

Estado del arte

La cuenca del Río Bravo es una de las más estudiadas, existe una gran variedad de proyectos desarrollados en esta cuenca bajo diferentes enfoques y disciplinas. Dichos trabajos se desarrollan tanto para la cuenca completa como también para secciones específicas de la misma. Para efectos de este estudio, fue necesario realizar una exploración en la literatura académica que fuera de lo general a lo específico. Es decir, se realizó la revisión y exploración de la información disponible para la cuenca del Río Bravo y posteriormente para el área de estudio: la cuenca del Río Conchos. En la exploración, se utilizaron varias combinaciones de palabras en buscadores especializados para capturar estudios de la región que se relacionaran con la calidad del agua, los modelos y/o las simulaciones hidrológicas del río, los caudales ecológicos, y el manejo de las cuencas. Según lo observado, la mayoría de los trabajos encontrados se desarrollan bajo esquemas de hidrología, conservación, y gestión integrada de la cuenca del Río Bravo. Debido al gran número de resultados en las búsquedas, se decidió acotar la revisión a estudios que involucraran el uso del mismo software seleccionado para este estudio: el Sistema de Evaluación y Planificación del Agua (WEAP).

Los resultados de la revisión bibliográfica, presentados a continuación, incluyen la explicación de las herramientas disponibles para la planificación del recurso hídrico y la simulación de calidad del agua en ríos. Así mismo se presenta la justificación de la selección del software WEAP para este estudio, discutiendo los alcances y limitaciones del mismo. Posteriormente, se describen los estudios revisados que comprenden alcances internacionales y regionales haciendo uso de aplicaciones WEAP. Dichos estudios se perfilan bajo distintos

enfoques y desarrollan trabajos de calidad del agua, caudales ecológicos, y modelos hidrológicos con diferentes consideraciones. Finalmente, se presenta el reporte de un modelo de calidad del agua desarrollado para la cuenca del Río Bravo/Grande, que sería el principal antecedente de este trabajo.

Herramientas de planificación y simulación del recurso hídrico

WEAP es un software desarrollado por el Instituto Ambiental de Estocolmo (SEI por sus siglas en inglés) que permite la modelación de sistemas hídricos bajo un ambiente gráfico y una interfaz amigable con el usuario. Esta herramienta permite la representación de sitios de demanda del agua tanto naturales como antropogénicos, sistemas de abastecimiento y tratamiento de agua, las actividades relacionadas al uso del recurso hídrico, así como las interacciones entre los usuarios del mismo. Todo lo antes mencionado se muestra en un mismo esquema gráfico. Además, se pueden agregar componentes como la representación hidrológica de la cuenca, la distribución del agua, la operación de sistemas hidroeléctricos, factores físicos, almacenamiento, áreas de regadío, ciudades e interdependencias. El enfoque integral de WEAP permite la consideración de aspectos de planificación que son importantes para los proyectos como lo es la gestión de demandas, la evaluación de estrategias de impacto o mitigación, análisis financieros y análisis de calidad de agua. En los escenarios de un modelo WEAP se establecen enfoques actuales y futuros bajo diferentes regímenes considerando distintas condiciones, y sus resultados se presentan en varios formatos que dependen del uso final que se le quiera dar. Entre sus ventajas, además de sus capacidades flexibles de modelado, se destaca su capacidad de interactuar con otros softwares y herramientas útiles de manejo de información como lo son los sistemas de información

georreferenciada (SIG) y su conexión con Excel vía programación *Visual Basic for Applications* (VBA). Además, es un software que se condona a organizaciones académicas, gubernamentales y no lucrativas para estudios en países en vías de desarrollo.

Por otra parte, también existen varios softwares para la simulación y análisis de calidad del agua como lo son QUAL2K, QUASAR, MIKE-II y CE-QUAL-W2 que permiten realizar modelos muy detallados y comprensivos de la calidad del agua en ríos (Hammed Assaf & Saadeh, 2008). Sin embargo, la mayoría considera en poca extensión el análisis de políticas de gestión como un todo y algunos no se pueden vincular con un modelo hidrológico. De entre los softwares disponibles, el software QUAL2K es uno de los más utilizados, además de ser el respaldado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés). El modelo QUAL2K, que reemplaza las versiones anteriores de QUAL2E, analiza el comportamiento de la calidad del agua considerando parámetros contaminantes convencionales como el nitrógeno, fósforo, oxígeno disuelto (OD), demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda de oxígeno sedimentable, algas, pH, periphyton, y patógenos (Sustainable Development Institute, n.d.). En comparación, el modelo WEAP sólo considera cuatro parámetros: demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda de oxígeno (OD), sólidos suspendidos totales (SST) y concentración de salinidad, además de efectos de la temperatura. En el modelo QUAL2K se considera el flujo de agua como unidimensional y permanente, y al cauce como completamente mezclado horizontal y verticalmente (Jaramillo et al., 2016). El modelo emplea un balance de calor y temperatura en función de datos meteorológicos introducidos;

una de las complicaciones relacionada a esto es que se requiere de mucha información para ingresar al sistema.

