



MODELACIÓN HIDROLÓGICA SUPERFICIAL EN CUENCAS CON POCA INFORMACIÓN. CASO: CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO

José Guadalupe García Contreras ¹, Jesús Pardo Loaiza ², Sonia Tatiana Sánchez Quispe ³

^{1,2,3} Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México
¹1422559c@umich.mx, ²jesus.pardo@umich.mx, ³quispe@umich.mx

RESUMEN

El desarrollo de Modelos Precipitación-Escorrentamiento (MPE) permite evaluar y gestionar los recursos hídricos superficiales de una zona o para generar información e incorporarla a otros modelos de simulación. Estos modelos suelen ser agregados, distribuidos o semidistribuidos, esto en función del objetivo del estudio, tamaño de la cuenca o de la disponibilidad de información. Sin embargo, para el caso de modelos semidistribuidos existen zonas de gran superficie donde la información es insuficiente para su desarrollo y la obtención de resultados de calidad. Para el caso de información climatológica existen diversos métodos estadísticos para el tratamiento y llenado de datos faltantes, en cambio para la información hidrométrica, esto no es posible. Por lo que se recurre a la implementación de métodos estadísticos multivariantes ante la falta de dicha información, realizando conglomerados jerárquicos entre subcuencas con características similares que contienen información hidrométrica y con aquellas que no la tienen. Esto se logra a través de un análisis de componentes principales de las variables que conformarán una matriz informativa que generará dichos conglomerados y que finalmente se corrobora con un análisis discriminante para verificar la correcta agrupación de las subcuencas y de esta manera evaluar los recursos hídricos de una cuenca.

Palabras clave

Métodos multivariantes, Modelo Precipitación-Escorrentamiento, EvalHID

1. INTRODUCCIÓN

Los Modelos Precipitación-Escorrentamiento (MPE) son de gran apoyo para la evaluación de los recursos hídricos superficiales ya que representan un ahorro de recursos tanto de trabajo como económicos para su realización. Sin embargo, en zonas con insuficiente información, se presentan limitaciones que vuelven lento el desarrollo de estos, específicamente en el tratamiento de la información para alimentar los modelos, para su calibración y validación.

En México actualmente existe una deficiencia en cuanto a información climatológica e hidrométrica lo que obliga a seguir metodologías de tratamiento y validación de series temporales de precipitación y caudales para garantizar que estas sean fiables, o en su defecto permitir que estas sean descartadas sino cumplen con las características mínimas para que los resultados sean válidos [1]. El correcto tratamiento de los datos de entrada para los diferentes tipos de MPE permite que los resultados obtenidos sean de calidad y permitan una adecuada gestión ya que no se puede gestionar un recurso cuya cantidad no se conoce.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

El gestionar correctamente el recurso hídrico superficial en México, es pieza clave para afrontar problemas de sequías o sobreexplotación dado que a nivel nacional existe una presión moderada sobre el recurso hídrico. En las regiones del centro y norte del país, existe una presión media fuerte a fuerte en el recurso, mientras que en las del sur y sureste la presión es escasa [2]. Sin embargo, si se tiene escasas de información para obtener la cantidad de recurso hídrico disponible y no se fundamentan los resultados obtenidos de un modelo, se puede caer en el error de sobreestimar o subestimar dicho recurso y generar medidas de gestión que no son apropiadas para un Sistema de Recursos Hídricos (SRH) en específico.

El SRH de la cuenca del Lago de Cuitzeo se encuentra en la parte centro del país y actualmente presenta problemas de déficit de recursos hídricos superficiales y subterráneos debido a la sobreexplotación de las diferentes demandas consuntivas, principalmente la agrícola y urbana [3]. Teniendo como principales problemas la disminución en los caudales del Río Grande y Río Queréndaro que son los principales afluentes de la cuenca, sequías en el lago lo que ha provocado que las poblaciones aledañas al lago sean afectadas por sequías periódicas y cada vez más intensas. Durante los últimos 30 años ha existido un decremento aproximado del 13% en sus escurrimientos y las sequías son más frecuentes disminuyendo su recurrencia oscilando entre 2 a 3 años actualmente. Debido a esto, es necesario realizar un estudio sobre los escurrimientos superficiales de la zona para poder desarrollar modelos de gestión que permitan proponer medidas que mejoren la situación que se observa actualmente.

