

# Evaluación del efecto del cambio climático y variabilidad climática sobre las fuentes de abastecimiento superficial: caso de estudio presa Ignacio Allende

Juan Enrique Collazo-Aranda<sup>1</sup>, Jaime Ramírez-Acosta<sup>2</sup>, David Rocha-Díaz<sup>1</sup>, Mayra Guadalupe Vázquez-Rodríguez<sup>1</sup>, Edgar Omar Reynoso-Martínez<sup>3</sup>, Alan Joaquín Arias-Diosdado<sup>4</sup>, Ismael Orozco-Medina<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Licenciatura en Ingeniería Hidráulica, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Av. Juárez 77, Zona Centro, Guanajuato, 36000, México; je.collazoaranda@ugto.mx, da.rochadiaz@ugto.mx, mg.vazquez.rodriguez@ugto.mx, mdlrodriguezmorales@ugto.mx

<sup>2</sup>Licenciatura en Ingeniería Biotecnología, División de Ciencias de la Salud e Ingenierías, Campus Celaya Salvatierra, Universidad de Guanajuato, Av. Ing. Barros Sierra No. 201 Ejido de Santa María del Refugio, Celaya, Guanajuato, 36000, México; j.ramirezacosta@ugto.mx

<sup>3</sup>Licenciatura en Ingeniería Civil, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Av. Juárez 77, Zona Centro, Guanajuato, 36000, México; eo.reynosomartinez@ugto.mx

<sup>4</sup>Licenciatura en Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Av. Juárez 77, Zona Centro, Guanajuato, 36000, México; aj.ariasdiosdado@ugto.mx

<sup>5</sup>Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Av. Juárez 77, Zona Centro, Guanajuato, 36000, México; i.orozco@ugto.mx

## Resumen

Un porcentaje importante del abastecimiento urbano de agua potable en el estado de Guanajuato proviene de las fuentes de abastecimiento superficial, específicamente de las presas. Sin embargo, su volumen útil puede verse afectado por los efectos de la variabilidad climática y el cambio climático, aumentando el riesgo de crisis de agua para el abastecimiento en las áreas urbanas y los diferentes usos consuntivos del estado. A pesar de que existen estudios como el Diagnóstico Climatológico en el estado de Guanajuato publicado por el Instituto Estatal de Ecología, aún es incierto el panorama de estrés hídrico producto de los efectos de la variabilidad climática y cambio climático. Es por ello, que la presente investigación tiene como objetivo evaluar a través de la modelación matemática los efectos de la variabilidad climática y cambio climático sobre la disponibilidad hídrica de la presa Ignacio Allende. Lo anterior, con la finalidad de proponer acciones que contribuyan a minimizar los potenciales impactos y contribuir en la seguridad hídrica del municipio.