El modelo WEAP se selecciona de entre todos los softwares debido a la importancia de la relación con el sistema hidrológico y las herramientas de planeación. También porque simula los parámetros mínimos requeridos en la normatividad mexicana que permiten realizar un análisis efectivo de calidad del agua en el río. Adicionalmente, WEAP ha sido utilizado ampliamente alrededor del mundo para aplicaciones similares al del estudio en cuestión, lo que da veracidad y confianza en cuanto a su uso.

[Análisis de estudios previos.](#)

En la página oficial del software se presenta una base de datos de las aplicaciones que se han tenido del mismo e incorpora información de los estudios que se han realizado alrededor del mundo. Por lo tanto, en esta etapa se involucró la revisión detallada de cada uno de los estudios contenidos en la lista y su selección según el trabajo realizado en el área de estudio o si eran estudios bajo la temática de calidad del agua. De esta forma, se llevó a cabo la revisión de la literatura para conceptualizar el marco de referencia de este trabajo.

Entre dichos estudios, se encontró el desarrollo y aplicación de un sistema integrado de toma de decisión de calidad del agua haciendo uso de un modelo WEAP en la cuenca alta del Río Litani en el Líbano (Hamed Assaf & Saadeh, 2004). El modelo representa los parámetros globales de la cuenca y objetos que figuran en ella como plantas de tratamiento, flujos de retorno y sitios de demanda. Haciendo uso de la modelación en WEAP, se establecen escenarios que simulan las condiciones actuales y los esquemas de manejo

alternativos propuestos de calidad del agua. Las propuestas se evaluaron en base al comportamiento de la demanda biológica de oxígeno que es uno de los principales parámetros de calidad del agua. Dos planes maestros fueron considerados, el primero es el plan del *Council for Development and Reconstruction* (CDR) que involucra la construcción de 7 plantas secundarias de tratamiento de aguas residuales con capacidad total de 118,530 m³/día y redes de drenaje de aguas residuales para la mayoría de las ciudades de la cuenca, teniendo una cobertura de aproximadamente 65 ciudades con una población total de 63,000 habitantes. El segundo plan es la iniciativa de calidad del agua propuesta por el *United States Agency for International Development* (USAID), que ha retenido los servicios del *Camp Dresser and McKee* (CDM) para evaluar la viabilidad de la descentralización del tratamiento de aguas residuales. Este plan impulsa la creación de seis pequeñas plantas de tratamiento con una capacidad de 14,840 m³/día para servir a 11 ciudades con una población total de 51,550 habitantes. Los conceptos de modelación, simulación, calibración, impactos bajo distintas condiciones hidrológicas, y análisis de costos-efectividad de las políticas de tratamiento de aguas se analizan en estudios similares (Hammed Assaf & Saadeh, 2008). A pesar de que estos estudios se encuentren basados en contextos muy diferentes a los propuestos en este estudio, muestran claramente los alcances de un modelo WEAP para aplicaciones y análisis de calidad del agua en un río.

Los demás trabajos revisados hacen referencia directa a la región del Río Bravo. Se encontraron trabajos en donde se desarrollan modelos hidrológicos en WEAP para su sub-cuenca del Río Conchos (Ingol-blanco, Asce, Mckinney, & Asce, 2013); en donde se presenta la modelación desarrollada haciendo uso del esquema de contabilidad y humedad

unidimensional de dos capas del suelo que se incluye en el modelo del Sistema de Evaluación y Planificación del Agua. En dicho proceso de modelación se utilizó un período de 10 años para su calibración y validación. El resultado principal es un modelo que representa el comportamiento del río y predice adecuadamente los flujos mensuales, anuales y máximos. Información importante fue tomada de este estudio como lo son los métodos de calibración, validación, parámetros de modelación y fuentes de información, para la conceptualización en el desarrollo del modelo en estudio.

