



El cambio climático y sus potenciales impactos en la hidrología y sedimentología de la cuenca del Río Turbio.

Alemán Ramírez Christopher Sebastián
Herrera Arellano Mauro
Ramos castillo Luis Alberto
Orozco Medina Ismael
Universidad de Guanajuato, División de
Ingenierías, Departamento de
Ingeniería Geomática e Hidráulica
i.orozco@ugto.mx

Resumen

Ante la incertidumbre de la disponibilidad actual y futura del recurso hídrico en el Estado de Guanajuato. Resulta de gran relevancia desarrollar nuevas metodologías basadas en modelo matemáticos que contribuyan a garantizar el abastecimiento actual de las demandas y la seguridad hídrica futura. Con base en lo anterior, este proyecto propone una nueva metodología que acopla un modelo hidrológico, un submodelo sedimentológico y un modelo global del clima para evaluar los efectos del cambio climático en una subcuenca del río Turbio. Los resultados obtenidos muestran efectos significativos en los flujos de infiltración y percolación. Estos últimos relacionados directamente con la recarga del acuífero y la disponibilidad hídrica. Además de un aumento en la producción y transporte de sedimentos.

Abstract

The uncertainty in the current and future availability of water resources in the State of Guanajuato, makes new methodologies based on mathematical models have great relevance. This is because they can contribute to guarantee the current



supply of demands and future water security. Therefore, this project proposes a new methodology that combines a hydrological model, a sedimentological submodel and a global climate model to assess the effects of climate change in a sub-basin of the Turbio river. The results obtained show significant effects on infiltration and percolation flows. The latter directly related to groundwater and water availability. In addition to an increase in the production and transport of sediments.

Palabras clave: TETIS, CMIP5, cambio climático, cambio de uso de suelo, erosión y transporte de sedimentos.

Introducción

Ante la incertidumbre de la disponibilidad actual y futura del recurso hídrico en el Estado de Guanajuato y su variación espaciotemporal, este proyecto propone desarrollar una metodología para evaluar la disponibilidad hídrica considerando el cambio climático para tomar las acciones preventivas que garanticen el abastecimiento de las demandas actuales y la seguridad hídrica futura. El proyecto ha sido planteado bajo la hipótesis de que una metodología multidisciplinar en la que la modelación matemática adquiere el mayor protagonismo podrá contribuir en la toma de decisiones para prever y mitigar los efectos del cambio climático a través una gestión integral y eficaz del recurso hídrico que garantice el desarrollo económico y la conservación del medio ambiente en el Estado de Guanajuato.

El área de estudio seleccionada es una subcuenca de la cuenca del Río Turbio (Figura 1), ubicada al suroeste del estado de Guanajuato (60%) y al noreste del estado de Jalisco (40%), México. La subcuenca del Río Turbio comprende un área de 2,983.35 km².

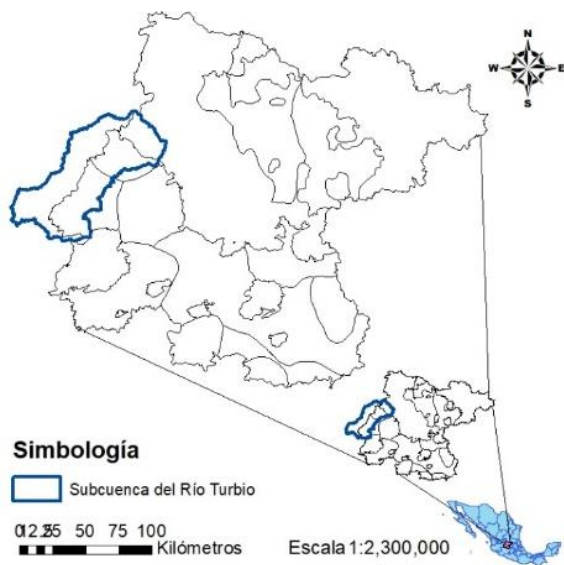
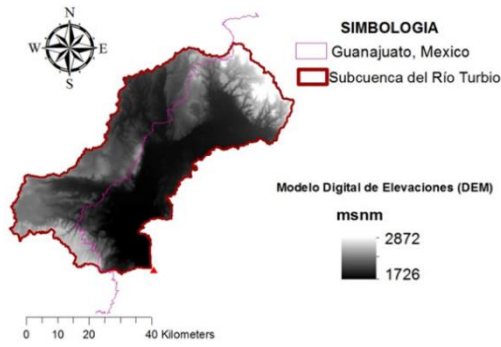


Figura 1. Ubicación de la subcuenca del Río Turbio usada como caso de estudio en el presente proyecto.