**Palabras clave:** Cambio climático; variabilidad climática; presa Ignacio Allende; modelación hidrológica.

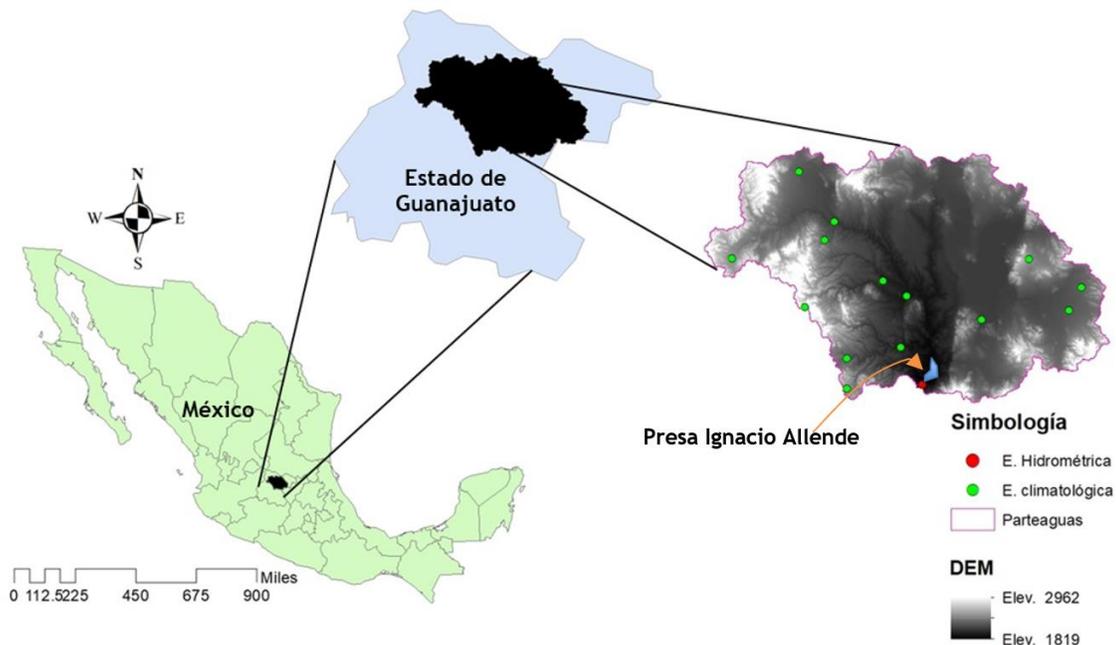
## Introducción

El agua es el medio principal por el que se puede percibir los efectos del cambio climático. La importancia de este elemento para la salud y la vida del planeta hace que, si se altera su ciclo natural, toda la vida se vea afectada. Según Martínez (2021), es preocupante observar que en el Estado de Guanajuato cada vez más se presentan eventos naturales extremos a tribuidos al cambio climático. Por lo cual, tratar de proyectar los efectos del cambio climático sobre el agua es básico para su mitigación. Un ejemplo de ello es que un porcentaje importante del abastecimiento urbano de agua potable en el estado de Guanajuato proviene de las fuentes de abastecimiento superficial. A pesar de que existen estudios como el Diagnóstico Climatológico en el estado de Guanajuato publicado por el Instituto Estatal de Ecología (2012), aún es incierto el panorama de estrés hídrico producto de los efectos de la variabilidad climática y cambio climático. En el mismo contexto las previsiones científicas pronostican que los episodios de sequía en regiones ya áridas sean más frecuentes y duraderos en el tiempo. Haciendo que el volumen útil de las presas se vea afectado aumentando el riesgo de crisis de agua para el abastecimiento en las áreas urbanas y los diferentes usos consuntivos del estado. Se espera que la posible alteración del régimen pluvial, aunadas a las prácticas poco eficientes, sobreexplotación de acuíferos y el tratamiento inadecuado de aguas acrecentarán la vulnerabilidad futura de los recursos hídricos (DOF, 2009). Con base en todo lo anterior, la presente investigación tiene como objetivo evaluar a través de la modelación matemática los efectos de la variabilidad climática y cambio climático sobre la disponibilidad hídrica de la presa Ignacio Allende. Lo anterior, con la finalidad de proponer acciones que contribuyan a minimizar los potenciales impactos y

contribuir en la seguridad hídrica del municipio.

## Caso de estudio

La presa Ignacio Allende se localiza al suroeste de San Miguel de Allende, Guanajuato, a una elevación de 1,843 msnm. Entre sus características constitutivas se encuentran una cortina con una altura de 43 m y un ancho de corona de 128 m. Para su operación cuenta con dos compuertas con una capacidad de desfogue de 602 m<sup>3</sup>/s (SRH, 1969). Según datos del Sistema Nacional de Información del Agua de la Comisión Nacional del Agua (SINA-CONAGUA: [sina.conagua.gob.mx/sina/](http://sina.conagua.gob.mx/sina/)) la capacidad al NAMO es de 155 Hm<sup>3</sup>. En el año 2019 la presa Ignacio Allende presentaba un almacenamiento de 63.301 Hm<sup>3</sup> menos del 50% de su capacidad. En la realización de la presente investigación ha sido necesario definir la cuenca de aportación tomando como punto de salida la ubicación de la presa y los datos hidrometeorológicos de la estación "La Begoña". El área obtenida y con la cual se realizará el modelado hidrológico, incluyendo el cambio climático ha sido de 6,993.23 km<sup>2</sup>. En la figura 1 se presenta la ubicación y la delimitación del área de estudio definida a partir del parteaguas.