En la cuenca del Río Bravo se han desarrollado diversos estudios en torno a la modelación considerando caudales ecológicos, ya que es necesario tomar en cuenta el agua disponible para el medio ambiente. Ante la ausencia de estos caudales surgen implicaciones y efectos importantes a considerar en la gestión del recurso hídrico. Los estudios incluyen desde recomendaciones de operación de embalses, evaluación de políticas de gestión, hasta análisis hidrológicos. Según lo consultado en la literatura, la importancia de los caudales ecológicos ha crecido debido a que las cuencas han sido manipuladas de manera en que las necesidades humanas del recurso hídrico sean cubiertas, dejando atrás o no considerando las necesidades del ecosistema original.

Sandoval-Solis & McKinney (2009) presentan un modelo de análisis del Río Conchos en WEAP que permite determinar la cantidad de agua requerida para proveer al sistema con caudales ecológicos; esto debido a la falta de políticas de gestión ambiental del agua en la cuenca del Río Bravo y la falta de consideración de caudales ecológicos en la gestión integral de la misma. El estudio presenta el estado actual de caudales ecológicos en el tributario bajo criterios de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad. Se utiliza el modelo

WEAP para establecer el escenario base y proponer escenarios donde se incorporen caudales ecológicos. Un punto destacable es la búsqueda del objetivo de cumplimiento de los requerimientos ambientales en la cuenca y la consideración del cumplimiento de las obligaciones de los tratados internacionales y los requerimientos de las actividades humanas de la región (Sandoval-Solis & Mckinney, 2009).

De igual modo, otros estudios se enfocan a analizar estrategias de operación de embalses para la integración de caudales ecológicos en la cuenca del Río Bravo. En uno de ellos se utilizó un modelo de simulación donde se evaluaron cinco regímenes de caudal ecológico que pudieran mejorar el hábitat en la región del Big Bend (Porse, Sandoval-Solis, & Lane, 2015). Además, se presentan los objetivos de los caudales ecológicos junto con tres categorías específicas de caudal. El modelo se basa en condiciones hidrológicas históricas, restricciones físicas y operacionales de los reservorios para optimizar su operación, cumpliendo al mismo tiempo con los requisitos de demanda, necesidades de control de inundaciones y acuerdos en los tratados. En general, el estudio presenta las complejidades que se presentan en la gestión de una cuenca junto con la operación de sus presas. Otro estudio muy similar, en la misma sección del Big Bend, explora la gestión integrada del recurso hídrico bajo políticas de manejo operacional de reservorios con simulaciones de escenarios base y políticas ambientales (Albin, 2010). Se enfoca en los efectos, desviaciones, e implicaciones de la operación de presas en el área; proponiendo una política de manejo con el potencial de sostener funciones ecológicas clave en la sección del Big Bend sin comprometer los objetivos actuales de la gestión del agua. En ese estudio se creó el modelo de planeación del agua Big Bend con la aplicación WEAP, que considera los datos de

operación de las presas, datos históricos de flujos y sitios prioritarios de suministro/demanda en el área.

Entre otros enfoques, se encontró el trabajo colaborativo de modelación para evaluar escenarios de gestión del agua en la cuenca del Río Bravo (Sandoval-solis, Teasley, Mckinney, Thomas, & Patiño-gomez, n.d.). Este trabajo forma parte del “Proyecto de Evaluación Física” (PAP por sus siglas en inglés), un proyecto piloto que fue lanzado en el año 2002 con el objetivo de proponer soluciones y respuestas a problemas presentados en la cuenca. El proyecto se encuentra desarrollado por científicos, académicos y profesionales de México y Estados Unidos, quienes conforman el grupo de expertos que presentan los resultados de sus estudios a instituciones gubernamentales de investigación, agencias no gubernamentales y universidades. El objetivo de su estudio fue construir un modelo de planeación del recurso hídrico que considerara la cuenca del Río Bravo como una entidad completa desde El Paso, Texas hasta el Golfo de México, y también el evaluar escenarios que pudieran ayudar a mejorar la gestión del agua de la misma. El proceso involucró la presentación de diversos trabajos, redacción de reportes, el entrenamiento y la capacitación sobre el funcionamiento del modelo, y la discusión de las políticas propuestas. De este modo, el modelo Río Grande WEAP simula el sistema de asignación del agua, división del recurso entre ambos países, infraestructura, aguas superficiales y recursos hídricos subterráneos tanto para el lado de Estados Unidos como para el de México. Además de utilizarse para ayudar en la resolución de disputas, políticas y tomas de decisiones.