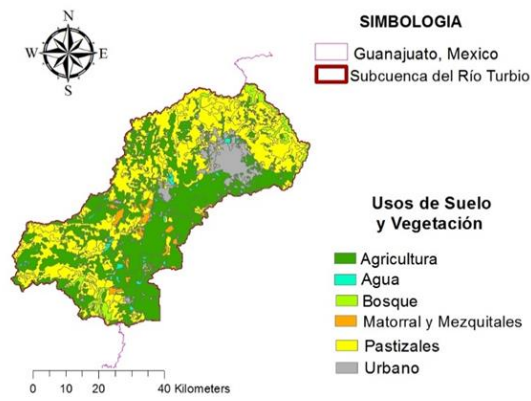
La subcuenca se ubica entre las elevaciones 1,726 msnm y 2,872 msnm (obtenidas del Modelo Digital de Elevaciones con tamaño de celda de 90 metros, figura 2a), sus precipitaciones acumuladas medias anuales varían entre 680 mm y 969 mm (Figura 3). En la cuenca el 90% de la precipitación anual ocurre entre los meses de junio a septiembre. La temperatura mínima media en la subcuenca es de 10.69 °C y la temperatura máxima media es de 27.12°C.

La ocupación de suelo en la subcuenca obtenida usando la información geográfica de la Serie 6 (2016) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de México y escala 1:250, 000 es Agrícola (52.62%), Agua (1.07%), Bosque (2.90%), Mezquites y Matorrales (1.17%), Pastizales (38.41%) y urbano construido (3.82%). En el caso de esta última el mayor porcentaje corresponde a la ocupación de la Ciudad de León (Figura 2b).

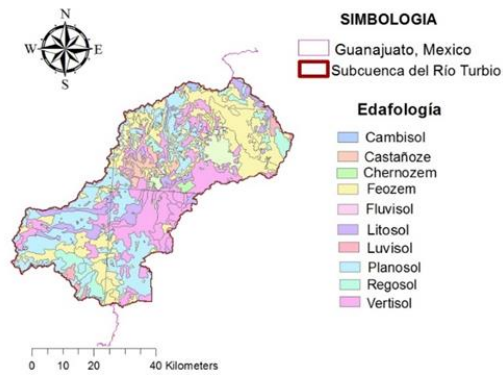
Por otro lado, los suelos en la subcuenca están compuestos principalmente de Vertisoles, Regosoles y Feozem, con altos contenidos de arcilla que se traduce en bajas eficiencias en la capacidad de infiltración (Figura 2c). Finalmente, la subcuenca presenta una geología en la que predominan las rocas ígneas extrusivas además de una importante presencia de areniscas (Figura 2d).



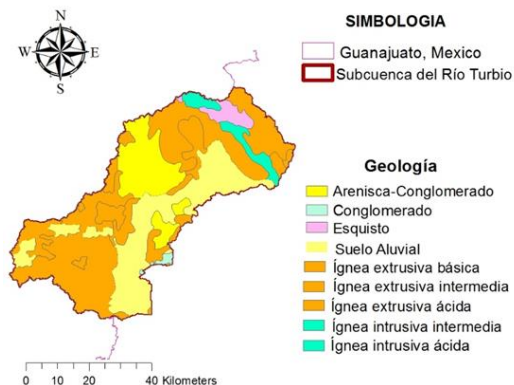
a)



b)



c)



d)

Figura 2. a) Modelo Digital de elevaciones (DEM), b) Uso de suelo y vegetación, c) Edafología y d) Geología.