**Figura 1.** Ubicación de la cuenca generada a partir de la ubicación de la presa Ignacio Allende y de las estaciones hidrometeorológicas seleccionadas para el modelado hidrológico.

El clima del área es seco templado con veranos cálido-extremos, precipitación pluvial invernal menor al 5% de la anual y temperaturas medias entre 12.9°C y 21.9°C. Los meses más lluviosos son de abril a octubre con eventos de precipitaciones que varían de 21.9 mm a 146.1 mm y los de menor pluviosidad son de noviembre a abril con eventos de precipitaciones de 2.7 mm a 12 mm (García, 1981).

Por otro lado, el tipo de suelo en la cuenca es principalmente phaeozem con un alto porcentaje de material calcáreo. Aunque en la parte suroriental hay una zona con suelo tipo vertisol que contribuye con material pélico y crómico. Asimismo, en la porción septentrional donde desemboca el Río de la Laja, hay una zona con suelo del tipo chernozem que contiene gran cantidad de material cálcico (CETENAL, 1973). Finalmente, la vegetación es escasa observándose principalmente la presencia de matorral xerófilo.

## Metodología

La metodología seguida para llevar a cabo la presente investigación ha incluido el uso del modelo hidrológico distribuido TETIS, desarrollado por el Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA) del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Es un modelo de descarga libre a través del portal: [lluvia.dihma.upv.es](http://lluvia.dihma.upv.es). Se ha decidido usar este modelo por los buenos resultados que ha obtenido en cuencas de España, Francia, EE. UU, Italia, México y China. Además, de que fácilmente se puede incluir en los *inputs* los efectos del cambio climático. El modelo TETIS usa un esquema conceptual de seis tanques para simular los diferentes procesos y almacenamientos del ciclo hidrológico (Figura 2). Para más información sobre el modelo TETIS consultar a Francés et al. (2007) y Orozco et al. (2020).