Dadas las circunstancias en las que se encuentra la zona de estudio, además de ser una cuenca de gran extensión (3,940 km² aproximadamente), se propone la siguiente metodología para obtener un modelo general de la Cuenca del Lago de Cuitzeo partiendo de modelos semidistribuidos en subcuencas cuyos modelos pueden ser calibrados y validados, teniendo como entrada de datos valores de precipitación, temperatura y medición de caudales en ríos aguas arriba de embalses. Para esto, se elige el modelo HBV, el cual requiere estos datos de entrada y permite obtener los escurrimientos en escala diaria para poder observar las pequeñas variaciones en los escurrimientos. La cuenca será dividida en 17 subcuencas en función de la ubicación de las estaciones hidrométricas de las cuales, 3 cuentan con información hidrométrica considerada a régimen natural (escurrimientos que no han sido alterados por acción antrópica) y que pueden ser modeladas. De estos modelos se obtendrán parámetros que influyen en el comportamiento del escurrimiento del recurso hídrico en el sistema y que pueden ser asignados a otras cuencas con características similares, las cuales serán agrupadas mediante métodos estadísticos multivariantes para finalmente obtener los escurrimientos en cada una de las subcuencas y de la cuenca en general.

2. METODOLOGÍA

El desarrollo del presente estudio se divide en 4 etapas, la primera consta de la recopilación de datos de la zona de estudio, la segunda etapa es el tratamiento de la información obtenida a través de pruebas estadísticas apoyándose de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para conocer espacialmente la zona de estudio y las estaciones climatológicas e hidrométricas, la tercera es la elaboración de los MPE correspondientes a las subcuencas con información hidrométrica, calibrarlos y validarlos; y finalmente la aplicación de Métodos Multivariantes (MMV) para asignar los parámetros obtenidos a las subcuencas restantes y obtener los escurrimientos de toda la cuenca.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Los datos de entrada (inputs) que requieren la mayoría de los modelos son principalmente datos de precipitación y temperatura para poder realizar la simulación y como datos para validar el modelo se requieren datos en escala diaria de los escurrimientos de aquellos ríos o tramos de río que no tengan una fuerte influencia por la acción antrópica.

Los datos de temperatura y precipitación son proporcionados por estaciones climatológicas ubicadas en todo el país. Para conocer aquellas que tienen influencia en la zona de estudio se hace uso de SIG que permiten visualizar diferentes tipos de archivos con información geoespacial, tales como archivos vectoriales y rásters, dentro de estos se encuentran archivos con la ubicación de dichas estaciones, también el tipo de suelo, topografía de la zona, entre otros datos. Se realizó un buffer a 20 km basándose en el parteaguas de la cuenca donde se preseleccionaron 62 estaciones para posteriormente descargar la información de cada una de las estaciones a través de la base de datos de Clima Computarizado (CLICOM) del Sistema Meteorológico Nacional [4].

De manera similar, se preseleccionan las estaciones hidrométricas que están dentro de la cuenca y están ubicadas a lo largo de los diferentes tramos de ríos siendo un total de 15 estaciones cuya información fue descargada de la plataforma del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) [5], en escala diaria correspondiendo esta a los caudales medios diarios y no a los caudales acumulados diarios.

Una vez descargados los datos de las estaciones climatológicas e hidrométricas, se deben someter a revisión mediante diferentes pruebas estadísticas que garanticen una buena calidad de la información. Los criterios para seleccionar las estaciones con buena información propuestos por Sánchez-Quispe et al. [1], son : i) número de años de servicio, ii) porcentaje de datos faltantes, iii) distancia de las estaciones al centro de gravedad de la zona en estudio (o cuenca hidrológica), iv) grado de actualización de los datos y v) localización geográfica de la estación con respecto al resto de estaciones disponibles (generalmente se busca una distribución uniforme de las estaciones, de manera que cubran la zona). Una vez revisado esto, se deben realizar pruebas estadísticas que revisen la independencia y homogeneidad de la información entre estaciones. Las pruebas de homogeneidad que se les aplicaron fueron la prueba de Secuencias, prueba de Helmer y Curva Masa Doble, perteneciendo estas al grupo de pruebas generales, también se les aplicaron pruebas específicas como la prueba de t Student, Cramer y Wald-Wolfowitz esto con la finalidad de que, si existe incertidumbre en las primeras pruebas, se pueda decidir el usar o no una estación

