propia a partir de datos del portal Earth Explorer.

VI. Modelo numérico de IBER

El módulo hidrodinámico de Iber resuelve las ecuaciones de Saint Venant de flujo bidimensionales, las cuales son aproximaciones de las ecuaciones de Navier Stokes mediante dos simplificaciones que consideran un promedio de velocidad en la profundidad y un promedio de las velocidades por fluctuaciones turbulentas. Estas ecuaciones incorporan los efectos de la turbulencia y rozamiento superficial por viento:

$$\begin{aligned} \frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta h U_x}{\delta x} + \frac{\delta h U_y}{\delta y} &= 0 \frac{\delta}{\delta t} (h U_x) + \frac{\delta}{\delta x} \left(h U_x^2 + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\delta}{\delta y} (h U_x U_y) \\ &= -gh \frac{\delta Z_b}{\delta x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\delta}{\delta x} \left(v_t h \frac{\delta U_x}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(v_t h \frac{\delta U_x}{\delta y} \right) \frac{\delta}{\delta t} (h U_y) + \frac{\delta}{\delta x} (h U_x U_y) \\ &+ \frac{\delta}{\delta y} \left(h U_y^2 + g \frac{h^2}{2} \right) = -gh \frac{\delta Z_b}{\delta y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\delta}{\delta x} \left(v_t h \frac{\delta U_y}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(v_t h \frac{\delta U_y}{\delta y} \right) \end{aligned}$$

Ecuación 4. Ecuaciones de Saint Venant.

donde:

h es el calado.

U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad.

g es la aceleración de la gravedad.

ρ es la densidad del agua.

Z_b es la cota del fondo.

τ_s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento.

τ_b es la fricción debida al rozamiento del fondo.

u_t es la viscosidad turbulenta.

La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning como:

$$\tau_{b,x} = \rho g h \frac{n^2 U_x |U|^2}{h^{4/3}} \quad ; \quad \tau_{b,y} = \rho g h \frac{n^2 U_y |U|^2}{h^{4/3}}$$

Ecuación 5. Ecuaciones de Manning.

La fuerza de rozamiento realizada por el viento sobre la superficie libre se calcula a partir de la velocidad del viento a 10 m de altura, utilizando para ello la ecuación de Van Dorn:

$$\tau_{s,x} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{x,10} \quad ; \quad \tau_{s,y} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{y,10}$$

Ecuación 6. Ecuación de Van Dorn para la fuerza de rozamiento.

donde:

$V_{X,10}$, $V_{Y,10}$ son las 2 componentes de la velocidad del viento a 10 m de altura.

$|V_{10}|$ es el módulo de la velocidad del viento a 10 m de altura.

C_{VD} es un coeficiente de arrastre superficial que se calcula en función de la velocidad del viento a partir de la siguiente expresión:

$$|V_{10}| < 5,6 \text{ m/s} \rightarrow C_{VD} = 1,2 * 10^{-6} |V_{10}| \geq 5,6 \text{ m/s} \rightarrow C_{VD} = 1,2 * 10^{-6} + 2,25 * 10^{-6} \left(1 - \frac{5,6}{|V_{10}|}\right)^2$$

Ecuación 7. Ecuación del coeficiente de arrastre superficial.

La viscosidad turbulenta se calcula mediante modelos de turbulencia específicos para las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad. Iber incluye 3 modelos de turbulencia promediados en profundidad: el modelo parabólico, un modelo de longitud de mezcla y el modelo k-ε de Rastogi y Rodi. En el modelo parabólico se calcula la viscosidad turbulenta como:

$$v_t = 0.068 u_f h \quad ; \quad u_f = \sqrt{\tau_b / \rho}$$

Siendo u_f la velocidad de fricción de fondo.

Utilizando la fórmula de Manning para calcular la fricción de fondo se obtiene la siguiente expresión para la viscosidad turbulenta:

$$v_t = 0.0698 \sqrt{gn} |U| h^{5/6}$$

En el modelo de longitud de mezcla para aguas someras, la viscosidad turbulenta se calcula mediante la siguiente expresión:

$$v_t = [\min(0,267kh, kd_{wall})]^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij} + \left(2.34 \frac{u_f}{kh}\right)^2} \quad ; \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta U_i}{\delta x_j} + \frac{\delta U_j}{\delta x_i}\right)$$

Ecuación 8. Ecuación de Viscosidad turbulenta.

donde:

$K=0.41$ es la constante de Von Karman.

d_{wall} es la distancia desde el punto considerado a la pared más cercana.

El modelo k- ϵ de Rastogi y Rodi resuelve una ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta k y para la tasa de disipación de energía turbulenta ϵ :

$$\begin{aligned} \frac{\delta k}{\delta t} + \frac{\delta U_x k}{\delta x} + \frac{\delta U_y k}{\delta y} &= \frac{\delta}{\delta x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\delta k}{\delta x_j} \right) + 2\nu_t S_{ij} S_{ij} + c_k \frac{u_f^3}{h} - \epsilon \frac{\delta \epsilon}{\delta t} + \frac{\delta U_x \epsilon}{\delta x} + \frac{\delta U_y \epsilon}{\delta y} \\ &= \frac{\delta}{\delta x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\delta k}{\delta x_j} \right) + c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} 2\nu_t S_{ij} S_{ij} + c_\epsilon \frac{u_f^4}{h^2} - c_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} c_k \\ &= c_f^{-1/2} c_\epsilon = 3.6 c_k^{3/2} c_{\epsilon 2} c_\mu^{1/2} c_f = \frac{\tau_b}{\rho} \frac{1}{|U|^2} c_\mu = 0.09 c_{\epsilon 1} = 1.44 c_{\epsilon 2} = 1.92 \sigma_k \\ &= 1.0 c_k = 1.31 \end{aligned}$$

Ecuación 9. Ecuación de transporte para la energía cinética.

VII.I. Condiciones de contorno

El modelo de Iber distingue entre contornos cerrados (tipo pared) y contornos abiertos por los cuales entra y sale el agua del dominio de cálculo. En los contornos cerrados se puede imponer o una condición de deslizamiento libre o una condición de fricción de pared. Con la condición de deslizamiento libre se desprecia el rozamiento generado por los contornos sobre el fluido. Si se considera relevante el efecto del rozamiento generado por el contorno se debe utilizar una condición de contorno tipo fricción. La velocidad tangencial a la pared puede expresarse como una función de la velocidad de fricción de pared (u^*) y de la distancia a la pared como:

$$|U| = \frac{u_*}{0.4} \ln \left(E * \frac{du_*}{\nu} \right)$$

Ecuación 10. Ecuación de la velocidad tangencial.

donde:

d es la distancia en perpendicular a la pared.

E es un parámetro cuyo valor depende de las características del flujo.

Para el cálculo de E se consideran condiciones de flujo turbulento liso, turbulento rugoso, y transición entre turbulento liso y rugoso. Respecto a los contornos abiertos, se consideran diferentes alternativas en función del régimen hidráulico en el contorno. La distribución del caudal unitario a lo largo del contorno se realiza de forma proporcional al calado en cada punto de este según la expresión.

$$q_n = C * h^{5/3}$$

Ecuación 11. Ecuación de gasto unitario.

donde:

C es una constante que asegura que la integral del caudal unitario q_n a lo largo del contorno considerado es igual al caudal total de entrada.

En los contornos de salida se impone el nivel de la lámina de agua en caso de que se produzca un régimen subcrítico, mientras que no es necesario imponer ninguna condición en el caso de que el régimen sea supercrítico. En los contornos de salida se considera asimismo la posibilidad de introducir una relación de curva de gasto que defina la relación entre la cota de la lámina de agua y el caudal específico desaguado en cada punto del contorno.

VII.II. Condiciones internas

Las condiciones internas se utilizan para modelar estructuras hidráulicas tipo compuertas, vertederos o puentes que entran en carga (figura 11). En estos casos las ecuaciones de St. Venant dejan de ser válidas por incumplirse las hipótesis de presión hidrostática y velocidad uniforme en profundidad, y por lo tanto es más adecuado calcular la relación entre el caudal y la pérdida de carga a través de dichas estructuras mediante ecuaciones de descarga específicas. En Iber se consideran condiciones internas de flujo bajo compuerta y de flujo sobre vertedero en lámina libre. El flujo a través de tableros de puentes anegados se puede calcular como la combinación de las 2 condiciones anteriores. En este caso el caudal total desaguado se obtiene como la suma del caudal bajo compuerta y del caudal sobre vertedero. Las ecuaciones de desagüe y variables utilizadas en cada caso se especifican en la tabla 5.

Tabla 5. Ecuaciones usadas para condiciones internas.

Compuerta – Libre	$(Z_D - Z_B)(Z_U - Z_B) < 0.67$	$Q = C_{dg} B h \sqrt{2g(Z_u - Z_B)}$
Compuerta – Transición	$0.67 < (Z_D - Z_B)(Z_U - Z_B) < 0.80$	$Q = C_{dg} B h \sqrt{6g(Z_u - Z_B)}$
Compuerta – Anegada	$(Z_D - Z_B)(Z_U - Z_B) > 0.80$	$Q = C'_{dg} B h \sqrt{2g(Z_u - Z_B)}$
Vertedero – Libre	$(Z_D - Z_B)(Z_U - Z_B) < 0.67$	$Q = C_{dw} B (Z_U - Z_w)^{1.5}$
Vertedero - Anegado	$(Z_D - Z_B)(Z_U - Z_B) > 0.67$	$Q = 2.6 C_{dw} B (Z_D - Z_w)(Z_U - Z_w)^{0.5}$

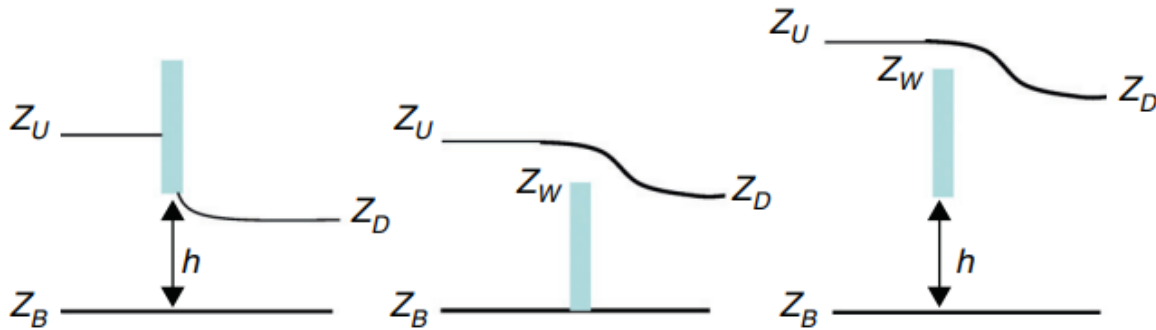


Figura 11. Esquema de las variables utilizadas en la definición de condiciones internas (E. Bladé 2014).

donde:

C_{dg} es el coeficiente de desagüe para compuerta libre.