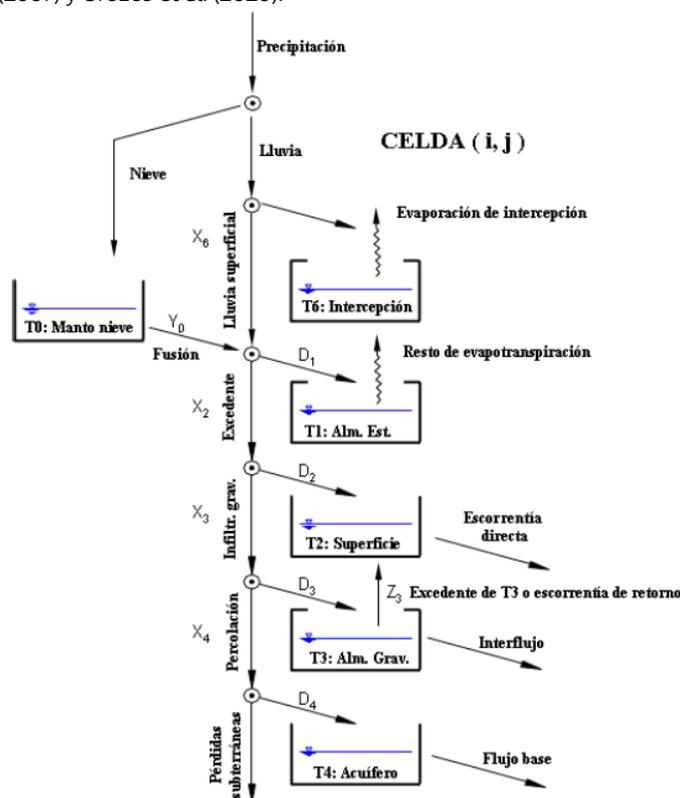
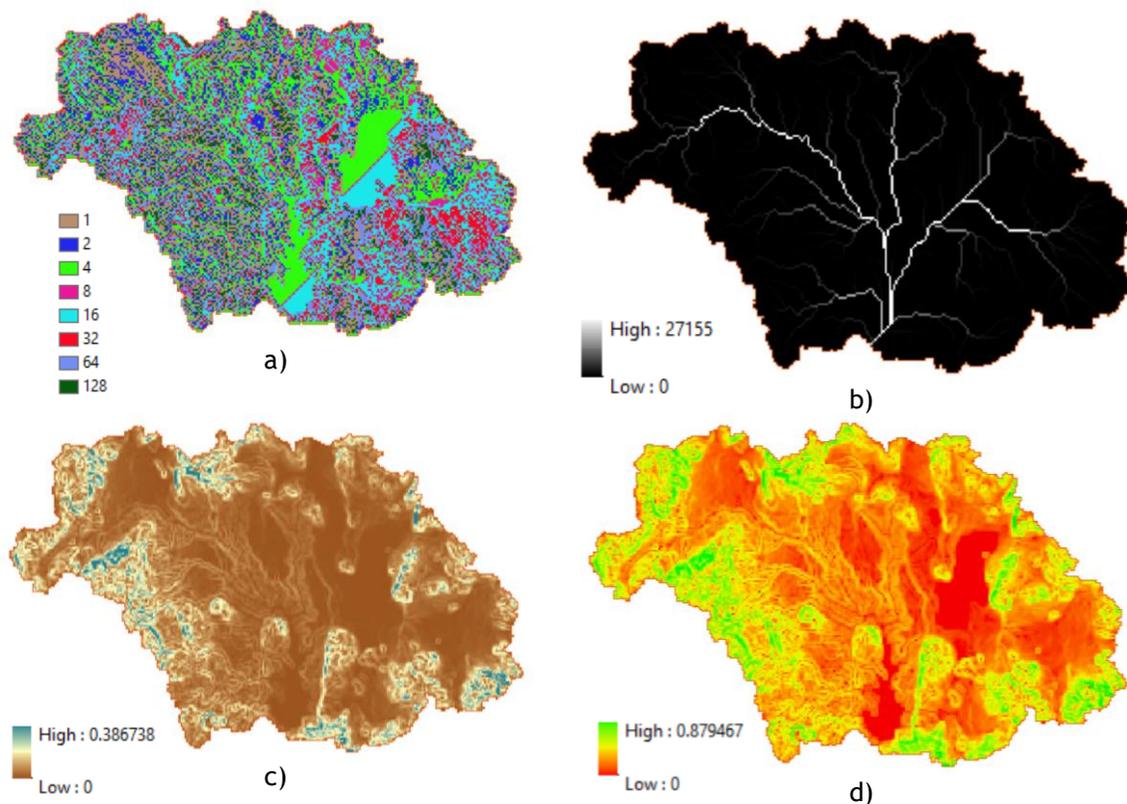


Figura 2. Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo hidrológico distribuido TETIS (GIMHA, 2020).

Los *inputs* del modelo se han generado considerando los datos diarios de precipitación, temperatura y evaporación de 14 estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN: [smn.conagua.gob.mx](http://smn.conagua.gob.mx)). Además, de los datos diarios de caudal de la estación hidrométrica “La Begoña” del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales de CONAGUA (BANDAS: [hidrosuperf.imta.mx/bandas/](http://hidrosuperf.imta.mx/bandas/)). Por otro lado, en la determinación del parteaguas se ha utilizado un Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) descargado con una resolución de 30x30 metros del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI: [inegi.org.mx](http://inegi.org.mx)). Para la determinación de la hidromorfometría de la cuenca ha sido necesario agregar la escala del DEM a una resolución de 500x500 metros. Lo anterior, con la finalidad de reducir los tiempos de cómputo y la eficiencia del modelo hidrológico TETIS. A partir de esta nueva resolución se han generado los mapas ráster de direcciones de flujo, celdas acumuladas, pendientes y velocidades de flujo (figura 3).