Una vez que se han determinado las estaciones con información apta para el caso de estudio, se eligen las estaciones principales que cubran completamente la cuenca y se comprueba dibujando polígonos de Thiessen para asegurar que tengan influencia cada una de ellas y puedan representar de mejor manera la distribución espacial de la precipitación.

Según las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial se recomienda que para una cuenca con una superficie aproximada de cuatro mil kilómetros cuadrados se deben tener como mínimo 11 estaciones climatológicas [6]

Las estaciones principales para elaborar el MPE son 16 ya que cuentan con la mayor parte del registro histórico de las estaciones hidrométricas y cuentan con poco porcentaje de vacíos lo cual es sumamente importante ya que al realizar un llenado a escala diaria, el que falte un mes o dos, elevaría drásticamente el número de datos faltantes en comparación con llenado de datos a escala mensual.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Para el caso de las estaciones hidrométricas, se realizan tres procedimientos específicos a las series anuales de caudales medios; se aplican primero dos procedimientos: el Coeficiente Esguerrimiento (C_e) y Módulo Relativo (M_r). Finalmente se aplica pruebas de consistencia a los datos: la prueba de Secuencias, la prueba estadística de Helmert (ambas evalúan homogeneidad); y la prueba de límites de Anderson (evalúa persistencia). Realizadas estas pruebas, se seleccionan 3 estaciones las cuales se cumplen con estos criterios y se consideran a régimen natural.

Apartir de estas estaciones, se desarrollarán los modelos para las subcuencas las cuales son Subcuenca de Santiago Undameo, Tarímbaro y Queréndaro.

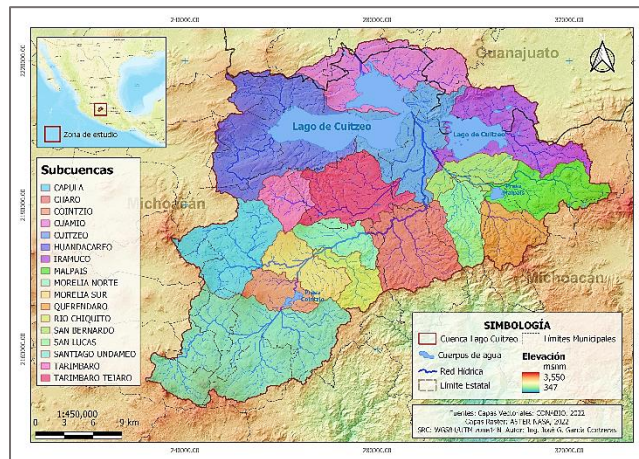


Figura 1. Subcuencas propuestas para la cuenca del Lago de Cuitzeo.

Para el desarrollo de los modelos de cada subcuenca, se usa la herramienta EvalHID, el cual es un módulo que pertenece al Sistema de Soporte a la Decisión AQUATOOL [7] y dentro de este se encuentran diferentes MPE. Para este caso se ha elegido el modelo HBV ya que es ampliamente empleado en previsiones hidrológicas y en estudios de balance hídrico, además de que los datos de entrada que requiere se encuentran disponibles en la zona de estudio. Estos son la precipitación y la evapotranspiración (ETP), esta última se calcula con los datos de temperatura y a través del modelo de Hargreaves y Samani. El modelo consta de cuatro módulos o rutinas principales: un módulo de fusión y acumulación de nieve, un módulo de humedad del suelo y precipitación efectiva, un módulo de evapotranspiración y por último un módulo de estimación de esguerrimiento. El modelo puede ejecutarse a escala temporal diaria o mensual y los datos de entrada necesarios incluyen: series de precipitación y temperatura observadas en cada paso de tiempo y estimaciones a largo plazo de la temperatura y evapotranspiración media mensual [8]. Para la calibración de este modelo se requieren datos observados que corresponden a los datos de las estaciones hidrométricas mencionadas con anterioridad y con el cálculo de indicadores de ajuste que permiten evaluar la similitud entre los esguerrimientos simulados y los observados.

