

Modelización hidrológica de flujos naturalizados y regulados en la cuenca Lerma- Santiago

Resumen técnico del panel de control de flujo ambiental
Instituto Internacional de Gestión del Agua (IWMI)

Septiembre de 2026

Tabla de contenido

1. Propósito y alcance	3
2. Descripción general de la cadena de modelado.....	3
3. Modelo de balance hídrico y calibración	3
4. Tratamiento y análisis de datos hidrométricos	5
4.1 Datos de pluviómetros	5
4.2 Datos de descarga	5
4.3 Corrección de sesgo de descarga simulada.....	5
5. Enrutamiento, regulación y uso de los ríos en la evaluación del caudal ecológico.	6
6. Cursos de agua sujetos a restricciones legales vigentes.....	6
7. Limitaciones	7
Referencias	8

Lista de tablas

Tabla 1. Principales conjuntos de datos utilizados en el modelado hidrológico	4
Tabla 2. Instrumentos legales que restringen el uso de aguas superficiales en la cuenca Lerma-Santiago	7

1. Propósito y alcance

Esta nota resume el modelo hidrológico que sustenta el panel de control de caudales ambientales (e-flow) para la cuenca Lerma-Santiago. Describe el marco de balance hídrico y enrutamiento fluvial, el tratamiento y análisis de los datos hidrométricos utilizados para restringir las simulaciones, la forma en que se utilizan los dos productos de descarga (naturalizada y regulada) en la evaluación del e-flow, y los cursos de agua de la cuenca que actualmente están sujetos a restricciones legales sobre el uso de aguas superficiales. Una nota complementaria describe el forzamiento climático utilizado para los escenarios futuros que se muestran en el panel de control. Este documento pretende ser una referencia metodológica concisa para los usuarios del panel de control; los detalles técnicos completos se proporcionan en los informes y manuscritos del proyecto subyacente.

2. Descripción general de la cadena de modelado

El caudal en la cuenca (aproximadamente 132,000 km²) se simula mediante una cadena de tres componentes. Primero, el modelo agrohidrológico VegET v2.0 (Senay et al., 2023) calcula el balance hídrico diario de la superficie terrestre en cuadrícula, generando la evapotranspiración real, la humedad del suelo, la escorrentía superficial y el drenaje profundo con una resolución aproximada de 250 m para el período 1992-2024. Segundo, la escorrentía en cuadrícula se enruta a través de la red fluvial con mizuRoute (Mizukami et al., 2016) para obtener el caudal naturalizado, es decir, el régimen de flujo que se produciría en ausencia de embalses. Tercero, la misma escorrentía se enruta con mizuRoute -Lake, que representa explícitamente los principales embalses y lagos de la cuenca, para obtener un producto de caudal regulado. Este producto regulado se corrige posteriormente mediante observaciones de estaciones de aforo (Sección 4.3). El producto naturalizado proporciona la referencia hidrológica a partir de la cual se derivan los objetivos de caudal ambiental, mientras que el producto regulado corregido y las observaciones de los pluviómetros se utilizan para evaluar el cumplimiento de dichos objetivos.

3. Modelo de balance hídrico y calibración

VegET es un modelo unidimensional de balance hídrico de la zona radicular impulsado por la precipitación diaria, la evapotranspiración de referencia de pastos (ETo) y una climatología del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) que representa la fenología de la superficie terrestre. La precipitación efectiva se obtiene después de restar la interceptación del dosel, la evapotranspiración se calcula a partir de un coeficiente de paisaje basado en NDVI limitado por una función de estrés hídrico del suelo, y el agua del suelo que excede la capacidad de retención de agua genera escorrentía, que se divide en escorrentía superficial y drenaje profundo. Las propiedades del agua del suelo (punto de marchitez, capacidad de campo y saturación sobre 0–100 cm) se derivaron de SoilGrids 2.0 (Poggio et al., 2021) a través de las funciones de pedotransferencia de Saxton y Rawls (2006) , con un tratamiento específico de los Andosoles de alta retención del Cinturón Volcánico Transmexicano. Las fracciones de interceptación del dosel se asignaron según la clase de cobertura del suelo utilizando la clasificación MODIS MCD12Q1 y valores de clase basados en la bibliografía.