**Figura 3.** Mapas ráster calculados para introducir las características hidromorfométricas de la cuenca: a) direcciones de flujo, b) acumulación de celdas, c) pendientes en metros y d) velocidades de flujo (m/s).

En la construcción del modelo hidrológico ha sido necesario el cálculo de los parámetros: almacenamiento estático ( $H_u$ ), conductividad hidráulica del suelo ( $K_s$ ), conductividad hidráulica de la zona no saturada ( $K_p$ ) y conductividad hidráulica del acuífero ( $K_{sa}$ ). Para ello, se ha utilizado el mapa de pendientes, geología, edafología y uso de suelo obtenidos del Sistema de Información Geográfica de la Secretaría de Medio ambiente y Ordenamiento Territorial del estado de Guanajuato (SEBIO-GTO). Para determinar los valores de  $H_u$ ,  $K_s$  y  $K_p$  se tomaron consideraciones de acuerdo con la textura del suelo y tipo de vegetación (tabla 1 y tabla 2).

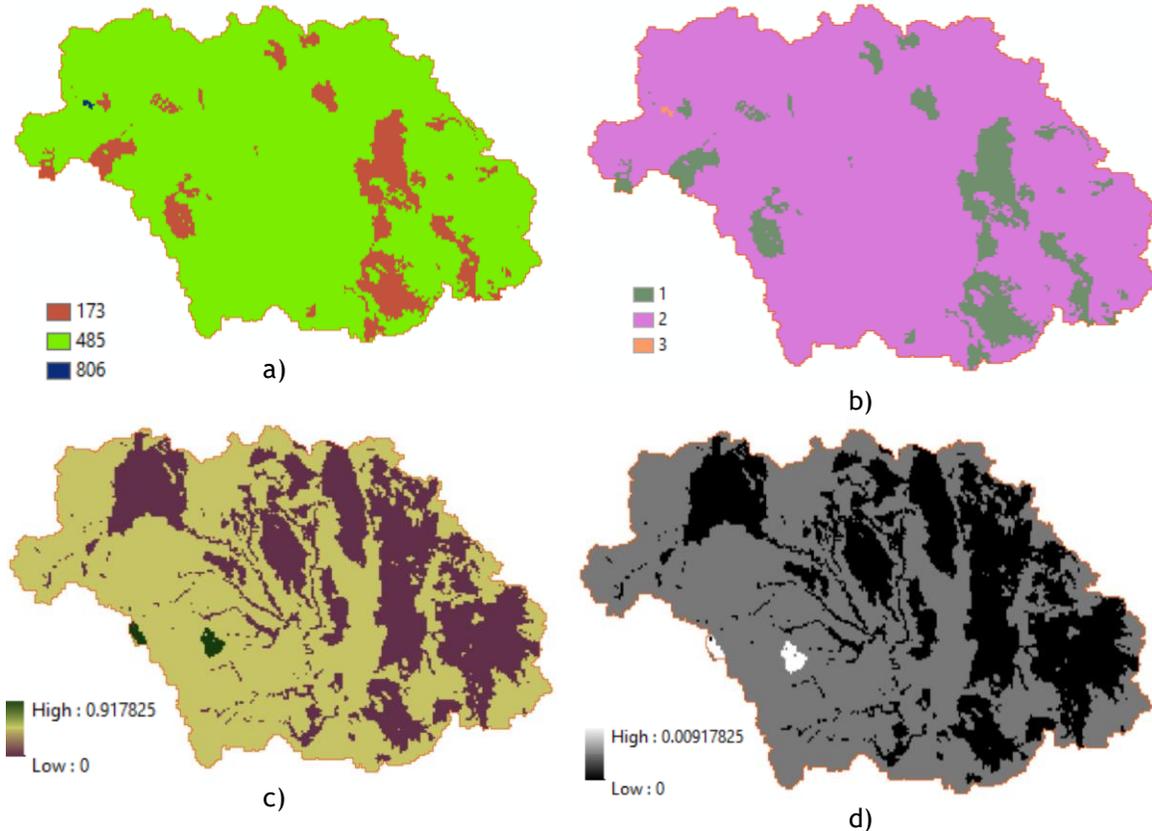
**Tabla 1.** Almacenamiento estático y conductividad hidráulica del suelo usados en el cálculo de los parámetros  $H_u$  y  $K_s$ .