Una vez calibrados los modelos de las subcuencas seleccionadas, se obtienen los parámetros de cada una. Como se ha mencionado anteriormente, estos parámetros influyen directamente en el comportamiento del esguerrimiento en el modelo en las diferentes zonas, estos son: Capacidad de campo (FC), coeficiente de infiltración (β), punto de marchitez de la vegetación (PWP), umbral de descarga rápida ($L_{m\acute{a}x}$), el coeficiente de descarga rápida (K_0), de recesión (K_1), de percolación (K_{perc}) y el coeficiente de recesión (K_2).

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Estos parámetros se asignarán mediante métodos multivariantes que permitan formar conglomerados (clusters) entre subcuencas con características similares. Para este caso se inicia con la elaboración de una matriz preliminar que contenga variables las cuales afectan el comportamiento del escurrimiento, para el presente caso de estudio son datos con información del tipo y uso de suelo en kilómetros cuadrados, la ETP y precipitación acumulada de las 17 subcuencas. Estas variables tienen una correlación entre sí, y el análisis de todas ellas genera cierto nivel de variación. Lo que se pretende es que inicialmente mediante un análisis de componentes principales, se construya una matriz informativa que no tenga variables redundantes y que tenga la suficiente variación para poder realizar los conglomerados. Teniendo la matriz informativa, se procede a realizar la agrupación de las subcuencas que será representada por medio de dendrogramas, eligiendo aquel que sea el más compacto y que mantenga una agrupación que no difiera drásticamente entre un método de agrupación y otro. Para corroborar esta agrupación, se realiza posteriormente un análisis discriminante que permite verificar los grupos realizados por medio de gráficos canónicos y pruebas estadísticas que usualmente se realizan para la comprobación de estos resultados. Este análisis se hizo con el apoyo de software JMP, el cual tiene integrado estos análisis en su interfaz y permite realizar análisis univariantes, bivariantes y multivariantes.

3. RESULTADOS

Para el caso de la subcuenca de Tarímbaro se trabajó inicialmente con periodo de 22 años que databa de 1966 hasta 1987, sin embargo, debido a que la hidrométrica presentaba un salto en el año de 1973, se planteó el supuesto de que probablemente se movió la estación hidrométrica del sitio original provocando una variación en los datos de escurrimientos, por lo que se decidió recortar el periodo de 1973 a 1984 quedando solo 12 años para calibrar y limitando de esta manera a realizar la validación de el MPE-Tarímbaro.

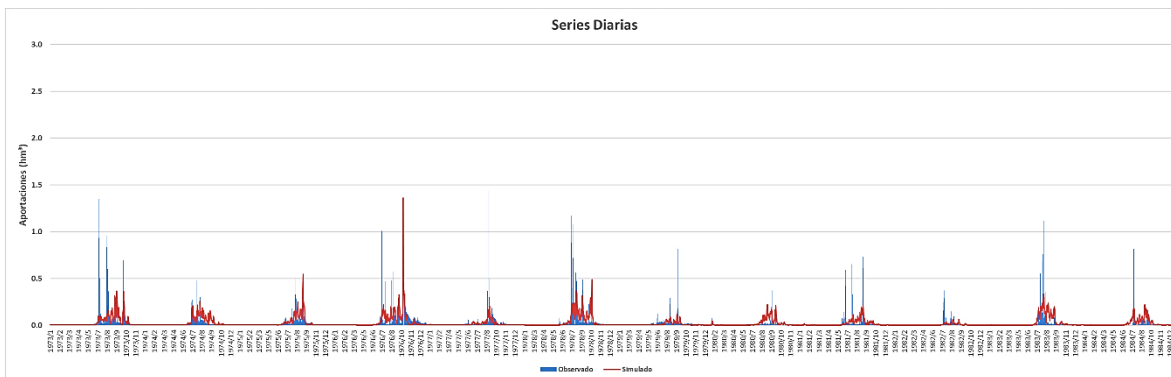


Figura 2. Series diarias de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Tarímbaro.