C'_{dg} es el coeficiente de descarga para compuerta sumergida.

C_{dw} es el coeficiente de descarga del vertedero.

B es el ancho de paso de la estructura.

VII.III. Esquemas numéricos

Las ecuaciones de aguas someras y las del modelo $k-\epsilon$ se resuelven mediante el método de volúmenes finitos para mallas bidimensionales no estructuradas. La discretización del dominio espacial se realiza con volúmenes finitos en mallas no estructuradas, admitiéndose estas mixtas formadas por elementos triangulares y cuadrangulares.

VII.IV. Proceso y postproceso

La interfaz de Iber está realizada en base al programa GiD, desarrollado por el Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE). GiD es un

programa de preproceso y post proceso para simulaciones numéricas que está diseñado para ser adaptado y personalizado según los requisitos del modelo numérico.

Muchas de las capacidades disponibles en la interfaz de Iber son intrínsecas de GiD, pero muchas otras han sido desarrolladas para dotar al modelo de las herramientas específicas que se necesitan para simulación numérica de flujos a lámina libre en aguas poco profundas.

El preproceso destaca por la importación de archivos georreferenciados tanto para un modelo digital de elevaciones como para un archivo asociado a rugosidades de Manning para los usos de suelo y su asignación a los elementos de la malla generada.

La generación de una malla es un paso importante para la simulación numérica, ya que con base a la calidad proporcionada dependerán los esfuerzos y el tiempo requerido para el procesamiento de los datos. Para la generación de cuencas particularmente es posible importar el archivo del MDE como una única superficie. Iber considera las superficies como entidades NURBS (Non Uniform Rational B-Splines). De esta forma se generan mallas de buena calidad.

La base del modelo Iber son los módulos que calculan la hidrodinámica y la turbulencia. La herramienta completa tiene la posibilidad de incluir en las ecuaciones del modelo los efectos de las precipitaciones y del transporte de sedimentos (Bladè et al., 2014).

VII.V. Transporte de sedimentos

En el módulo de transporte de sedimentos se resuelven las ecuaciones de transporte por carga de fondo y por carga en suspensión. En todos los casos se consideran granulometrías uniformes. El caudal sólido de fondo se calcula mediante formulaciones empíricas en función de la tensión de fondo.

El módulo de transporte de sedimentos por carga de fondo usa las ecuaciones de Peter Müller corregidas en 2006 por Wong y Parker.

Meyer-Peter y Müller con corrección de Wong-Parker ($D = 2- 30 \text{ mm}$).

$$q_{sb}^* = 3.97(\tau_{bs}^* - \tau_c^*)^{3/2}$$

Ecuación 12. Ecuación de Meyer-Peter y Müller para el transporte de sedimentos.

donde:

q_{sb}^* es el gasto sólido unitario.

τ_{bs}^* es la tensión de la partícula adimensional.

τ_c^* es 0.4059 para el caso de fondo plano.

En Iber es posible considerar el aporte de masa de agua generado por un episodio de precipitación variable en el tiempo y en el espacio (Iber, 2012).

VII. Metodología

Esta sección menciona la metodología empleada para la estimación de la erosión y pérdida de cobertura vegetal de la cuenca de estudio. En la figura 12 se muestra la metodología seguida, iniciando por la descarga de imágenes satelitales hasta el análisis y procesamiento de resultados de las simulaciones numéricas.

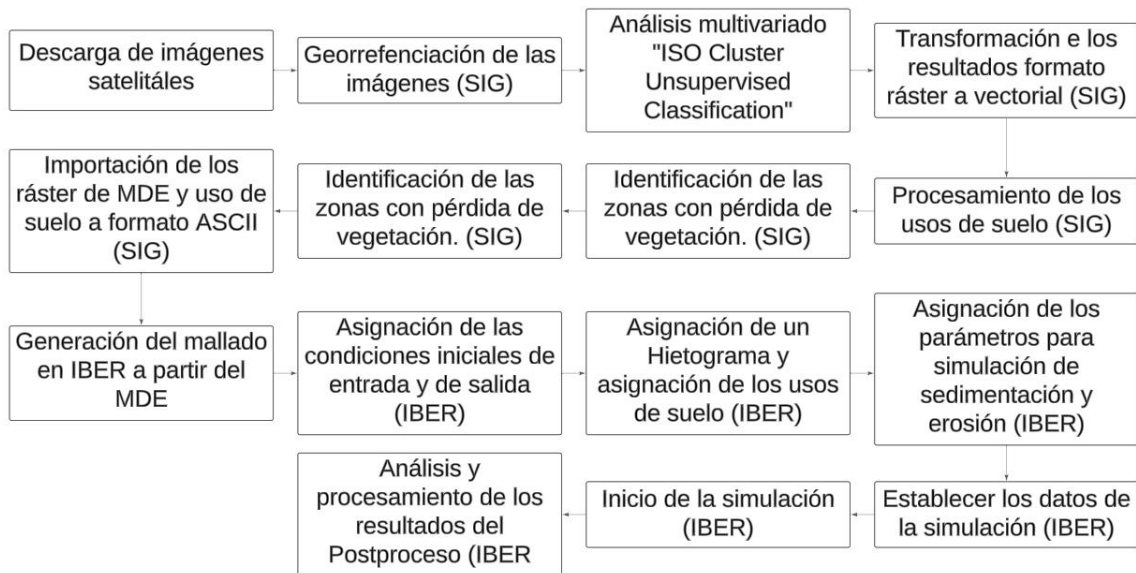


Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

VIII.I. Metodología ISO Cluster Unsupervised Classification

Las imágenes satelitales obtenidas para ambas fechas fueron procesadas con un Sistema de Información geográfica (SIG), el cual con una herramienta de análisis

multivariado "ISO Cluster Unsupervised Classification" permite reclasificar un archivo raster con diferentes tipos de suelo, mediante la aplicación de filtros a las imágenes satelitales (figura 13).

Este proceso realiza una clasificación no supervisada en una serie de bandas ráster de entrada utilizando las herramientas de clasificación de clústeres ISO y máxima verosimilitud (Portal ESRI).

El resultante de salida de este proceso es un archivo ráster, este resultante se puede utilizar como archivo de entrada para realizar una mejor clasificación de los parámetros.

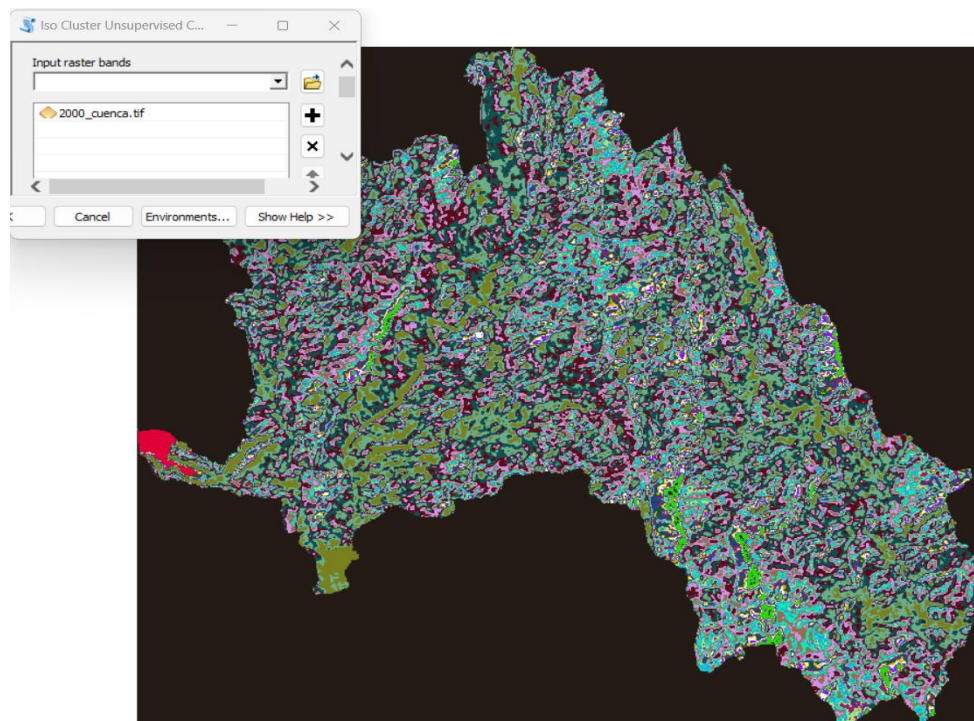


Figura 13. Reclasificación mediante "ISO Cluster Unsupervised Classification" para el año 2000.

Con la ayuda del SIG se llevó a cabo una nueva clasificación, para fines del estudio se limitó a el análisis de la subcuenca teniendo en cuenta dos grupos de tipos de suelo: Cubierta vegetal y pastizales.

Como se observaba en las figuras 9 y 10, se muestra cualitativamente el cambio de cubierta vegetal para los años en estudio, teniendo una baja considerable en la

cantidad de vegetación. Con el procesamiento de los archivos ráster en formatos vectoriales es posible tener una representación simplificada del contraste entre el uso de suelo y los cambios que han tenido a lo largo de dos décadas, logrando así una comparación cuantitativa de áreas que cambiaron de cobertura (tabla 6).

Tabla 6. Área de uso de suelo para los escenarios del año 2000 y 2020.