Debido a que ningún producto climático en cuadrícula es confiable sobre el complejo orográfico del Cinturón Volcánico Transmexicano, cuatro productos de precipitación diaria (CHIRPS v2.0, CHIRPS v3.0, MSWEP

v2.8 y ERA5) fueron corregidos de sesgo cada uno con respecto a la red nacional de pluviómetros de calidad controlada (Sección 4.1) y se utilizaron para forzar la cadena completa VegET – mizuRoute , y dos productos de evapotranspiración de referencia (la ET de referencia global NOAA/USGS y la evaporación potencial GLEAM v4) fueron evaluados de la misma manera. CHIRPS v2.0 y la ET de referencia NOAA se conservaron para la configuración final: CHIRPS v2.0 mostró la mejor concordancia con la precipitación medida después de la corrección y la descarga enrutada más consistente, y el producto NOAA es una ET de referencia de pasto consistente con la formulación del coeficiente de cultivo de VegET .

Los parámetros del modelo se calibraron con respecto a puntos de referencia de balance hídrico de la cuenca independientes, basados en la literatura, en lugar de con respecto a la descarga observada, porque los flujos observados en esta cuenca altamente gestionada están entre un 30 y un 60 % por debajo de la generación de escorrentía natural debido a las derivaciones para riego, la extracción de agua subterránea de aproximadamente 1000 Mm³ año⁻¹ de sobreexplotación y retención en embalses (Wester et al., 2009). Los puntos de referencia fueron la escorrentía total naturalizada de 90–130 mm año⁻¹ (coeficiente de escorrentía 0,12–0,16), el drenaje profundo de 45–72 mm año⁻¹ consistente con las estimaciones de recarga administrativas y basadas en isótopos, y la evapotranspiración real limitada por productos de teledetección de balance energético (SSEBop , WaPOR , GLEAM) y por el cierre de tipo Budyko . Los principales conjuntos de datos de entrada se enumeran en la Tabla 1.

Tabla 1 Principales conjuntos de datos utilizados en la modelización hidrológica .

Conjunto de datos	Variable / uso	Resolución	Período	Fuente
CHIRPS v2.0 (corrección de sesgo)	Precipitación diaria forzante	0.05°	1992–2024	Funk et al. (2015); medidores SMN
ET de referencia NOAA/USGS	ETo de referencia diaria para pastos (FAO-56)	0.125°	1992–2024	Hobbins y otros (2023)
Climatología NDVI de MODIS	Fenología de la superficie terrestre (Kcp)	250 m–1 km	2003–2017	Didan (2015)
SoilGrids 2.0 + funciones de pedotransferencia	Propiedades hídricas del suelo (WP, FC, SAT)	250 metros	Estático	Poggio et al. (2021); Saxton y Rawls (2006)
MODIS MCD12Q1	Cobertura del suelo para fracciones de intercepción	500 metros	2020	Friedl y Sulla- Menashe (2019)
Red fluvial MERIT Hydro	Topología de enrutamiento y geometría de alcance	≈90 m derivados	Estático	Yamazaki y otros (2019)
HydroLAKES / GRAND	Geometría y almacenamiento de lagos y embalses	Vector	Estático	Messenger y cols. (2016); Lehner y cols. (2011)
CONAGUA BANDAS	Descarga diaria/mensual observada	Estación	1992–2024	CONAGUA (SINA/BANDAS)
Red climatológica SMN	Precipitación diaria observada (corrección de sesgo)	Estación	1994–2024	SMN/CONAGUA (CLICOM)

4. Tratamiento y análisis de datos hidrométricos

4.1 Datos de pluviómetros

los registros diarios de precipitación de la red climatológica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para verificar su duración, exhaustividad y consistencia interna durante el período 1994-2024; 315 estaciones superaron el control de calidad y fueron seleccionadas. Estas estaciones se utilizaron para corregir el sesgo de cada producto de precipitación candidato con factores de corrección mensuales, anclados a cada estación e interpolados en toda la cuenca, de manera que la forzante en cuadrícula reproduzca la precipitación media observada en la cuenca, de aproximadamente 750-770 mm año⁻¹, y su marcada estacionalidad monzónica (más del 80 % de la precipitación anual entre junio y septiembre).