| Textura | Edafología      |      |       |                 |
|---------|-----------------|------|-------|-----------------|
|         | Parámetro $H_u$ |      |       | Parámetro $K_s$ |
|         | Mín.            | Máx. | Medio |                 |
| Fina    | 105             | 242  | 173.5 | 1.054           |
| Media   | 388             | 582  | 485   | 2.741           |
| Gruesa  | 582             | 1030 | 806   | 3.716           |

**Tabla 2.** Conductividad hidráulica de la zona no saturada usada en el cálculo del parámetro  $K_p$ .

| Geología               |                 |
|------------------------|-----------------|
| Tipo de roca           | parámetro $K_p$ |
| Ígneas y sedimentarias | 0.019           |
| Metamórficas           | 0.910           |

A través del uso de las herramientas de ArcGIS se distribuyeron espacialmente los valores de las tablas 1 y 2 para obtener los mapas de parámetros  $H_u$ ,  $K_s$  y  $K_p$  (figura 4). En el caso del parámetro  $K_{sa}$  éste ha sido obtenido reduciendo las conductividades del mapa  $K_p$ .



**Figura 4.** Parámetros: a) almacenamiento estático ( $H_u$ ), b) conductividad hidráulica del suelo ( $K_s$ ), c) conductividad hidráulica de la zona no saturada ( $K_p$ ) y d) conductividad hidráulica del acuífero ( $K_{sa}$ ).

## Resultados

El modelado hidrológico realizado ha tenido como objetivo evaluar los efectos del cambio climático sobre la presa Ignacio Allende. Para ello, se asumieron variaciones significativas de la precipitación al considerarse un efecto directo de esta variable sobre la disponibilidad hídrica. En este mismo contexto, se seleccionó un periodo de tres años hidrológicos (01/10/1979 al 30/09/1982) para la calibración del modelo hidrológico. El periodo de calibración seleccionado estuvo condicionado por la escasa información hidrometeorológica en el área de estudio. En la figura 5 se presenta la variación media de las precipitaciones introducidas como *inputs* para el periodo de calibración. Otra variable considerada en el modelado ha sido las evapotranspiraciones obtenidas a partir de los datos diarios de evaporación de las estaciones meteorológicas (figura 6). Finalmente, se ha introducido la variable de caudal como otra información necesaria para poder llevar a cabo el proceso de calibración.

En esta investigación la calibración del modelo TETIS ha sido realizada de forma manual comparando el volumen observado en la estación hidrométrica *vs* el volumen que simula matemáticamente en modelo con base en los parámetros, características hidromorfológicas e *inputs* proporcionados. Se ha alcanzado un error entre ambos volúmenes del 0.1%. Sin embargo, se obtuvieron diferencias significativas en la forma de los hidrogramas. Esto puede ser debido al efecto de laminación que está produciendo la presencia de la presa Ignacio Allende sobre la dinámica del escurrimiento.