La subcuenca de Queréndaro inicialmente constaba con registro histórico de 27 años a partir de 1960 hasta 1987, pero al igual que en el caso de la subcuenca de Tarímbaro se mostraba una tendencia en los datos que dividía a la serie en dos, por lo que se decide iniciar en 1968 hasta 1987 quedando 20 años para realizar la calibración. Aunque se considera una cantidad de años suficiente para realizar también la etapa de validación, no se lograba subir los indicadores de ajuste si se consideraba un periodo para dicha etapa por lo que se opta a usar todo el registro histórico para la calibración, dando los siguientes resultados.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

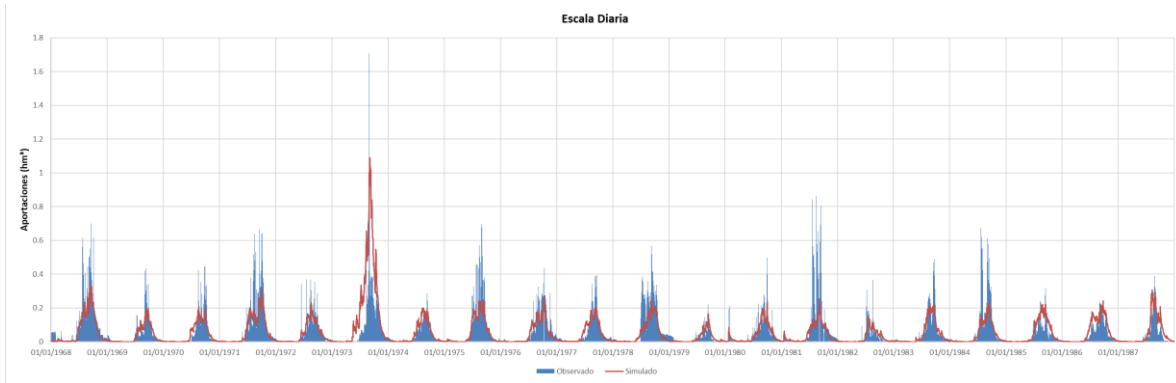


Figura 3. Series diarias de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Queréndaro.

La subcuenca Santiago Undameo debido a su superficie mayor en comparación con las otras subcuencas y al periodo histórico más extenso, obtuvo los mejores valores de los indicadores de ajuste. En este MPE se consideró una etapa de calentamiento del modelo de un año, es decir se inició la calibración a partir de 1961 hasta 1983 y los años restantes fueron para validación. Se muestran los resultados a continuación.

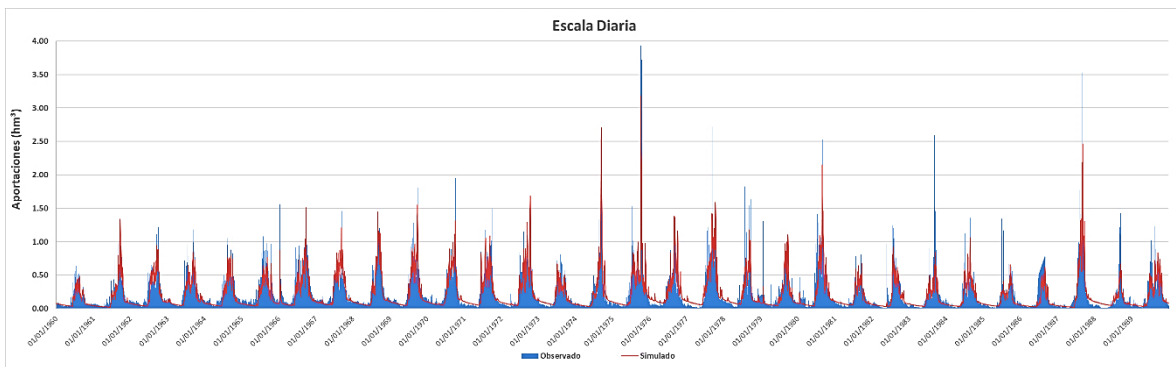


Figura 4. Series diarias de las aportaciones del MPE de la subcuenca de Santiago Undameo.