4.2 Datos de descarga

El caudal observado se obtuvo del banco nacional de datos de aguas superficiales (BANDAS) de CONAGUA, que sustenta las capas hidrométricas del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). Las estaciones se sometieron a un control de calidad en varias etapas: eliminación de valores físicamente inverosímiles y segmentos planos, verificación de la coherencia del área de drenaje entre los metadatos de la estación y la red de enrutamiento, correspondencia de cada estación con un tramo del modelo y selección de la longitud mínima del registro y la completitud dentro del período de simulación 1992-2024. Setenta y seis estaciones cumplieron con todos los criterios y se conservaron como estaciones de referencia para la corrección del sesgo; se excluyeron las estaciones dominadas por canales de derivación o ubicadas inmediatamente aguas abajo de las estructuras de captación. Cabe destacar que las observaciones conservadas describen el régimen de flujo regulado posterior a la extracción, no la escorrentía natural.

4.3 Corrección de sesgo de descarga simulada

Se estimaron factores de corrección multiplicativos mensuales en cada estación de aforo de referencia comparando el caudal regulado simulado con las observaciones, y se transfirieron a tramos sin aforo a lo largo de la ruta de flujo, con una corrección regionalizada (se compararon estimadores de distancia inversa y de bosque aleatorio) que cubrió el resto de la red. Las correcciones se limitaron a rangos plausibles y se fijaron un tope para que el caudal regulado corregido no exceda el caudal naturalizado simulado. En las estaciones de aforo de referencia, el producto regulado corregido alcanza una eficiencia Kling-Gupta (KGE) mediana de 0.57, una eficiencia Nash-Sutcliffe mediana de 0.48 y un sesgo porcentual absoluto mediano del 8.6 %, con 74 de 76 estaciones de aforo que alcanzan una KGE positiva, en comparación con una KGE mediana de -0.62 antes de la corrección. La validación cruzada de exclusión de un medidor de la corrección regionalizada arroja una KGE mediana de -0.14, por lo que la habilidad en los tramos no aforados es notablemente más débil que en los tramos aforados, y ambas cifras se informan en la documentación del panel de control para mayor transparencia.

La corrección del sesgo se aplica únicamente al producto regulado. La simulación naturalizada se deja deliberadamente sin corregir: dado que las observaciones de los pluviómetros están reguladas, una corrección estadística del producto naturalizado con respecto a ellas transferiría las descargas de los embalses, los flujos de retorno y la atenuación máxima al régimen de referencia y sesgaría los objetivos de caudal ambiental

resultantes precisamente en los tramos donde la regulación es más intensa. La credibilidad del producto naturalizado se basa, en cambio, en la corrección del sesgo de precipitación basada en estaciones y en la calibración del balance hídrico con restricciones de referencia (Sección 3).

5. Enrutamiento, regulación y uso de los ríos en la evaluación del caudal ecológico.

La descarga naturalizada se enrutó con el esquema de seguimiento de ondas cinemáticas de mizuRoute en la red fluvial derivada de MERIT, con canalización aplicada por encima de un umbral de área de drenaje de 25 km²; los parámetros de enrutamiento (coeficiente de Manning 0,07, factor de escala de ancho de canal 0,002) se adoptaron de un análisis de sensibilidad continental previo y se verificaron a escala de cuenca. En la configuración regulada, se representaron 58 cuerpos de agua, incluyendo el lago Chapala y los principales embalses hidroeléctricos y de riego del sistema (Aguamilpa , El Cajón, La Yesca y Santa Rosa en el Santiago; Solís y Tepuxtepec en el Lerma); 55 se simularon con una parametrización de liberación no lineal dependiente del almacenamiento (Döll et al., 2003) y tres lagos endorreicos se trataron como sumideros terminales, con el balance hídrico del lago cerrado utilizando la precipitación corregida por sesgo y la evaporación simulada de aguas abiertas. El esquema de enrutamiento de función de respuesta al impulso se utilizó para esta configuración para la estabilidad numérica en las uniones de tramos de lago. La extracción de agua subterránea, las transferencias entre cuencas (en particular, los acueductos de Cutzamala y Lerma hacia el área metropolitana de la Ciudad de México) y las derivaciones para riego no se representan explícitamente; su efecto agregado sobre el caudal del río se captura estadísticamente mediante la corrección de sesgo del producto regulado.

En la evaluación del caudal ambiental, los objetivos de caudal ecológico se derivan del caudal naturalizado mensual según el enfoque de frecuencia de ocurrencia de la norma mexicana de caudal ambiental (NMX-AA-159-SCFI-2012; Secretaría de Economía, 2012), y el cumplimiento se evalúa comparando dichos objetivos con el caudal regulado corregido o, cuando esté disponible, directamente con las observaciones de los pluviómetros. El panel de control muestra ambos productos: los objetivos y la clasificación de cumplimiento resultante a escala de tramo.