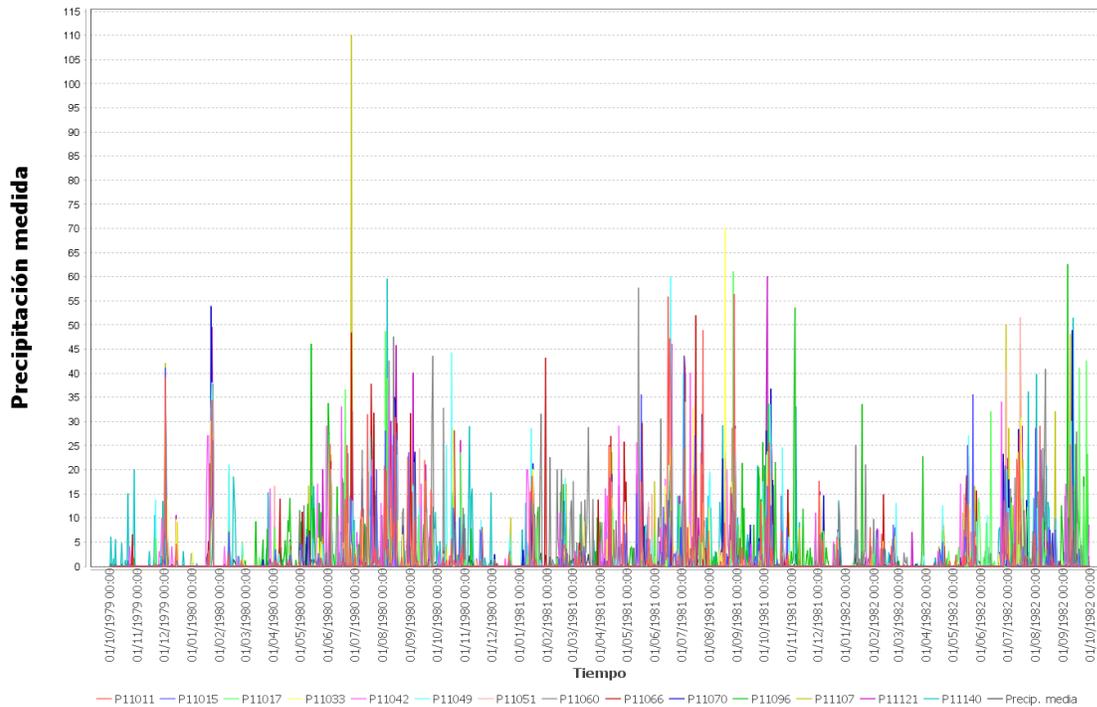


Figura 5. Precipitaciones medias (mm) en las estaciones meteorológicas usadas como *inputs* en el periodo de calibración del modelo TETIS.