Uso de suelo	2000		2020	
	Área [km ²]	Porcentaje [%]	Área [km ²]	Porcentaje [%]
Vegetación	61.288	86.219	38.563	54.250
Pastizal	9.796	13.781	32.521	45.750

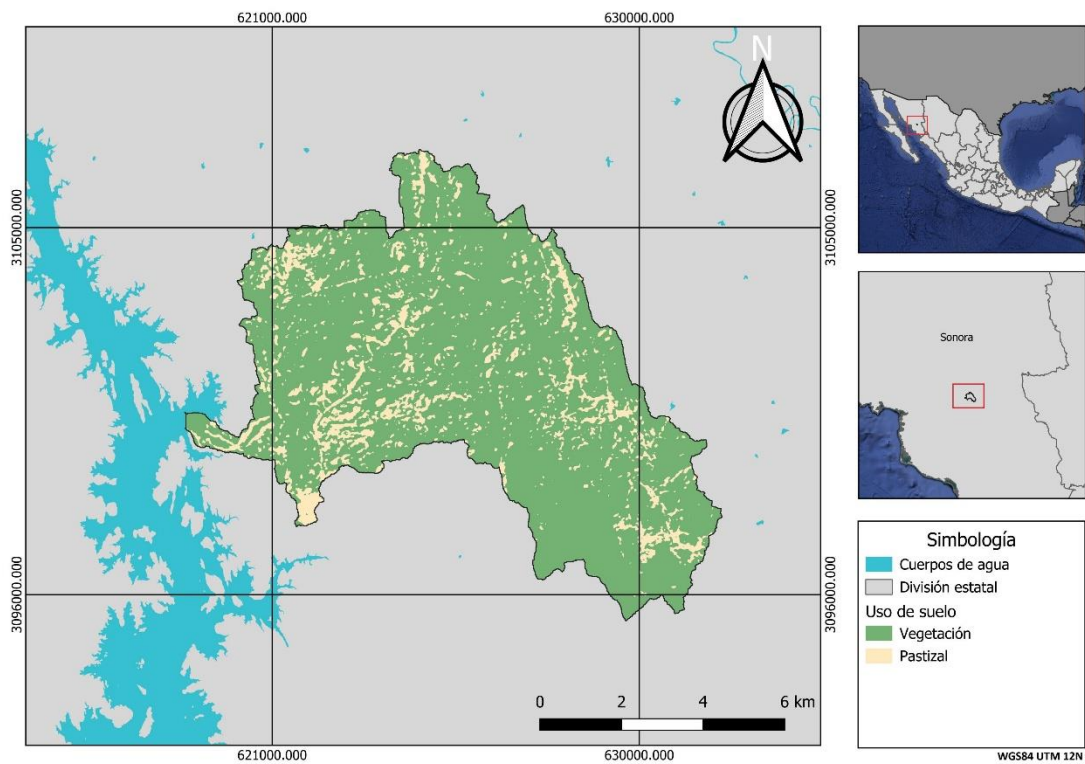


Figura 14. Clasificación de uso de suelo año 2000. Elaboración propia.

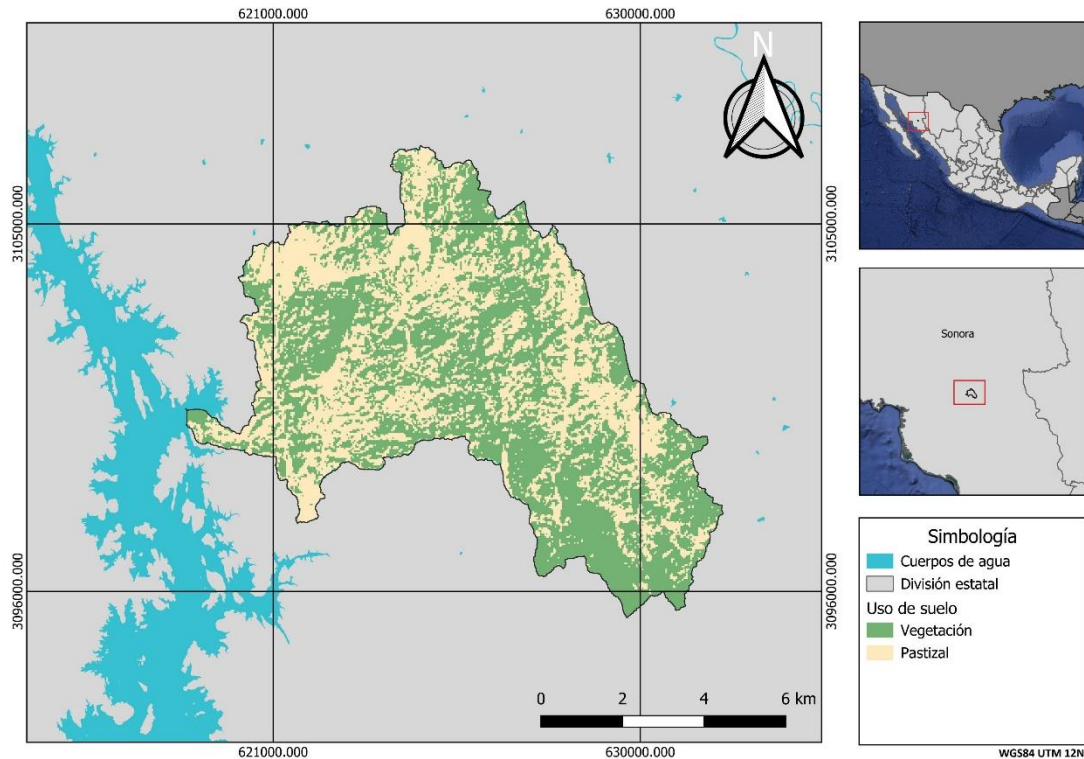


Figura 15. Clasificación de uso de suelo año 2020. Elaboración propia.

Del 2000 al 2020 se muestra un incremento considerable en las áreas de pastizales y una baja en las áreas verdes. El procesamiento de las imágenes indica una pérdida de vegetación por deforestación. En las figuras 14 y 15 se puede apreciar particularmente el cambio, teniendo una tendencia marcada en la zona norte de la cuenca y la zona central por donde corre el flujo del cauce principal.

La figura 16 muestra claramente como ha sido la degradación de la vegetación y cuales áreas de zonas verdes han sido convertidas en zonas de pastizal, siendo esto un área de 25 km² de cubierta vegetal (año 2000) a pastizal (año 2020).

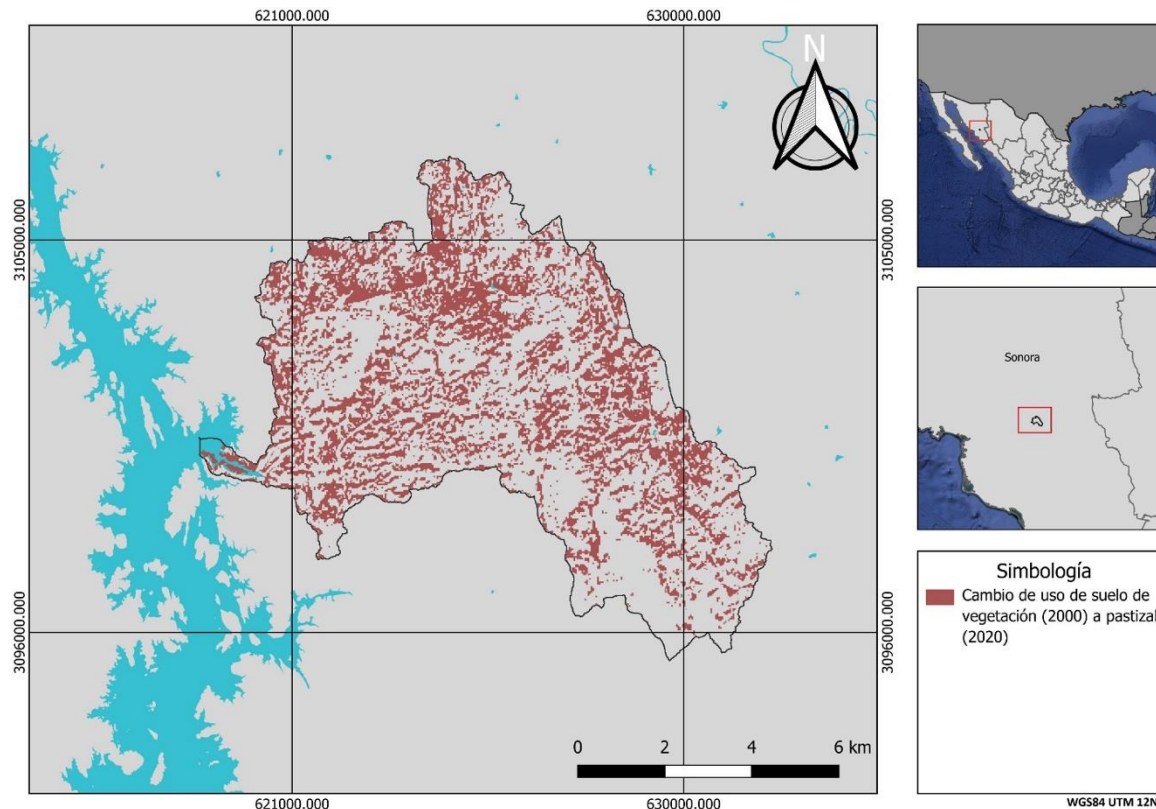


Figura 16. Cambio de uso de suelo de vegetación a pastizal (2000-2020). Elaboración propia.

VIII.II. Simulación de escenarios para tipo de suelo de los años 2000 y 2020

El procesamiento de ambos casos ha sido realizado mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y ha sido posible identificar zonas donde ha ocurrido una reducción de la cubierta vegetal.

La información obtenida de los usos de suelo es un insumo necesario para realizar una simulación numérica en el software IBER, el cual hace uso de las ecuaciones de Meyer-Peter y Müller para el cálculo de transporte de sedimentos.

Para la modelación de IBER se parte como base tener una representación en mallado del terreno, esto es posible de realizar a través de un archivo en codificación ASCII del Modelo digital de Elevaciones obtenido del portal de INEGI con una resolución de 15 m.

La calidad de la malla es un parámetro importante ya que en función de la cantidad de elementos creados los resultados obtenidos por medio de la simulación tendrán

una mayor precisión. Para nuestro caso de estudio se estableció una calidad de malla con 168,034 elementos (figuras 17 y 18).