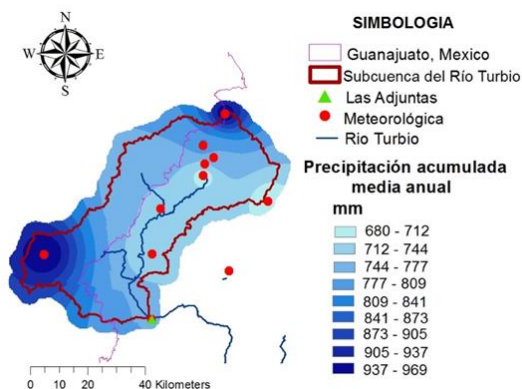


Figura 3. Distribución de precipitaciones acumuladas medias anuales (periodo: 2012-2014).

Objetivos

Diseñar una metodología para evaluar la disponibilidad del recurso hídrico actual y futuro en una cuenca hidrográfica del Estado de Guanajuato. Lo anterior, desde un punto de vista multidisciplinario considerando el cambio climático.

Justificación

Al ser el agua una necesidad humana básica con impactos en la salud, la equidad de género, la educación, la pobreza y el desarrollo sostenible del Estado de Guanajuato. Resulta esencial garantizar las diferentes demandas de agua actuales y futuras de acuerdo a lo establecido en el Plan Nacional de Desarrollo



2013-2018. Es por ello, que los resultados obtenidos en este proyecto contribuirán en el gran desafío del acceso al agua proponiendo acciones a corto y largo plazo para una mejor gestión de los recursos hídricos beneficiando directamente a los sectores Público, Privado y Social del Estado. Además, de impactar con la formación de recursos humanos de calidad que beneficien con sus conocimientos a la sociedad.

Metodología

La metodología diseñada para el presente estudio incluye el uso de datos hidrometeorológicos a escala diaria obtenidos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de México. Un modelo hidrológico distribuido, un Modelo Global del Clima (MGC) y los escenarios de cambio climático RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (Stocker et al., 2013). Los pasos seguidos en la implementación de la metodología propuesta se pueden observar en la figura 4.



Figura 4. Diagrama de flujo de los pasos seguidos en la implementación de la metodología.

Modelo hidrológico

El modelo matemático seleccionado ha sido el modelo hidrológico distribuido TETIS y su submodelo de sedimentos, con parámetros físicamente basados (Francés y Múnera, 2008). Este modelo ha sido desarrollado en el Instituto de



Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), de la Universitat Politècnica de València, España.

El modelo TETIS simula los principales procesos del ciclo hidrológico a través de una conceptualización de tanques (Figura 5).

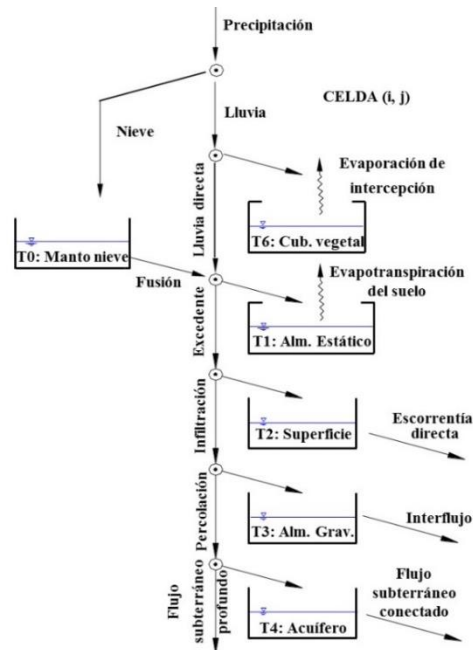


Figura 5. Esquema conceptual de tanques del movimiento vertical de nivel de celda del modelo TETIS (Ruíz-Pérez et al., 2016).

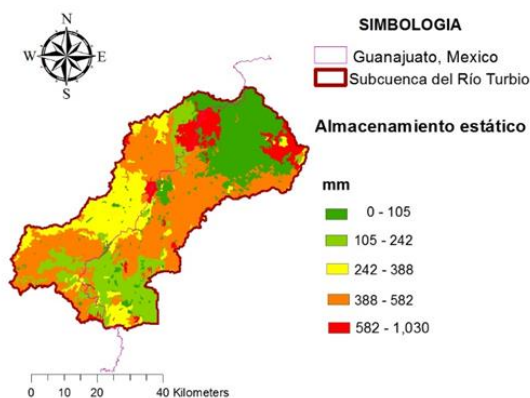
Cada tanque representa el almacenamiento y movimiento vertical del agua en ladera (manto de nieve, estático, de superficie y gravitacional), cauce y acuífero (Ruíz-Pérez et al., 2016).