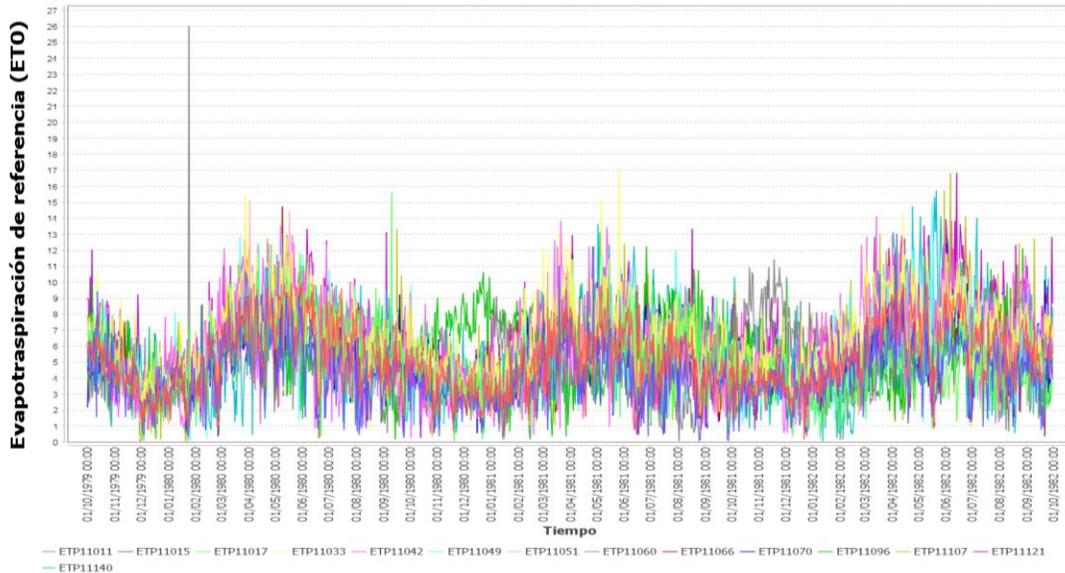


Figura 6. Tasas de evapotranspiración diarias (mm/día) usadas como *inputs* en el periodo de calibración del modelo TETIS.

La evaluación de los efectos del cambio climático y la variabilidad climática se ha llevado a cabo a través de tres escenarios de precipitación propuestos. Estos escenarios se han establecido considerando la condición más crítica en la región que es la disminución de las precipitaciones partiendo de la condición simulada en el periodo de calibración (tabla 3). Es importante comentar que el escenario futuro 1 considera un 75% de la precipitación actual, el escenario futuro 2 un 50% y el escenario futuro 3 sólo un 25%.

Tabla 3. Disponibilidad actual y futura de la presa Ignacio Allende según los escenarios futuros propuestos.

| Condiciones        | Precipitación (mm) | Volumen observado (Hm <sup>3</sup> ) | Volumen simulado (Hm <sup>3</sup> ) |
|--------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Actual             | 1,466.44           | 173.32                               | 174.29                              |
| Escenario futuro 1 | 1,099.83           |                                      | 31.58                               |
| Escenario futuro 2 | 733.22             |                                      | 1.34                                |
| Escenario futuro 3 | 366.61             |                                      | 0.00                                |

Los resultados muestran que, si sólo se precipitará un 25% de la lluvia actual, el volumen de escurrimiento es nulo. Es decir, bajo el escenario futuro 3 y la hidrodinámica de la cuenca, la presa no recibiría escorrentía superficial. Al analizar el resto de los escenarios se puede observar reducciones significativas del 82% (condición actual vs escenario futuro 1) y del 96% (escenario futuro 1 vs escenario futuro 2) en los volúmenes de entrada a la presa Ignacio Allende.

## Conclusión

Los resultados preliminares de esta investigación muestran que de continuar con las emisiones de CO<sub>2</sub> y las acciones que deterioran el ambiente, las fuentes de abastecimiento superficial se verán afectados seriamente por los efectos del cambio climático y la variabilidad climática. También se ha podido observar la alta sensibilidad de la presa Ignacio Allende a la hidrodinámica de la cuenca de aportación. Y con ello, posibles consecuencias sociales y económicas; no solo en la zona de estudio, sino en toda la región. Finalmente, a pesar de que los resultados proyectan efectos significativos estos deberán ser validados a través de más simulaciones y mejoras al modelo hidrológico.

## Agradecimientos

A la Universidad de Guanajuato y al órgano colegiado a cargo de los veranos de investigación UG-2021 por la oportunidad y el financiamiento para desarrollar esta investigación.

## Referencias

- DOF (2009b). Programa especial de cambio climático 2009–2012. Diario Oficial de la Federación.
- Francés, F., Vélez, J. I., Vélez, J. J. (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 332(1), 226–240.
- GIMHA (2020). Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v.9. *Valencia España*. UPV.
- IEE, PROPAEG, SDES, SEDESHU, SDA, SSP, SSG, SEG, CEAG, CONCYTEG (2012). Programa Estatal de Cambio Climático Guanajuato. *Guanajuato, México*. Gobierno del Estado de Guanajuato.
- Martínez, A. (2021). Evaluación de la vulnerabilidad de un sistema hidrológico ante los efectos del cambio climático y de uso de suelo. Tesis de Maestría, 1, 254.
- Orozco, I., Martínez, A., Ortega, V. (2020). Assessment of the water, environmental, economic and social vulnerability of a watershed to the potential effects of climate change and land use change. *Water*, 12(6).