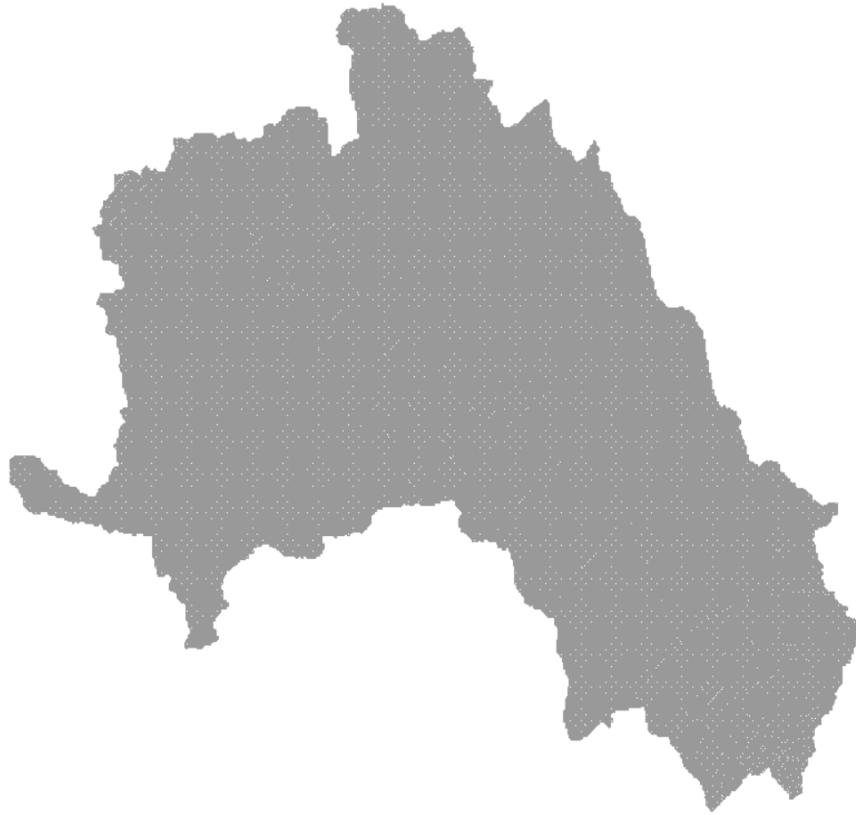


Figura 17. Mallado del Modelo digital de Elevaciones.

Al mallado se le asigna un uso de suelo para cada uno de nuestros dos años de estudio, siendo importante para el proceso el importar desde un SIG los ráster necesarios en formato ASCII para que el Software IBER pueda realizar una asignación automática de los materiales de la zona.

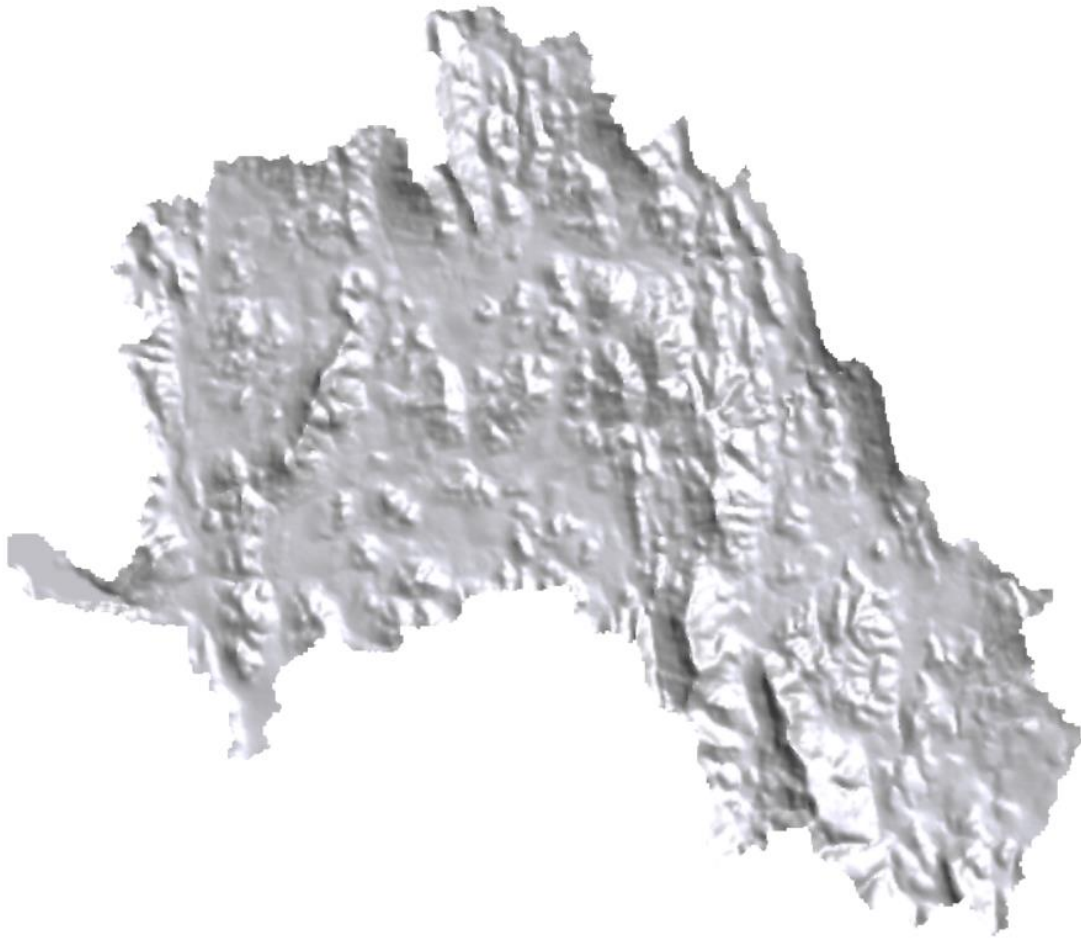


Figura 18. Modelación del Modelo digital de elevaciones en Iber.

En este caso, dada la configuración de IBER los resultados presentan una variación en color siendo ahora los pastizales representados por el color verde y la vegetación en color amarillo (Figura 19 y 20).

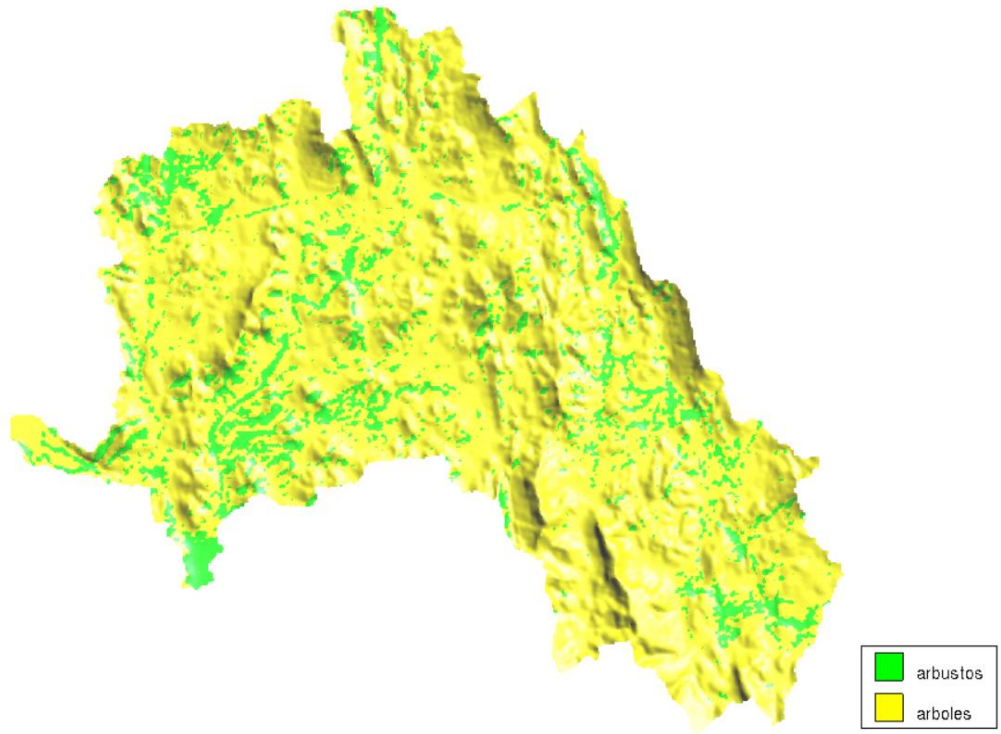


Figura 19. Asignación de usos de suelo año 2000.

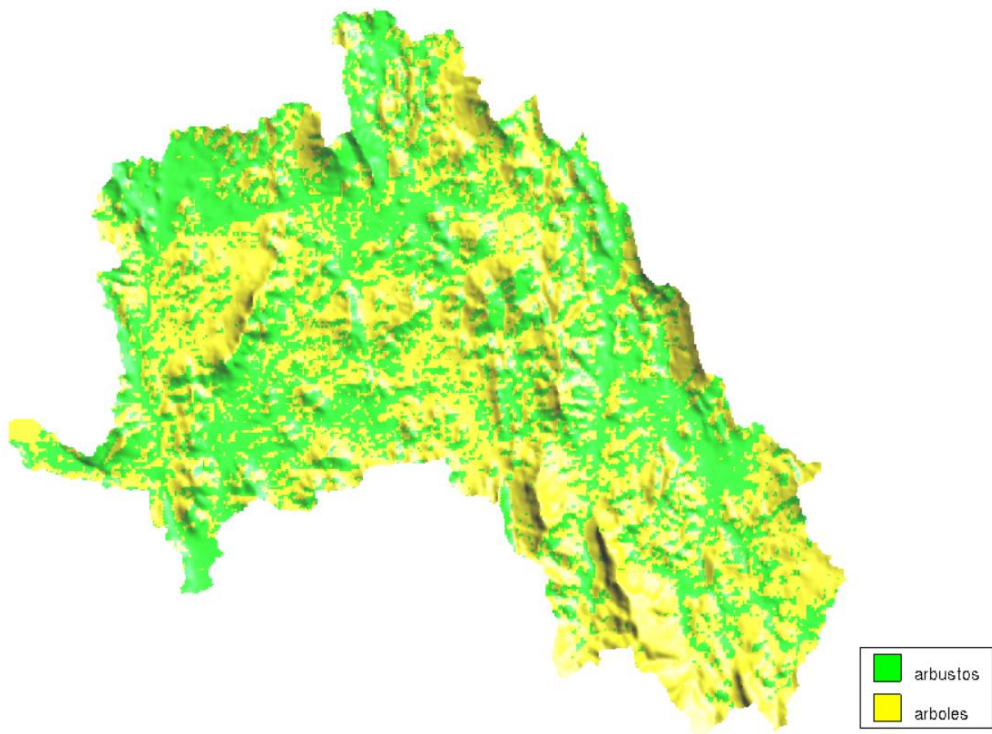


Figura 20. Asignación de usos de suelo 2020.

El coeficiente de rugosidad se establece para el pastizal de 0.5 y para árboles vegetación de 0.12 (estos valores son proporcionados por defecto desde la interfaz de IBER).

La simulación requiere de distintos parámetros como lo son un hietograma que va a simular la lluvia en un periodo de tiempo, coeficientes de rugosidad del tipo de suelo, tiempo de concentración y condiciones iniciales tanto de entrada como de salida.

Se establece para la simulación en ambos casos que hay una profundidad de 0 al inicio, esto quiere decir que no hay presencia de agua en la zona hasta comenzada la lluvia.