El modelo TETIS considera para la representación de los diferentes procesos de una cuenca un total de nueve parámetros hidrológico. Los cuales son calibrados automáticamente, a través de nueve factores correctores (FCs). En la calibración automática el modelo TETIS utiliza el algoritmo de optimización *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) de la Universidad de Arizona (SCE-UA), propuesto por Duan et al. (1992) y modificado por Sorooshian et al. (1993). Asimismo, se ha usado como función objetivo el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (Merz y Blöschl, 2004), que compara los caudales observados (Q_{obs}) y simulados (Q_{sim}) a través de la ecuación siguiente:

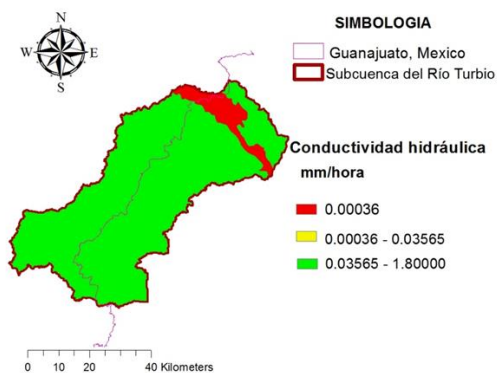


$$NSE=1-\frac{\sum_{t=1}^n(Q_{obs(t)}-Q_{sim(t)})^2}{\sum_{t=1}^n(Q_{obs(t)}-\bar{Q}_{obs(t)})^2} \quad (1)$$

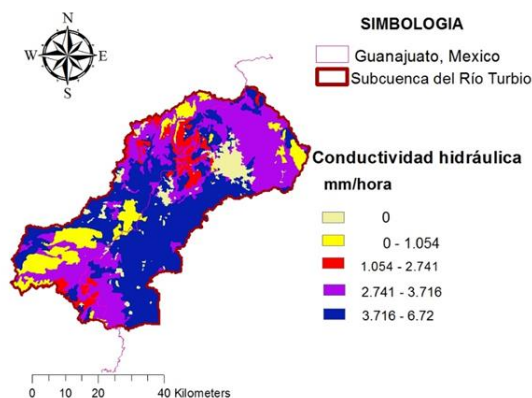
Los parámetros físicos del modelo fueron construidos a partir del Modelo Digital de Elevaciones (DEM), la cubierta vegetal, el uso de suelo, edafología y geología obtenidos de INEGI. En la figura 6 se presentan los tres parámetros principales del modelo TETIS.



a)



b)



c)

Figura 6. Parámetros a) Almacenamiento estático (H_u), b) Conductividad hidráulica del extracto rocoso (K_p) y c) conductividad hidráulica del suelo (K_s).

Submodelo sedimentológico

El submodelo de sedimentos en TETIS está basado en la formulación desarrollada en el modelo CASC2D-SED. El modelo considera los procesos de ladera (Figura 7), los procesos en cárcavas y cauces. Además, separa las partículas de sedimentos en tres categorías de tamaño, arena, limo y arcilla.

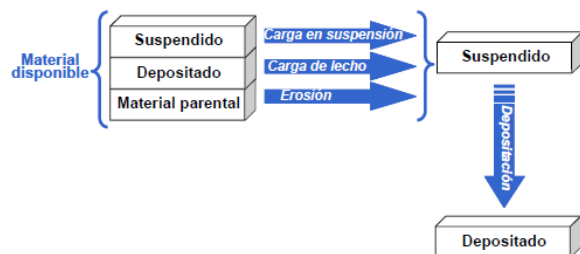


Figura 7: Conceptualización de los procesos en ladera del submodelo de sedimentos de TETIS.

El submodelo de sedimentos utiliza los parámetros de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE por sus siglas en inglés), introducidos en tres mapas de parámetros: factor de cobertura y manejo (C), factor de erodabilidad del suelo (K) y el factor de prácticas de soporte (P) (Figura 8). Además de los mapas de porcentaje de arena, limo y arcilla en la capa de suelo.

