

Metodología

Se desarrollará una metodología, que se esquematiza en la Figura 1, en la que, partiendo de los caudales presentes en la cuenca, se toma la decisión de suministro y se obtiene información acerca de los riesgos asumidos para el futuro como consecuencia de utilizar el agua. La metodología propuesta requiere los pasos siguientes:

- I. Se obtiene las series de caudales futuros a través de la modelación hidrológica incorporando la influencia del cambio climático y de uso del suelo en la cuenca;
- II. Usando un modelo estocástico de series de tiempo de caudales mensuales, se realiza una generación sintética de caudales, condicionada a las observaciones previas, lo que genera múltiples escenarios de posibles caudales futuros;
- III. Con los múltiples escenarios generados, las características actuales del sistema de explotación de agua y las reglas de gestión del sistema, se realizan múltiples simulaciones de gestión futura del recurso hídrico en la cuenca;
- IV. Los resultados de la simulación múltiple se analizan estadísticamente para obtener las probabilidades de falla de las demandas;
- V. La información proporcionada en el paso anterior determina el estado del sistema y respalda el proceso de toma de decisiones sobre la admisibilidad o no de la probabilidad de fallo;
- VI. Cuando no se acepta la probabilidad, se formulan nuevas alternativas de gestión que retroalimentan el modelo de simulación múltiple (paso 3). Los siguientes pasos se repiten hasta que se tome una nueva decisión sobre si el riesgo es aceptable o no. Este proceso se repite cuantas veces sea necesario hasta que la probabilidad de fallo asociado con la decisión sea apropiada.

El desarrollo metodológico se detalla a continuación.

1. Estimación de aportaciones bajo escenarios de cambio climático y cambio de usos del suelo

La disponibilidad hídrica futura se estimará mediante el método de balance hídrico, que estima la relación entre entradas y salidas de agua superficial en un período determinado de tiempo. La ecuación para el balance de agua se representa por la siguiente expresión [18]:

$$\frac{ds}{dt} = P(t) - E(t) - R(t)$$

Donde:

S(t): representa el almacenamiento de agua en el suelo como una función del tiempo

P (t): Precipitación en mm por unidad de tiempo

E (t): Evapotranspiración real o efectiva en mm por unidad de tiempo

R (t): Escorrentía incluyendo el flujo base en mm por unidad de tiempo

Para efectuar el balance hidrológico se utilizará la herramienta Hydro-BID, el cual es un sistema integrado y cuantitativo para simular hidrología y gestión de recursos hídricos en la región de América Latina y el Caribe, bajo escenarios de cambio (p. ej., clima, uso del suelo, población), que permite evaluar la cantidad y calidad del agua, las necesidades de infraestructura, y el diseño de estrategias y proyectos de adaptación en respuesta a estos cambios.

El modelo Hydro-BID tiene como variables de entrada precipitación y temperatura a resolución temporal diaria, así como caudales a nivel diario para fines de calibración, estos datos se obtendrán de las bases de datos observados de estaciones hidrometeorológicas del IDEAM.

Inicialmente se seleccionan todas las estaciones presentes en la zona y se aplicaran los siguientes criterios para evaluar la calidad de la información de dichas estaciones:

1. Longitud de la serie mayor o igual a 30 años
2. Datos faltantes no mayor al 30% del total del registro
3. Deben cumplir con las pruebas de consistencia y homogeneidad

En caso que las estaciones que cumplan estos criterios sean pocas, se complementará con datos de productos de reanálisis meteorológico, se utilizará información del producto MSWEP, el cual es un nuevo conjunto de datos de precipitación histórica global (1979–2017) con una resolución temporal de 3 horas y una resolución espacial de 0,1°.

Para la calibración del modelo Hydro-BID utiliza cuatro métricas de desempeño, Volumen general de error, Correlación R, Coeficiente de correlación modificado, Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe, en la calibración se ajustan los parámetros del modelo (Hydro-BID contiene 7 parámetros a calibrar) con el fin que los resultados del modelo guarden una adecuada correlación con los datos observados de caudales obtenidos de las estaciones limnimétricas presentes en la zona y así garantizar la confiabilidad del modelo.

Se utilizará una herramienta de calibración independiente, que incluya diversos algoritmos para permitir la utilización de diversos métodos en un solo marco de optimización.

El análisis del cambio climático se realiza en dos fases; inicialmente se procede a seleccionar un modelo climático global para la obtención de las proyecciones de las variables climáticas (Precipitación y temperatura), los modelos climáticos serán obtenidos de la base de datos de CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) y se selecciona el modelo que tenga menor sesgo con respecto a las variables observadas en la cuenca.