El hietograma usado para iniciar el proceso de erosión fue establecido en 27 mm/hr (Figura 21) y un tiempo de concentración de 240 min, este valor fue determinado con base a los parámetros morfológicos de la cuenca y usando las Isoyetas de la secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT, 2024). El tiempo de retorno para la selección de las isoyetas correspondientes fue de 25 años, esto por aproximación a nuestro periodo de estudio.

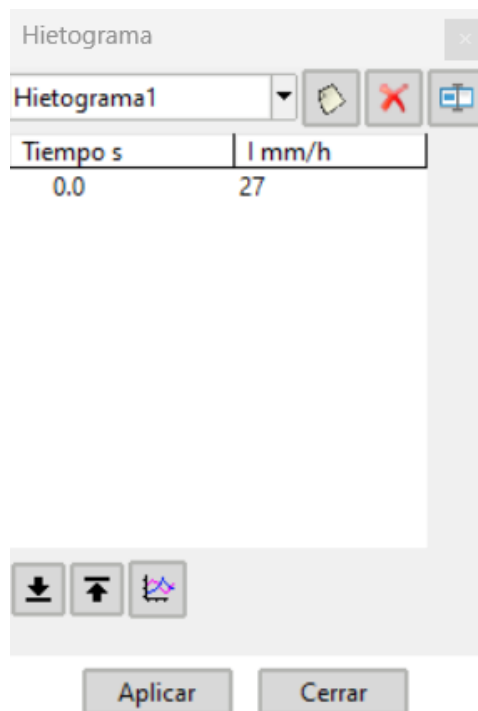


Figura 21. Hietograma propuesto.

El diámetro de partícula medio ó D_{50} es necesario para la modelación del transporte de sedimentos, este dato puede ser el más complicado de conseguir si no se tienen estudios de suelos realizados previamente en el sitio y se debe de considerar la bibliografía existente de la zona o las regiones aledañas. Para nuestro estudio, se utilizó una partícula D_{50} de 0.00019 m localizada en la bahía de lobos, obtenida a partir de un estudio de dragado en la zona por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2009).

Se hará uso de la ecuación de Meyer-Peter y Müller para transporte de fondo (Figura 22).

The image shows a software window titled "Datos" with a tabbed interface. The "Sedimentos" tab is selected. The parameters are as follows:

Parámetro	Valor
Sedimento en Suspensión	Desa
Transporte de Fondo	Activo
Modelo	Meyer-Peter&Müller
d50 [m]	0.00019
Porosidad T. Fondo	0.4
Ángulo de Fricción interna [rad]	0.55
Densidad relativa T.Fondo	2.65
Modelo de Avalancha	<input checked="" type="checkbox"/>
Instante Inicio Transp. Fondo [s]	0

Figura 22. Parámetros para el cálculo de transporte de fondo.

La simulación se establece con un tiempo de realización de 25,200 s en intervalos de 252 s. La simulación permite obtener una representación de distintos datos al final del ciclo, esto es información importante como la velocidad del flujo del cauce, las profundidades registradas y los mapas de erosión.

Esta información puede ser exportada a un formato ráster para ser procesada posteriormente por un SIG.

La tabla 7 presenta un resumen de los principales parámetros utilizados en la simulación.

Tabla 7. Parámetros utilizados para la simulación.

Parámetros	Valor
Coefficiente de rugosidad para pastizal	0.5
Coefficiente de rugosidad para vegetación	0.12
Intensidad de la lluvia	27 [mm/hr]
Tiempo de simulación	240 [min]
Partícula D ₅₀	0.00019 [m]

VIII. Resultados

Con el procesamiento de ambos casos de estudio con el Software IBER, es posible obtener una serie de resultados en el postprocesamiento.

IBER permite obtener diversos resultados de las simulaciones en el ámbito hidráulico, en esta ocasión se analizaron los parámetros de calado, velocidad y erosión generadas en las zonas, siendo el principal diferenciador de ambos análisis los usos de suelo que se generaron a partir de las imágenes satelitales.

Si bien, las condiciones fisiográficas de la cuenca pueden liderar a resultados similares, hay observaciones a destacar en ambos escenarios. Primeramente, para el caso de la velocidad (figuras 23 y 24). En el escenario del año 2000 las velocidades varían en un rango de 0 a 7 m/s, con la mayor velocidad concentrada en canales y valles. Para el año 2020 se tiene un aumento en la velocidad de flujo, esto se puede ver principalmente en las regiones sur, centro y a la salida de la cuenca. El incremento a la velocidad de flujo se atribuye principalmente a la pérdida de vegetación, lo cual reduce la resistencia natural al flujo y acelera el movimiento de las partículas a través de la cuenca.

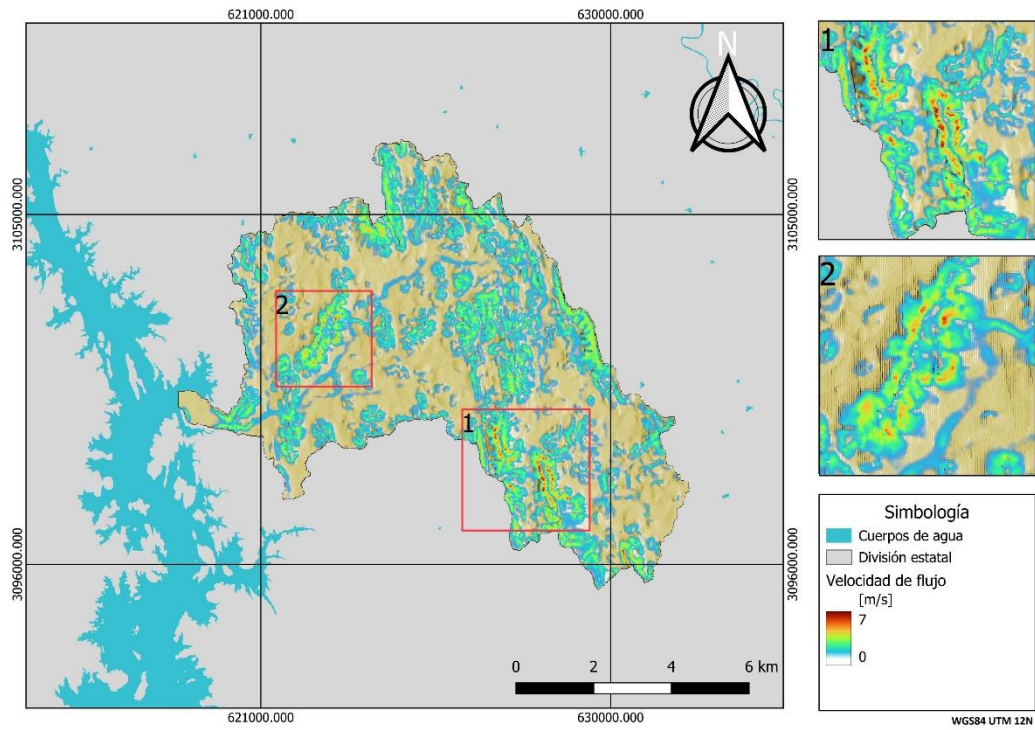


Figura 23. Velocidad del flujo para la simulación del año 2000. Elaboración propia.

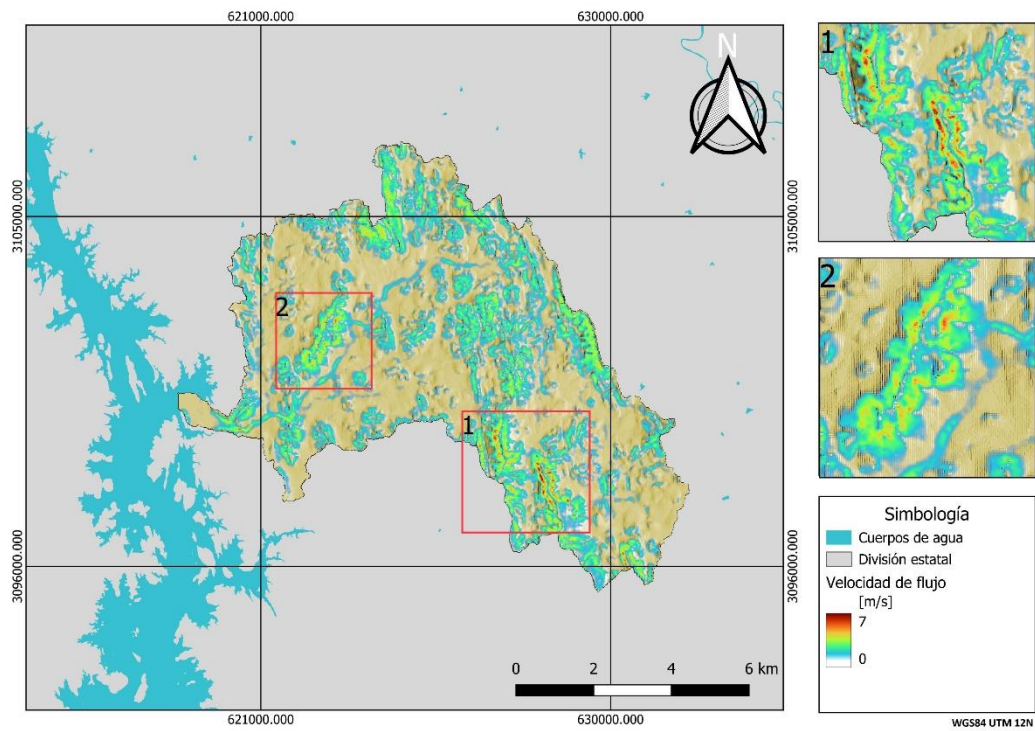


Figura 24. Velocidad de flujo para la simulación del año 2020. Elaboración propia.

Por su parte, en el apartado de las profundidades del agua (figura 25 y 26), los mapas muestran una distribución moderada de profundidades a lo largo de la cuenca, con rangos de 0 a 1.2 m.

Para el año 2000 las regiones donde se presentan profundidades mayores son en la zona central de la cuenca, principalmente sobre el cauce principal. Por otra parte, en el escenario del año 2020 hay una reducción en las profundidades obtenidas, esto principalmente en las zonas donde las velocidades incrementaron, esto se debe a que como la cubierta vegetal disminuyó, la velocidad aumenta y por lo tanto se reduce el periodo de tiempo en el cual el agua se concentra en las zonas de canales, evitando así el estancamiento y disminuyendo los calados.