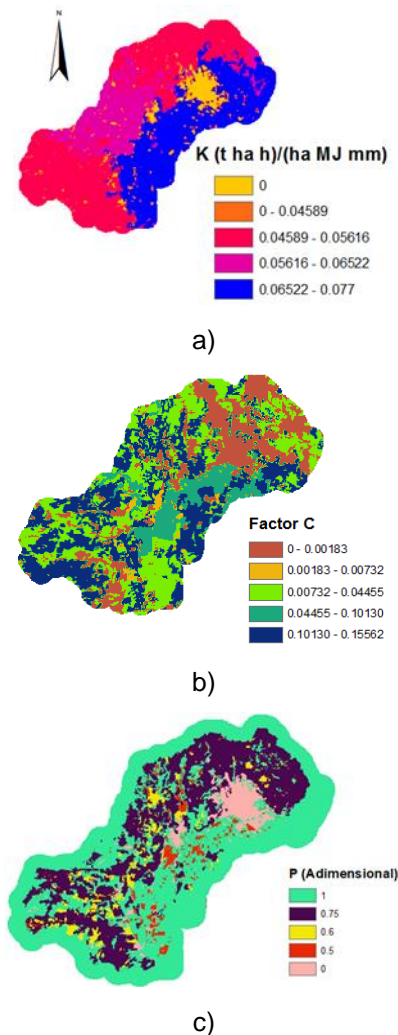


Figura 8: Parámetros del submodelo de sedimentos: a) parámetro K, b) parámetro C y c) parámetro P.

Modelo y escenarios climáticos

En las predicciones de las variaciones futuras de las precipitaciones y temperaturas correspondientes al paso 3 de la metodología propuesta, se han seleccionado los Modelos Globales del Clima (MGC) del Proyecto Inter-Comparación de Modelos Acoplados-fase 5 (CMIP5). Lo anterior debido a que el CMIP5 ha sido uno de los métodos más usados desde finales de los ochenta (Giorgetta et al., 2013), al considerar un total de 18 GCMs de manera conjunta para realizar las predicciones (Neelin et al., 2013). Además de los modelos Globales del Clima (MGC) se emplean los escenarios de cambio climático RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 del IPCC (Stocker et al., 2013).



Resultados

La calibración del modelo hidrológico se ha realizado comparando los datos diarios de caudales observados en la estación Las Adjuntas, ubicada en la desembocadura de la subcuenca del Río Turia (Figura 3). El período de calibración usado ha sido de dos años hidrológicos comprendido del 01 de octubre de 2012 al 30 de septiembre de 2014. Los resultados muestran una aproximación aceptable del modelo hidrológico TETIS en la reproducción de los caudales observados del sistema (Figura 9). La eficiencia obtenida ha sido un NSE de 0.75. Sin embargo, se continúa realizando calibración con la finalidad de mejorar la eficiencia del modelo y obtener los parámetros efectivos robustos capaces de simular adecuadamente tanto los años húmedos como los años secos del área de estudio.

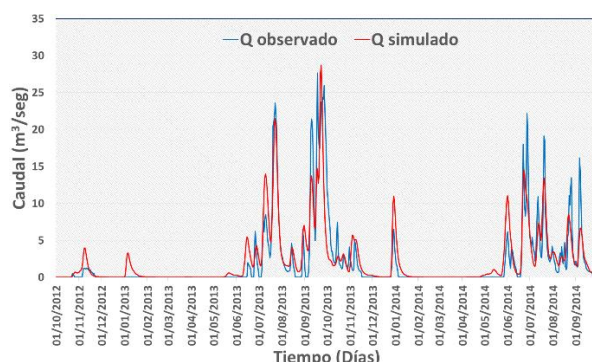


Figura 9. Muestra de los resultados obtenidos en calibración por el modelo TETIS en la estación de control Las Adjuntas.

Una vez calibrado el modelo se han llevado a cabo las predicciones de las variaciones de la precipitación y la temperatura para el período octubre 2048 a septiembre 2050. Los resultados obtenidos con los modelos CMIP5 pronostican una disminución significativa de las precipitaciones para los escenarios climáticos del IPCC (Figura 10). Lo mismo se puede observar en el caso de los pronósticos para las temperaturas (Figura 10).