Se puede observar que en la subcuenca de Santiago Undameo, al tener mayor cantidad de información para calibrar, el modelo se muestra más estable y el proceso de calibración fue más sencillo que en los casos de Tarímbaro y Queréndaro.

Tabla 1. Resumen de los parámetros del MPE-HBV obtenidos.

Subcuenca	Parámetros HBV								Condiciones iniciales del suelo		
	Betha	FC (mm)	Pwp (mm)	Lmáx (mm)	K0	K1	K2	Kperc	H0 (mm)	S1 (mm)	S2 (mm)
Santiago Undameo	1.4	800.0	181.2	0.4	0.1	0.1	0.0	0.1	40	1.5	75
Queréndaro	1.0	999.9	187.6	80.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0	0	0
Tarimbaro	3.3	354.9	273.8	13.3	0.6	0.3	0.0	0.0	50	1	100

Obtenidos los parámetros HBV, se deben asignar a las demás subcuencas para poder elaborar el modelo general de la Cuenca del Lago de Cuitzeo y así conocer los escurrimientos generados.

Mediante el análisis de componentes principales, se depuró la matriz preliminar construida con las variables mencionadas con anterioridad, cumpliendo con el criterio de no tener variables redundantes y que se tenga una variación adecuada para la realización de los

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

conglomerados jerárquicos, siendo esta del 67% en sus 3 primeras componentes. Las variables que determinarán los grupos de subcuencas son: Tipo de suelo gruesa, fina, media y agua; Uso de suelo desprovisto de vegetación, agricultura, pastizal cultivado, pastizal inducido, vegetación secundaria y tular; la precipitación y la ETP acumulada.

Se realizaron los conglomerados jerárquicos con el método de Ward y el método completo, los cuales agrupaban de manera similar a los demás métodos, pero mostraban un dendrograma más compacto.

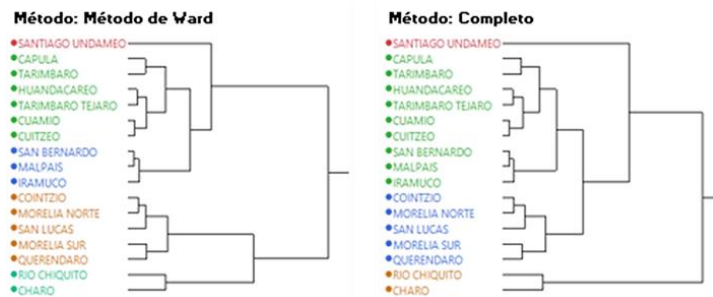


Figura 5. Dendrogramas realizados con los datos de la matriz informativa.

Finalmente, para corroborar los conglomerados realizados por el método de Ward se procede a realizar un análisis discriminante el cual muestra que la agrupación hecha es correcta dado que las pruebas de Lambda de Wilks, Traza de Pillai y Raíz Máxima de Roy muestran que la probabilidad de que los grupos sean iguales entre sí es casi nula.

Prueba	Valor	Aproximación de F	Grados de libertad del numerador	Grados de libertad del denominador	Prob > F
Lambda de Wilks	4.3395e-8	9.8828	48	5.8908	0.0044*
Traza de Pillai	3.6678847	3.6813	48	16	0.0031*
Hotelling-Lawley	2990.8566	.	48	-2	.
Raíz máxima de Roy	2830.4715	943.4905	12	4	<.0001*

Figura 6. Resultados de las pruebas más comunes en un análisis discriminante.

Finalmente se forman los grupos a los que pertenece cada microcuenca sin información hidrométrica, y se procede a generar el modelo completo de la cuenca del Lago de Cuitzeo y de esta manera, obtener los escurrimientos de la misma en un periodo de tiempo de 30 años que es de 1985 al 2015.