Es importante destacar que las variaciones de las profundidades entre los escenarios del año 2000 y 2020 están por el orden de los 10 cm. Estas variaciones en las profundidades y las velocidades del flujo pueden conllevar a efectos de erosión y transporte de sedimentos.

La reducción de las profundidades del agua en conjunto con el incremento a las velocidades de flujo puede acelerar procesos de erosión, contribuyendo a inestabilidad en los canales y cambios morfológicos.

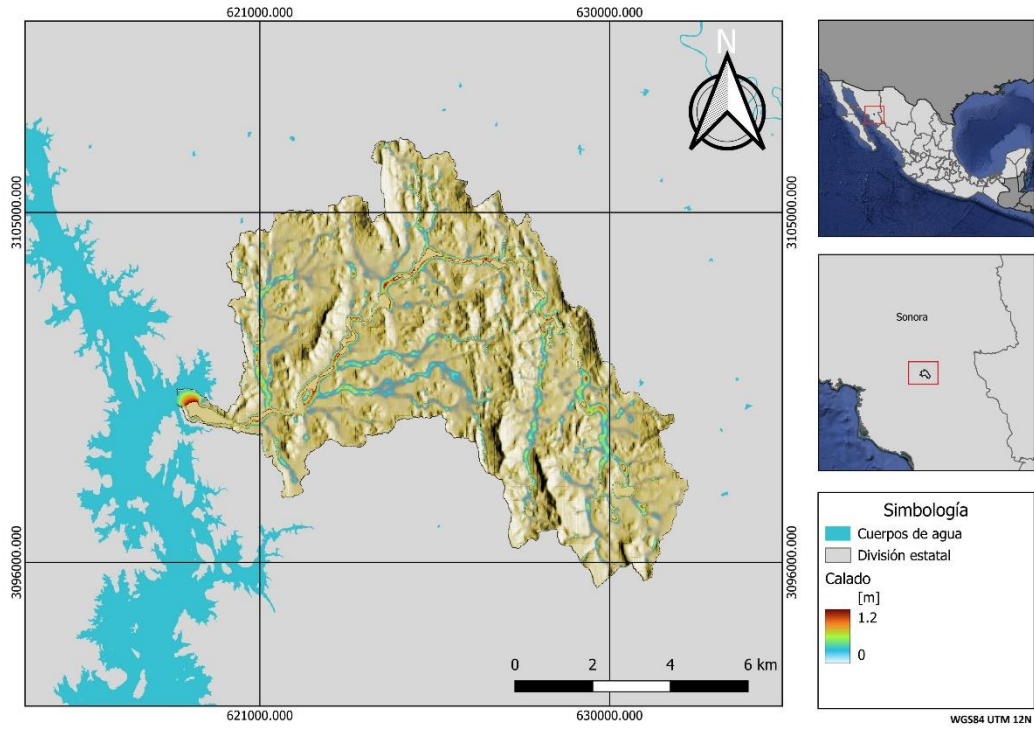


Figura 25. Profundidad de calado para la simulación del año 2000. Elaboración propia.

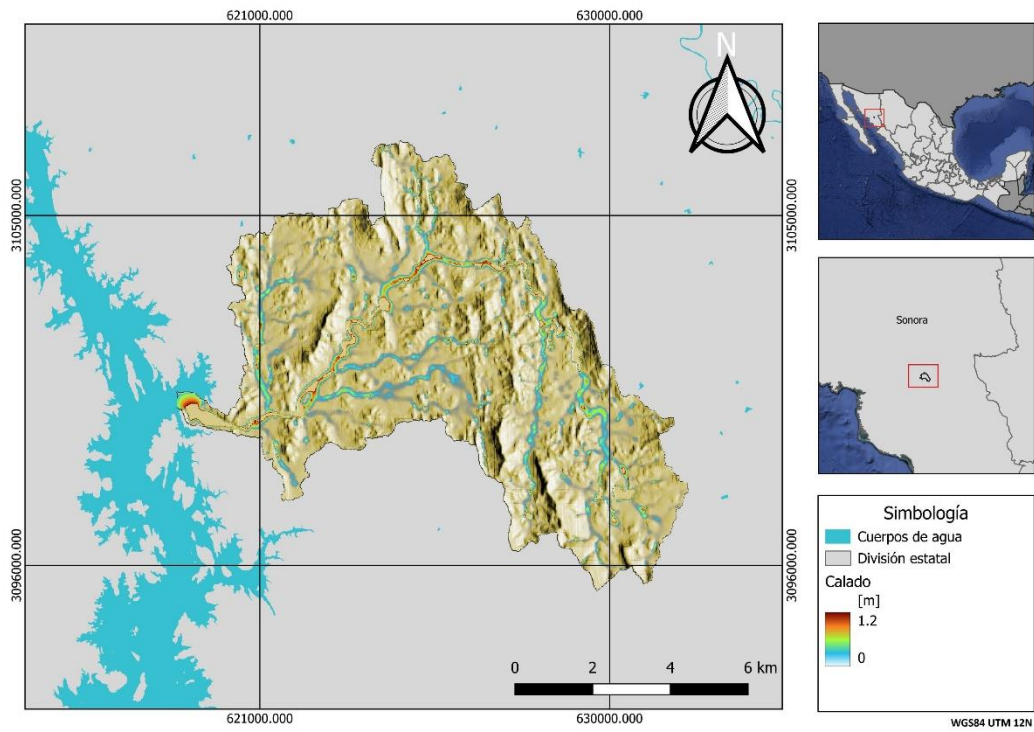


Figura 26. Profundidad de calado para la simulación del año 2020. Elaboración propia.

Las figuras 27 y 28 muestran los resultados de la simulación en el ámbito de erosión. Los mapas pueden parecer muy similares entre escenarios, donde se entienden como valores negativos la deposición de sedimentos.

En el escenario del año 2000 la erosión y la deposición de sedimentos están distribuidos en toda la región de estudio. Los valores de deposición de sedimentos (valores negativos) y de erosión (valores positivos) se encuentran en el orden de -4 m a 4.5 m. Las áreas con mayor erosión corresponden a aquellas zonas con mayor velocidad de flujo. Para el año 2020, el mapa de erosión es muy similar, pero se presentan cambios en la intensidad y distribución. Mientras que la cubierta vegetal contribuya a la deposición de sedimentos hay un incremento de erosión principalmente en zonas con pendientes más pronunciadas. En las bases de las zonas montañosas se pueden observar rastros de sedimentación debido al cambio de velocidad del agua cuando se acerca a zonas de valles.

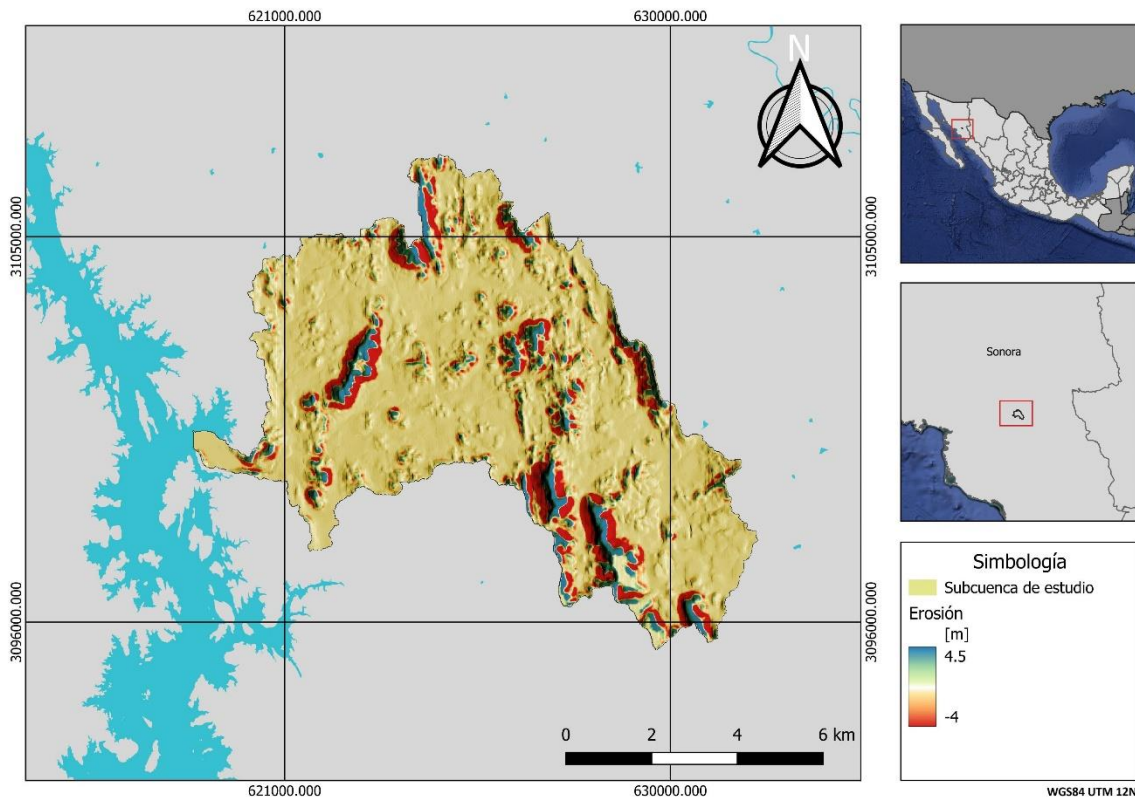


Figura 27. Erosión del suelo para la simulación del año 2000. Elaboración propia.