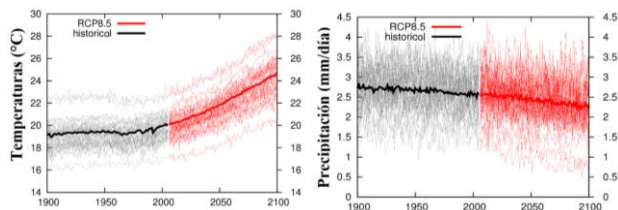


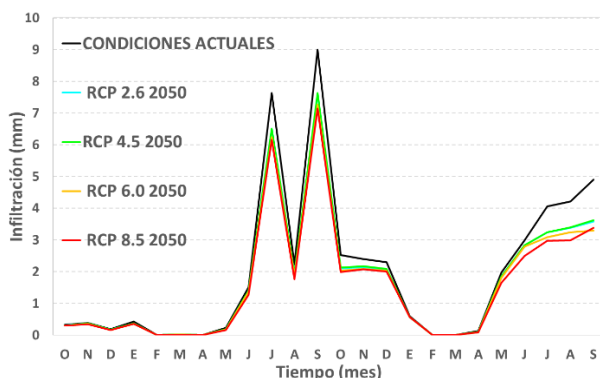
Figura 10. Estimaciones históricas y proyecciones de las precipitaciones y las temperaturas obtenidas con el CMIP5 y los escenarios del IPCC.

Los pronósticos en las modificaciones de la precipitación y la temperatura a través de los 18 MGCs, se pueden traducir a través de variaciones futuras medias de estas variables para los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 (Tabla 1).

Tabla 1. Tasas medias de precipitación y temperatura obtenidas con el CMIP5 para los escenarios del IPCC.

Variables	Proyecciones GCM-IPCC (mm/d y °C) (período octubre 2048-septiembre 2050)			
	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
Precipitación (mm/año)	-0.25	-0.5	-1.0	-2.0
Temperatura (°C)	+1.172	+2.0093	+2.6264	+4.1439

Al modificarse a través de los valores de la tabla 1 las variables de precipitación y temperatura del archivo *input* y simulando el modelo TETIS calibrado en el período de 01 de octubre de 2048 al 30 de septiembre de 2050 se han podido evaluar los impactos del Cambio Climático en los flujos y almacenamientos de la subcuenca. Los resultados muestran que los mayores efectos se presentan en la infiltración y la percolación que repercuten directamente en la recarga del acuífero con una disminución del orden el 34% respecto de la recarga del acuífero del período de control (Figura 11).



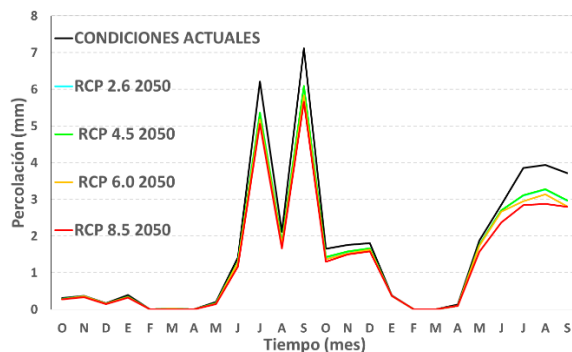
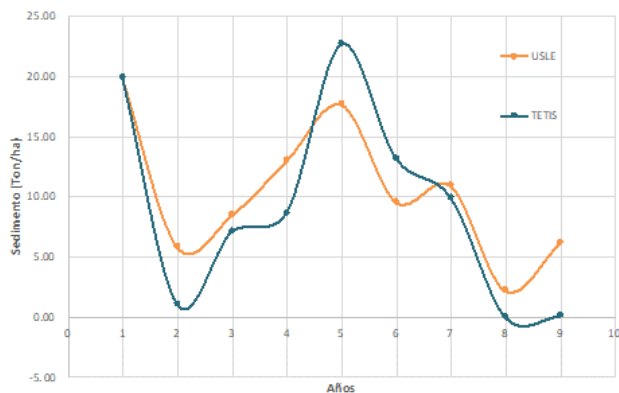