Tabla 2. Grupos para la asignación de parámetros del modelo HBV.

Asignación de parámetros	
Grupo "Tarimbaro"	Grupo "Queréndaro"
Capula	Cointzio
Huandacareo	Morelia Norte
Tarimbaro Tejaro	San Lucas
Cuamio	Morelia Sur
Cuitzeo	Charo
San Bernardo	Río Chiquito
Malpais	
Irámucó	

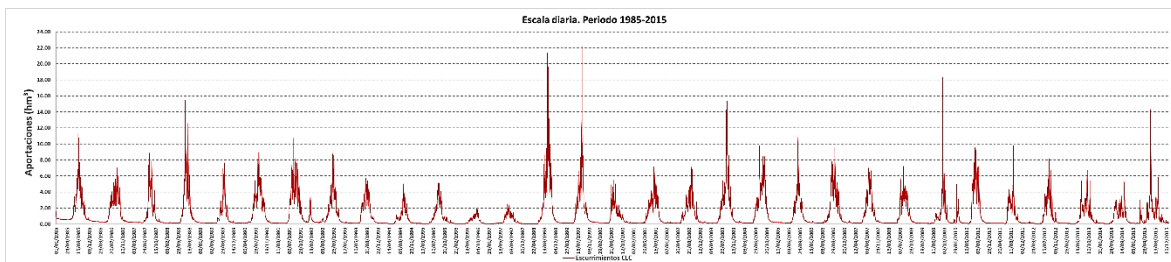


Figura 7. Escurrimientos a escala diaria de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Se puede observar como han ido en decremento los escurrimientos en la cuenca en 30 años, teniendo el supuesto de que siguen a la baja. Además, después de la sequía que se muestra en los años 1995 a 1997, los escurrimientos no vuelven a llegar a los valores que preceden a estos años.

4. CONCLUSIONES

La realización de un modelo a escala diaria tiene como propósito la detección de ciertos tipos de impactos hidrológicos como pueden ser las rápidas fluctuaciones del caudal, dado que modelos con una escala de tiempo mayor no permiten hacer análisis con detalle. Con el apoyo de métodos multivariantes, se tiene un fundamento estadístico que evita realizar asignaciones de parámetros de manera arbitraria, lo que puede generar errores en la obtención de escurrimientos. Por consiguiente, la limitación de información en el desarrollo de modelos representa un problema importante en la obtención de resultados, no en cuanto a la calidad de los mismos sino al tratamiento de información y a los análisis estadísticos utilizados.

AGRADECIMIENTOS

Al equipo de trabajo del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México ya que han hecho posible la realización de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] S. T. Sánchez-Quispe, M. del Ma. Navarro-Farfán, and L. García-Romero, “Metodología para el tratamiento de datos meteorológicos e hidrométricos a escala de cuenca,” CIERMMI Women in Science TXVI Engineering and Technology, Querétaro, 2021. doi: 10.35429/H.2021.16.107.145.
- [2] J. C. Valencia Vargas, J. J. Díaz Nigenda, and Vargas Martínez Lourdes, “La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en México: Un nuevo paradigma en el manejo del agua.,” México, Jun. 2007.
- [3] C. Comisión Nacional del Agua, “Estadísticas del Agua en México 2018,” México, 2018. [Online]. Available: www.gob.mx/conagua
- [4] CICESE, “CLICOM. BASE DE DATOS CLIMATOLÓGICA NACIONAL,” 2022. <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- [5] BANDAS, “Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. CONAGUA,” 2022. <https://app.conagua.gob.mx/bandas/>
- [6] F. J. Aparicio Mijares, Fundamentos de Hidrología de Superficie. México, D.F., 1997.
- [7] A. Solera, J. Paredes, and J. Andreu, “Manual de usuario AQUATOOL+.” Valencia, Sep. 2015.
- [8] J. Paredes Arquiola, A. Solera Solera, J. Andreu Álvarez, and N. Lerma Elvira, “Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos.” Valencia, España, 2017. [Online]. Available: http://www.upv.es/aquatool/files/manuales/Manual_Tecnico_EvalHid.pdf