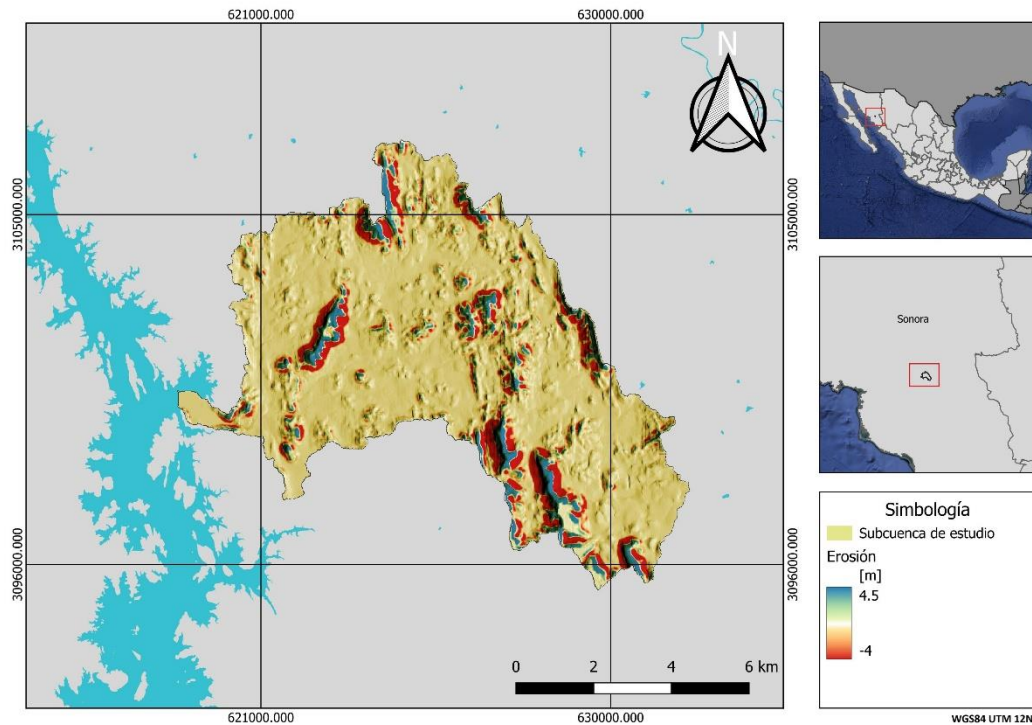


Figura 28. Erosión de suelo para la simulación del año 2020. Elaboración propia.

El mapa de la figura 29 muestra de una mejor manera los cambios de erosión producidos entre ambos escenarios. Por una parte se presentan las diferencias de erosión entre ambos escenarios en un color púrpura, mientras que se traspone el mapa de la figura 16 de los cambios de vegetación a pastizal obtenidos a partir del procesamiento previo de las imágenes satelitales.

Existen cambios de erosión a lo largo de toda la región que coinciden con el uso de suelo, sin embargo, se hace principal énfasis a 3 zonas donde la erosión es más visible.

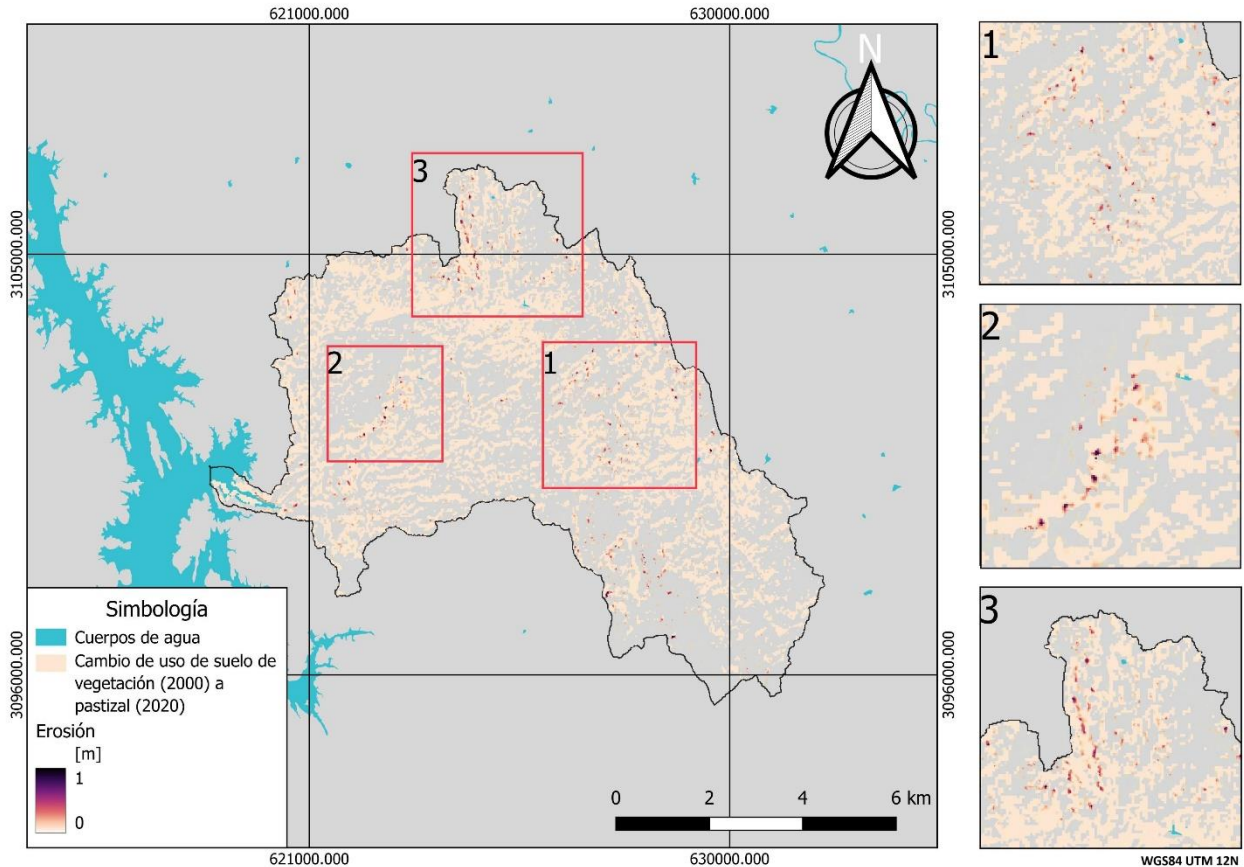


Figura 29. Erosión y cambio del uso de suelo para el periodo de 2000 a 2020. Elaboración propia.

El impacto de la erosión en el ecosistema de la cuenca es considerable. La pérdida de suelo en estas áreas, en conjunto con la pérdida de la cobertura vegetal puede conllevar a que el suelo pierda la capacidad de retener agua y nutrientes, afectando la vegetación y la biodiversidad. La erosión también puede generar sedimentos que serán arrastrados a los cuerpos de agua, como en este caso, a la presa Álvaro Obregón ya que al incrementar el transporte de sedimentos también se aumenta el volumen de sólidos en la presa que reduce la capacidad de esta.

A partir de los obtenido y representado en las figuras 16 y 29, es posible extraer zonas potenciales de erosión. Las áreas presentadas en la figura 30, muestras las zonas donde aún no ha ocurrido erosión por parte del escurrimiento en el periodo de 2000 a 2020, pero que debido a la pérdida de cobertura vegetal en estas dos

décadas y a las condiciones topográficas de la región el riesgo de degradación de suelo es aún mayor.

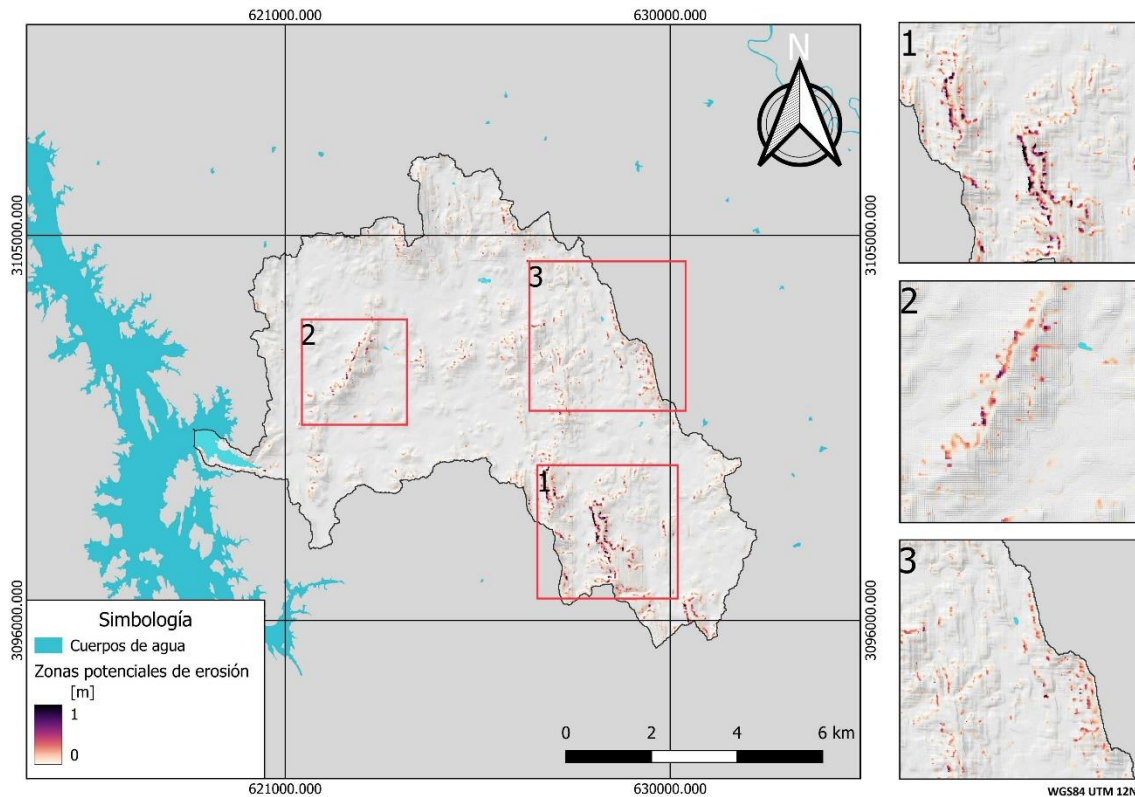


Figura 30. Zonas potenciales de erosión. Elaboración propia.

En la zona 1 se concentran una gran cantidad de zonas potenciales de erosión, pendientes muy pronunciadas. La zona 2 muestra una concentración considerable de zonas potenciales a erosionarse. En la zona 3 debido a la densidad de zonas marcadas, se considera una zona vulnerable. Al ubicarse en zona central, hay riesgo alto de erosión.

IX. Conclusiones y discusión

La metodología empleada en este estudio combina el uso de imágenes satelitales con simulaciones numéricas utilizando el software de IBER. Este estudio ha demostrado una efectividad y precisión en el estudio de la erosión y transporte de sedimentos en una subcuenca, en esta ocasión, una encontrada dentro del río yaqui. El uso de imágenes satelitales de alta resolución obtenidas a partir de Google

Earth con base de datos en los satélites (Landsat y Copernicus), en conjunto con modelo digital de elevaciones y los usos de suelo de la zona permitieron la identificación de zonas que actualmente no presentan erosión pero pueden presentar un riesgo potencial en el futuro con base al cambio de vegetación ocurrido en el periodo de estudio y la morfología de la zona.