6. Cursos de agua sujetos a restricciones legales vigentes

Todos los principales cursos de agua de la cuenca están sujetos actualmente a restricciones federales sobre la apropiación de nuevas aguas superficiales, establecidas por decreto presidencial y publicadas en el Diario Oficial de la Federación (DOF). La Tabla 2 resume los instrumentos vigentes. En la subregión Lerma-Chapala, el decreto del 8 de abril de 2014 suprimió las vedas parciales preexistentes y estableció una veda única (prohibición de nuevas concesiones) que abarca las aguas superficiales de las 19 cuencas hidrográficas de la subregión, con la asignación de agua regida por las reglas de distribución acordadas en el marco del consejo de cuenca. En la subregión del Río Santiago, el decreto del 6 de junio de 2018 —uno de los diez decretos de reserva de agua firmados el 5 de junio de 2018— suprimió los vedas históricos en las 30 cuencas hidrográficas de la subregión y los reemplazó con reservas de agua para uso doméstico y público-urbano y para uso ambiental o conservación ecológica, asegurando así volúmenes de flujo ambiental en el cauce principal del Santiago y sus afluentes (Ríos Verde, Juchipila , Bolaños y Huaynamota , entre otros). El agua subterránea en la cuenca está sujeta además a decretos veda de larga data sobre los acuíferos principales (emitidos progresivamente desde finales de la década de 1940 en Guanajuato, Querétaro, Michoacán, Jalisco y el Estado de México), y

la disponibilidad media anual publicada es negativa para muchos de ellos. La disponibilidad media anual oficial de agua superficial por cuenca se calcula y actualiza bajo NOM-011-CONAGUA-2015 y se publica en el DOF; los volúmenes de concesión se registran en el Registro Público de Derechos de Agua (REPD). Estas son las fuentes autorizadas para el estado de restricción que se muestra o al que hace referencia el panel de control.

Tabla 2 Instrumentos legales que restringen el uso de aguas superficiales en la cuenca Lerma-Santiago .

Instrumento (fecha de DOF)	Cobertura	Efecto
Decreto de 8 de abril de 2014	Las 19 cuencas hidrológicas de la subregión Lerma-Chapala (cuencas principales del Río Lerma, La Gavia, Jaltepec , La Laja, Querétaro, Yuriria, Turbio , Angulo, Zula, entre otras)	los vedas anteriores y establece un veda de aguas superficiales en toda la subregión: no se otorgan nuevas concesiones; la asignación se rige por las reglas de distribución subregionales; la disponibilidad se rige por los acuerdos del DOF.
Decreto de 6 de junio de 2018	Las 30 cuencas hidrológicas de la subregión del Río Santiago (Santiago 1–6, Verde, Juchipila , Bolaños, Huaynamota y cuencas de embalses asociados)	los vedas históricos y establece reservas para uso doméstico, público-urbano y ambiental / conservación ecológica, asegurando volúmenes de flujo ambiental.
védicos sobre aguas subterráneas (1948–1987, varios)	Principales acuíferos de las zonas del Bajío, Toluca, Querétaro, Morelia y Jalisco	Prohibir o restringir el desarrollo de nuevas aguas subterráneas; disponibilidad actual publicada por acuífero en el DOF
NOM-011-CONAGUA-2015	Todas las cuencas y acuíferos	Método estándar para calcular la disponibilidad media anual de agua; los valores publicados determinan si se pueden emitir nuevos títulos.

7. Limitaciones

Las simulaciones no representan el intercambio de agua subterránea y superficial, la extracción explícita para riego ni las transferencias entre cuencas, y la operación del embalse se basa en un comportamiento genérico de almacenamiento y liberación , en lugar de reglas operativas específicas del sitio, las cuales se están recopilando con CONAGUA. La precisión en tramos sin aforo es sustancialmente menor que en tramos aforados, y los caudales bajos durante la estación seca presentan la mayor incertidumbre relativa. Los usuarios deben tratar con precaución los volúmenes absolutos a escala de tramo en afluentes sin aforo y basarse en la clasificación de cumplimiento, que es más robusta frente a sesgos residuales, para su interpretación.