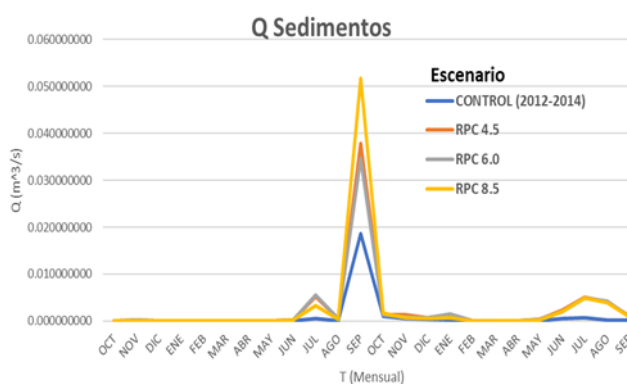
Figura 11. Impacto del Cambio Climático sobre los flujos medios de infiltración y percolación en el 2050 según los cuatro escenarios del IPCC.

Con lo anterior, al cambiar la hidronímica del sistema aumentado su potencial en la respuesta hidrológica, se generan mayores crecidas, así como una mayor probabilidad de inundación aguas abajo donde se ubican las áreas de cultivo. Es importante realizar más pruebas y mejorar los resultados para corroborar los resultados preliminares que se presentan en el presente estudio.

El modelado del transporte de sedimentos se llevó a cabo en el año 2035 debido a que en este caso se usaron imágenes de lluvia del producto Multi Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP). Una vez calibrado el submodelo de sedimentos usando para ello como valor observado los resultados de la Ecuación Universal de la Pérdida del Suelo (USLE, por sus siglas en inglés) [Figura 12]. Los resultados obtenidos muestran un aumento del transporte total de sedimentos en la cuenca (Figura 12b). Se puede observar un aumento gradual en todos los escenarios, siendo el aumento más significativo en el RCP8.5 (Figura 12b). El cual responde al comportamiento de las lluvias que se presentan con más frecuencia durante los meses de otoño-invierno.



a)



b)

Figura 12. Modelación de los posibles efectos del cambio climático en la sedimentología de la subcuenca para el año 2035: a) resultados en la calibración y b) caudales bifase.

El posible impacto en la disponibilidad hídrica tiene que ver en que al aumentar la producción y transporte de sedimentos las fuentes reducirán su capacidad de almacenamiento afectando la disponibilidad superficial. Al aumentar el transporte de sedimentos es posible afectaciones en la capacidad de infiltración del suelo por el arrastre de materiales más impermeables.

Conclusiones

Los resultados obtenidos al combinar un modelo hidrológico distribuido, un submodelo de sedimentos, un modelo global del clima y escenarios climáticos muestran que el área de estudio presenta un mayor riesgo por avenidas máximas extraordinarias e inundaciones producto de los efectos del Cambio Climático además de un mayor transporte de sedimentos teniendo una afectación en la



capacidad de almacenamiento de las presas. En esta nueva dinámica hidrológica de la subcuenca habrá menor infiltración y percolación, afectando directamente la disponibilidad hídrica en el acuífero. Sin embargo, habría que incluir en la modelación los cambios de uso de suelo y realizar más modelaciones que permitan reafirmar la anterior conclusión.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido apoyada por la Dirección General de Educación Superior Universitaria (DGESU) de la Secretaría de Educación Pública a través de su Programa para el Desarrollo Profesional Docente (FOLIO PRODEP: UGTO-PTC 613).

Referencias

- Arnell, N. W., Gosling, S. N. (2013). *“The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale”*. *Journal of Hydrology*, Vol. 486, pp. 351–364.
- Arnell, N. W., Reynard, N. S. (1996). *“The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain”*. *Journal of Hydrology*, Vol. 183(3–4), pp. 397–424.
- Bobba, A. G. Singh, V. P., Jeffries, D. S., Bengtsson, L. (1997). *“Application of a watershed runoff model to north-east pond river, Newfoundland: To study water balance and hydrological characteristics owing to atmospheric change”*. *Hydrological Processes*, Vol. 11(12), pp. 1573–1593.
- Burlando, P., & Rosso, R. (2002). *“Effects of transient climate change on basin hydrology. 2. Impacts on runoff variability in the Arno River, central Italy”*, *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 1177–1199.
- Campos-Aranda, D. F. (2000). *“Calibraciones y aplicación del modelo de Crawford modificado en la zona norte de la cuenca del río Lerma, en Guanajuato”*. *Ingeniería Hidráulica En México*, Vol. 15(2), pp. 63–74.
- Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, V. (1992). *Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models*. *Water Resources Research*, Vol. 28(4), pp. 1015–1031