Una vez seleccionado el modelo climático se realiza la reducción de escala, este paso es necesario, debido a que la escala requerida por los estudios hidrometeorológicos locales es menor que las representadas por los modelos de circulación global.

El análisis de los cambios en el uso del suelo se realizará a partir de la adquisición de imágenes por satélite de sensores Landsat, Sentinel y/o se realizará un análisis multitemporal espacial que permitirá cuantificar los cambios de cobertura vegetal asociados a la intervención antrópica desarrollada en la cuenca de estudio. Para ello, se dispondrá de una ventana de observación de los últimos treinta años, en donde serán seleccionadas las mejores escenas, a las que se les aplicará un método de clasificación supervisada. El método requerirá de un reconocimiento y georreferenciación de las coberturas presentes, al igual que de una calibración mediante un espectroradiómetro de campo, con el fin de obtener mejores definiciones en la clasificación de las coberturas.

Una vez sean obtenidas las coberturas se procederá a la identificación de los patrones de cambio en el uso del suelo a partir de un análisis visual y de los principales hitos registrados en el área de estudio mediante encuestas a la población. Los patrones identificados serán procesados en un modelo dinámico como el CA-Markov o el LAND CHANGE MODELER con los que se podrá obtener un mapa de predicción de la ocupación del suelo para una fecha en específico. Por tanto, el resultado será una serie de mapas de probabilidad de cambio en los usos del suelo y por ende de coberturas con las que se alimentará el modelo hidrológico dispuesto para tal fin.

Con el modelo hidrológico calibrado, la generación futura de series de precipitación y temperatura y la proyección de cobertura del suelo, se realiza la generación de caudales a nivel diario para el periodo establecido.

2. Simulación múltiple de la gestión futura, a partir de los escenarios de oferta hídrica, las características actuales del sistema de recursos hídricos y las reglas de gestión del sistema

La simulación de la gestión con múltiples escenarios se realizará a escala mensual, mediante la construcción de esquemas de los sistemas de recursos hídricos que se representan mediante redes de flujo conservativas que se optimizan cada mes (con programación lineal) para cumplir la función objetivo de maximizar la satisfacción de las demandas, cumpliendo las restricciones de conservación de masa (continuidad) y los límites físicos de transporte de flujo en conducciones (ríos, quebradas, etc.) y capacidades de embalses.

Para la simulación de la gestión del sistema de recursos hídricos se trabajará con el modelo SIMGES desarrollado por el grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos del Instituto de

Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia. Este modelo forma parte del sistema de soporte de decisiones AQUATOOL.

3. Análisis estadístico, obteniendo las probabilidades de fallo de las demandas de agua del sistema de recursos hídricos

Para la planificación de la gestión con escenarios estocásticos y la valoración la probabilidad de fallo se utilizará el modelo SIMRISK del sistema de soporte de decisiones AQUATOOL. El mismo que proporciona las probabilidades de fallos en los sistemas de recursos hídricos y la simulación de medidas de mitigación según el riesgo admisible impuesto, a partir de la incorporación de múltiples series sintéticas equiprobables de caudales futuros.

El análisis de los resultados permite identificar posibles situaciones de sequía, de forma que se puede actuar de forma anticipada adaptando las decisiones a las circunstancias hasta conseguir que el riesgo adoptado se aproxime al riesgo admisible. Es decir a partir de los resultados se obtiene la determinación del estado del sistema mediante la evaluación de las probabilidades de fallo mensual y la magnitud del déficit en el suministro.

4. Evaluación de alternativas de mitigación para diferentes grados de riesgo de fallo en el suministro

A partir de los diferentes grados de los riesgos de fallo en el suministro se plantean medidas de gestión de oferta y demanda de agua que maximice el rendimiento del sistema de recursos hídricos, para esto se utilizará el modelo SIMRISK, en el cual se simulará la medida de mitigación que se considere adecuada (por ejemplo modificación de la demanda mediante restricciones o modificación de la oferta mediante el aumento de las infraestructuras de conectividad con otras fuentes del recurso) y se analizan nuevamente las variables resultantes para tener conocimiento de la nueva situación del sistema. Y si estos no fuesen satisfactorios se harían nuevas pruebas adoptando otras medidas de mitigación, hasta que se encuentre la actuación más apropiada según los objetivos perseguidos. Esta última solución es la que se llevará a la práctica.