Este estudio ofrece diversas ventajas sobre las metodologías tradicionales, entre ellas que la naturaleza de la base de datos necesaria para el estudio y las simulaciones es relativamente fácil de obtener a partir de información bibliográfica y banco de datos digitales fácilmente procesados con sistemas de información geográfica. Si bien la obtención de la información es de fácil acceso, se puede presentar el caso en el que los datos bibliográficos no sean del todo precisos y se limita a la necesidad de obtención de datos de campo. Sin embargo, la metodología se puede aplicar a regiones que necesiten una evaluación de zonas potenciales de erosión donde ha habido un cambio en el uso de suelo.

Es necesario tener en cuenta que el suelo requiere de cientos de años para su formación, por lo tanto se tiene la necesidad de atenuar y controlar la erosión de este. Si bien hay situaciones donde los daños son irreversibles hay muchas otras donde el daño puede ser rehabilitado. Dependiendo las características de la erosión se puede optar por remediación ya sea del tipo de: Conservación de suelos y reforestación, control del escurrimiento superficial no concentrado y manejo de los escurrimientos concentrados (Gracia, 1996).

X. Bibliografía

- Almohamad H (2020) Impact of Land Cover Change Due to Armed Conflicts on Soil Erosion in the Basin of the Northern Al-Kabeer River in Syria Using the RUSLE Model. *Water* 12(12):3323. <https://doi.org/10.3390/w12123323>.
- Bladé E, Cea L, Corestein G, Escolano E, Puertas J, Vázquez-Cendón J, Dolz J, Coll A (2014) IBER: Herramienta de simulación numérica de flujo en ríos. *Rev. Int. Métodos Numer para Cálculo y Diseño en Ingeniería* 30:1–10.
- Boix-Fayos C, Martínez-Mena M, Arnau-Rosalén E, Calvo-Cases A, Castillo V, Albaladejo J (2006) Measuring soil erosion by field plots: Understanding the sources of variation. *Earth-Science Reviews* 78(3–4):267-285. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.05.005>.
- Chen H, Zhang X, Abla M, Lü D, Yan R, Ren Q, Ren Z, Yang Y, Zhao W, Lin P, Liu B, Yang X (2018) Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China. *CATENA*. 170:141-149, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.006>.
- Comisión Nacional de Zonas Áridas – Secretaría de Desarrollo Social (1994) Plan de acción para combatir la desertificación en México, Saltillo, Coahuila, México.
- CONABIO (2024) Portal de geoinformación Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB). <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>.
- CONAGUA (2024) Información estadística climatológica. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Cruz Medina, Isidro Roberto, & García Páez, Fernando (2008) Modelación de los escurrimientos del río Yaqui. *Terra Latinoamericana*, 26(2), 145-152. Recuperado en 09 de noviembre de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792008000200007&lng=es&tlng=es.
- Erosión en ríos (1996) [Comisión Nacional del Agua]. En Manual de ingeniería de ríos (1ra ed.). Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Fang NF, Wang L, Shi ZH (2017) Runoff and soil erosion of field plots in a subtropical mountainous region of China. *Journal of Hydrology*. 552:387-395. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.048>.
- Google Earth (2000; 2020) Landsat/Copernicus Satellites. Yaqui River Sub-Basin (Mexico). [Satellites images]. Google Earth. <https://www.googleearth.com>.

- Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (2012) Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual de referencia hidráulico.
- Guerra CA, Rosa IMD, Valentini E, Wolf F, Filipponi F, Karger DN, Xuan AN, Mathieu J, Lavelle P, Eisenhauer N (2020) Global vulnerability of soil ecosystems to erosion. *Landsc Ecol.* 35:823-842. doi: 10.1007/s10980-020-00984-z.
- Hermassi T, Kotti ML, Jarray F (2023) Soil Erosion in a Changing Environment over 40 Years in the Merguellil Catchment Area of Central Tunisia. *Applied Sciences.* 13(21):11641. <https://doi.org/10.3390/app132111641>.
- Hsieh YP, Grant KT, Bugna GC (2009) A field method for soil erosion measurements in agricultural and natural lands, *Journal of Soil and Water Conservation.* 64(6):374-382. DOI: 10.2489/jswc.64.6.374.
- Iber (2012) Manual de referencia hidráulico: Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Ministerio de Medio Ambiente y Medio rural y Marino. Gobierno de España.
- INEGI (2013) Continuo de Elevaciones Mexicano. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI (2014) Subcuenca hidrológicas de México. <https://idegeo.centrogeo.org.mx/layers/geonode%3Aredsubciigw#more>
- INEGI (2018) Climatología. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/#mapas>
- INEGI (2018) Uso de suelo y vegetación. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#mapas>
- Información Agroalimentaria y Pesquera (2022) Algunos datos que debemos conocer sobre la desertificación y sequía. gob.mx. <https://www.gob.mx/siap/articulos/algunos-datos-que-debemos-conocer-sobre-la-desertificacion-y-sequia#:~:text=En%20nuestro%20pa%C3%ADs%20la%20situaci%C3%B3n,total%20vive%20en%20zonas%20%C3%A1ridas.>
- Issaka S, Ashraf MA (2017) Impact of soil erosion and degradation on water quality: a review. *Geology, Ecology, and Landscapes.* 1(1):1–11. <https://doi.org/10.1080/24749508.2017.1301053>.
- J. Gracia Sánchez, & JA Maza Álvarez (1996) Manual de Ingeniería de Ríos (capítulo 17-18).

- López Reyes M (2001) Degradación de suelos en Sonora: el problema de la erosión en los suelos de uso ganadero. *Región y sociedad* 13(22):73-97.
- Ortiz-Solorio, M.L., y J.W. Estrada Berg Wolf. Evaluación y cartografía de la erosión eólica en la República Mexicana. Serie de Cuadernos de Edafología. Colegio de Postgraduados. México. 1993.
- Mahmoudzadeh A (2007) Vegetation cover plays the most important role in soil erosion control. *Pak J Biol Sci.* 10(3):388-92. doi: 10.3923/pjbs.2007.388.392.
- Manifestación de impacto ambiental, modalidad particular para el proyecto: Dragado de rehabilitación de la bahía lobos, San Ignacio Río Muerto, Sonora (2009) En semarnat.gob.mx. SAGARPA. Recuperado 8 de diciembre de 2023, de <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/son/estudios/2009/26SO2009H0011.pdf>
- Misra RK, Teixeira PC (2001) The sensitivity of erosion and erodibility of forest soils to structure and strength. *Soil and Tillage Research.* 59(1–2): 81-93, [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00155-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00155-6).
- Mitasova H, Barton M, Ullah I, Hofierka J, Harmon RS (2013) 3.9 GIS-Based Soil Erosion Modeling, Editor(s): John F. Shroder, *Treatise on Geomorphology*, Academic Press, Pages 228-258, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00052-X>.
- Novara A, Pisciotta A, Minacapilli M, Maltese A, Capodici F, Cerdà A, Gristina L (2018) The impact of soil erosion on soil fertility and vine vigor. A multidisciplinary approach based on field, laboratory and remote sensing approaches. *Science of The Total Environment.* 622–623:474-480, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.272>.
- Nunes MR, da Silva AP, Denardin JE, Giarola NFB, Vaz CMP, van Es HM, da Silva AR (2017) Soil chemical management drives structural degradation of Oxisols under a no-till cropping system. *Soil Research.* 55:819-831.
- Panagos P, Matthews F, Patault E, De Michele C, Quaranta E, Bezak N, Kaffas K, Patro ER, Auel C, Schleiss AJ, Fendrich A, Liakos L, Van Eynde E, Vieira D, Borrelli P (2024) Understanding the cost of soil erosion: An assessment of the sediment removal costs from the reservoirs of the European Union. *Journal of Cleaner Production.* 434:140183. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140183>.
- Pimentel D (2001) Soil Erosion and the Threat to Food Security and the Environment. *Ecosystem Health.* 6:221 - 226. 10.1046/j.1526-0992.2000.006004221.x.

- Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía. Cuenca del Río Yaqui-Mátape. (2013). En Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE). Comisión Nacional del Agua. Recuperado 1 de octubre de 2024, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/99957/PMPMS_CC_R_o_Yaqui-Matap_.pdf
- Renard K, Foster G, Weesies G, McCool D, Yoder D (1997) Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural Handbook*. 703. <http://doi.org/DC0-16-048938-565-100>, 1997.
- Roxo MJ, Cerqueira HM, Calvo-Cases A (2023) The role of land use and land cover changes in triggering soil losses in the SE Alentejo, Portugal. *Land Degradation & Development*. 34(18):1-15.
- SCT (2024) Isoyetas de Intensidad – Duración – Periodo de Retorno para la República Mexicana. <https://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/isoyetas/>.
- SEMARNAT (2008) Informe de la situación del medio ambiente en México https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_2008/index_informe_2008.html
- Servicio geológico mexicano. (2015). Litología. <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/#>
- Smith P, House JI, Bustamante MMC, Sobocká J, Harper R, Pan G, et al (2015) Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology*. 22(3):1008-1028. <https://doi.org/10.1111/gcb.13068>.
- Steinhoff-Knopp B, Kuhn TK, Burkhard B (2021) The impact of soil erosion on soil-related ecosystem services: development and testing a scenario-based assessment approach. *Environ Monit Assess*. 14;193(Suppl 1):274. doi: 10.1007/s10661-020-08814-0.
- Sun T, Deng L, Fei K, Fan X, Zhang L, Ni L, Sun R (2021) Runoff Characteristics and Soil Loss Mechanism in the Weathered Granite Area under Simulated Rainfall. *Water*. 13(23):3453. <https://doi.org/10.3390/w13233453>
- Wang J, Qinghua G, Yan Y (2021) Assessing the Influence of Environmental Factors on Spatial Soil Erosion Risk based on the Certainty Coefficient Method. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response* 8(3).

- Wen L, Peng Y, Zhou Y et al (2023) Study on soil erosion and its driving factors from the perspective of landscape in Xiushui watershed, China. *Sci Rep* 13:8182. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35451-7>.
- Wirtz S, Seeger M, Ries JB (2012) Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *CATENA* 91:21-34. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.12.002>.
- Wischmeier, W. H., and D. D. Smith (1978) Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. USDA. SEA. Agriculture Handbook 537. Washington, D.C. 58 p.
- Xiong M, Leng G, Tang Q (2023) Global Analysis of the Cover-Management Factor for Soil Erosion Modeling. *Remote Sensing* 15(11):2868. <https://doi.org/10.3390/rs15112868>.
- Xu H, Hu X, Guan H, Zhang B, Wang M, Chen S, Chen M (2019) A Remote Sensing Based Method to Detect Soil Erosion in Forests. *Remote Sensing*; 11(5):513. <https://doi.org/10.3390/rs11050513>.