Referencias

- CONAGUA. (2015). Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua — Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Diario Oficial de la Federación, 27 de marzo de 2015.
- Didan, K. (2015). MOD13A2 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1 km SIN Grid V006 [Conjunto de datos]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A2.006>
- Döll, P., Kaspar, F., & Lehner, B. (2003). Un modelo hidrológico global para la obtención de indicadores de disponibilidad de agua: Ajuste y validación del modelo. *Journal of Hydrology*, 270(1–2), 105–134. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00283-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00283-4)
- Friedl, M., & Sulla-Menasse, D. (2019). MCD12Q1 MODIS/ Terra+Aqua Tipo de cobertura terrestre anual L3 Global 500 m SIN Grid V006 [Conjunto de datos]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations — A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. (2014, 8 de abril). Decreto por el que por causas de interés público se suprimen las vedas existentes en la subregión hidrológica Lerma–Chapala y se establece zona de veda en las 19 cuencas hidrológicas que comprende dicha subregión. Diario Oficial de la Federación.
- Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. (2018, 6 de junio). Decreto por el que se suprimen las vedas existentes en las cuencas hidrológicas que integran la Subregión Hidrológica Río Santiago, de la Región Hidrológica número 12 Lerma–Santiago, y se establecen zonas de reserva de aguas nacionales superficiales para los usos doméstico, público urbano y ambiental o conservación ecológica. Diario Oficial de la Federación.
- Hobbins, M., Harrison, L., Blakeley, S., et al. (2023). A global reference evapotranspiration dataset for supporting drought monitoring and hydrologic modeling. *Scientific Data*, 10, 703. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02648-4>
- Lehner, B., Liermann, CR, Revenga, C., et al. (2011). Cartografía de alta resolución de los embalses y represas del mundo para la gestión sostenible del caudal de los ríos. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(9), 494–502. <https://doi.org/10.1890/100125>
- Messenger, ML, Lehner, B., Grill, G., Nedeva, I., & Schmitt, O. (2016). Estimación del volumen y la edad del agua almacenada en lagos globales mediante un enfoque geoestadístico. *Nature Communications*, 7, 13603. <https://doi.org/10.1038/ncomms13603>
- Mizukami, N., Clark, MP, Sampson, K., Nijssen, B., Mao, Y., McMillan, H., Viger, RJ, Markstrom, SL, Hay, LE, Woods, R., Arnold, JR y Brekke, LD (2016). mizuRoute versión 1: Una herramienta de enrutamiento de redes fluviales para aplicaciones de recursos hídricos en un dominio continental. *Geoscientific Model Development*, 9(6), 2223–2238. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2223-2016>
- Poggio, L., de Sousa, LM, Batjes, NH, Heuvelink, GBM, Kempen, B., Ribeiro, E., & Rossiter, D. (2021). SoilGrids 2.0: Generación de información del suelo a nivel mundial con incertidumbre espacial cuantificada. *SOIL*, 7(1), 217–240. <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
- Saxton, KE y Rawls, WJ (2006). Estimación de las características del agua del suelo según la textura y la materia orgánica para soluciones hidrológicas. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Secretaría de Economía. (2012). NMX-AA-159-SCFI- 2012: Que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrográficas. Diario Oficial de la Federación.

- Senay, GB, Kagone, S., Parrish, GEL, Khand, K., Boiko, O., y Velpuri, NM (2023). Mejoras y evaluación del modelo agrohidrológico VegET para el análisis del balance hídrico en grandes áreas y el monitoreo de la sequía. *Hydrology*, 10(8), 168. <http://doi.org/10.3390/hydrology10080168>
- Wester, P., Mollard, E., Silva-Ochoa, P., & Vargas-Velázquez, S. (2009). De medio lleno a medio vacío: La misión hidráulica y la sobreexplotación del agua en la cuenca Lerma-Chapala, México. En F. Molle & P. Wester (Eds.), *Trayectorias de cuencas fluviales: Sociedades, entornos y desarrollo* (pp. 75–98). CABI.
- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Sosa, J., Bates, PD, Allen, GH y Pavelsky, TM (2019). MERIT Hydro: Un mapa hidrográfico global de alta resolución basado en el conjunto de datos topográficos más reciente. *Water Resources Research*, 55(6), 5053–5073. <https://doi.org/10.1029/2019WR024873>