- Döll, P., Zhang, J. (2010). *“Impact of climate change on freshwater ecosystems: a global-scale analysis of ecologically relevant river flow alterations”*. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 14(5), pp. 783–799
- Döll, P., Schmied, H. M. (2012). *“How is the impact of climate change on river flow regimes related to the impact on mean annual runoff? A global-scale analysis”*. *Environmental Research Letters*, Vol. 7(1), p. 14037.
- Francés, F., Múnera, J.C., (2008). *“Modelación Hidrológica Distribuida de la Cuencas de los Ríos Saja Besaya con el Modelo TETIS V.7.2, Para Estimación Probabilística de Avenidas en los Períodos de Estiaje”*. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia.
- Fung, F., Lopez, A., New, M. (2010). *“Water availability in +2°C and +4°C worlds. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A.: Mathematical, Physical and Engineering Sciences”*. *The Royal Society*, Vol. 369(1934), pp. 99–116.
- Giorgetta, M.A., Jungclaus, J., Reick C.H., Legutke, S., Bader J., Böttinger, M., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H.D., Ilyina, T., Kinne, S., Kornblueh, L., Matei, D., Mauritsen, T., Mikolajewicz, U., Mueller, W., Notz, D., Pithan, F., Raddatz, T., Rast, S., Redler, R., Roeckner, E., Schmidt, H., Schnur, R., Segschneider, J., Six, K.D., Stockhause, M., Timmreck, C., Wegner, J., Widmann, H., Wieners, K.H., Claussen, M., Marotzke, J., Stevens, B. (2013). *“Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5”*. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, Vol. 5, pp. 572–597.
- González-Santana, O. (2013). *“El reto de la gestión del agua en las regiones de México ante los efectos del cambio climático: el caso de la cuenca del río Turbio”*. *Cuadernos de Geografía-Revista Colombiana de Geografía*, Vol. 22(2), pp. 125–144.
- Jones, J. A. (2011). *“Hydrologic responses to climate change: Considering geographic context and alternative hypotheses”*. *Hydrological Processes*, Vol. 25(12), pp. 1996–2000.



- Martínez, L. j., Rodríguez, I., & Ibañez, L. (2015). *“Calibración del modelo swat, en la cuenca del río turbio, Guanajuato, México”*. Congreso Iberoamericano Sobre Sedimentos Y Ecología, Querétaro, México.
- Medici, C., Latron, J., Llorens, P., Gallart, F., & Francés, F. (2016). *“Investigating the behaviour of a small Mediterranean catchment using three different hydrological models as hypotheses”*, *Hydrological Processes*, Vol. 30, pp. 2050–2062.
- Merz, R., Blöschl, G. (2004). *“Regionalisation of catchment model parameters”*. *Journal of Hydrology*, Vol. 287(1–4), pp. 95–123.
- Neelin, J.D., Langenbrunner, B., Meyerson, J.E., Hall, A., Berg, N. (2013). *“California Winter Precipitation Change under Global Warming in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 Ensemble”*. *J. Climate*, Vol. 26, pp. 6238–6256.
- Ruiz-Pérez, P, G., Medici, C., Latron, J., Llorens, P., Gallart, F., & Frances, F. (2016). *“Investigating the behaviour of a small Mediterranean catchment using three different hydrological models as hypotheses”*. *Hydrological Processes*, Vol. 30(13), pp. 2050–2062.
- Ruiz-Villanueva, V. Stoffel, M., Bussi, G., Francés, F., Bréthaut, C. (2014). *“Climate change impacts on discharges of the Rhone River in Lyon by the end of the twenty-first century: model results and implications”*. *Regional Environmental Change*, Vol. 15(3), pp. 505–515