También, como parte del Proyecto de Evaluación Física, Danner, McKinney, Teasley & Sandoval-Solis (2008) presentan un reporte en donde se documenta la construcción del

Modelo WEAP Rio Grande/Bravo, incluyendo la totalidad de la cuenca. En su contenido se explican los datos de entrada del modelo junto con las respectivas demandas y suministros del río. El modelo incluye políticas de operación y representa la distribución de agua para ambos países según sus respectivas demandas, pero sin incluir el análisis de calidad del agua. El suministro que se considera en el modelo proviene de los flujos de sus tributarios, reservorios y almacenaje de agua subterránea. Entre sus características destacables se encuentra que el modelo se construye considerando caudales naturales. Este tipo de caudal representa el flujo histórico del río en la ausencia de algún desarrollo humano, actividades antropogénicas o uso del agua por parte de una población. En otras palabras, son los caudales que existirían o se presentarían en ausencia de los efectos del ser humano. Los caudales naturales serán descritos en detalle y considerados posteriormente en este estudio. En dicho reporte, los autores presentan la segmentación del río en cinco secciones: cuenca alta, Río Conchos, Río Pecos, cuenca media y cuenca baja del Rio Grande/Bravo. También, se presenta un desglose detallado de los puntos de demanda que incluyen sitios de población, sitios de irrigación para la agricultura, usos industriales, usos para la minería, entre otros. El mayor recurso de información fue la geodatabase Rio Grande/Bravo creada a través de la cooperación con el Centro de Investigación en Recursos Hídricos (CRWR por sus siglas en inglés) de la Universidad de Texas en Austin (Danner, Mckinney, Teasley, & Sandoval, 2008). La metodología del reporte fue estudiada en profundidad para su aplicación en el desarrollo de la metodología de modelación de calidad del agua propuesta.

Como una primera aproximación, existe un modelo de calidad del agua con aplicación en WEAP para la cuenca del Río Bravo/Grande desarrollado por la Universidad

de Texas en Austin. Este modelo se basa en el modelo de gestión de agua WEAP Bravo desarrollado por el Proyecto de Evaluación Física (PAP) haciendo uso de datos como demandas, caudales, operación de sistemas, etc. Además, utiliza datos incluidos de la geodatabase hidrológica desarrollada como parte del proyecto “Análisis y modelación de calidad del agua y gestión en la región fronteriza México-Estados Unidos”. Entre sus objetivos se encuentra representar y modelar la concentración de los parámetros de calidad de agua en el río utilizando los conceptos de mezclado simple y el decaimiento de primer orden (Universidad de Texas en Austin, 2009). En su modelo se consideran los parámetros de temperatura, demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y oxígeno disuelto (OD). El modelo buscaba evaluar el comportamiento dinámico de los principales constituyentes de calidad del agua desde El Paso/Cd. Juárez al Golfo de México, teniendo como año de referencia de octubre 1999 a septiembre 2000 (figura 1). Sin embargo, debido a la falta de información requerida por la plataforma WEAP, se simuló solo el tramo en la parte baja de la cuenca que comprende desde la presa Falcón hasta el Golfo de México.

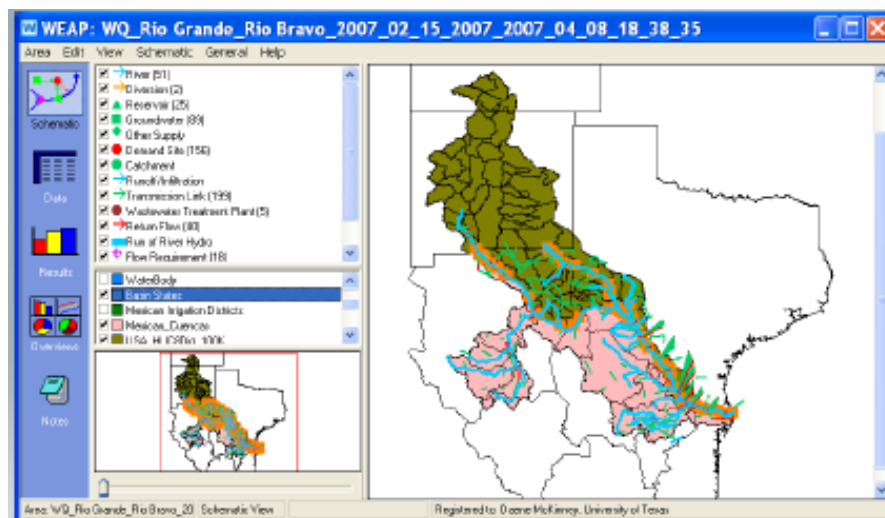


Figura 1. Modelo WEAP Bravo calidad del agua tramo Falcón-Golfo de México (Aparicio, J., 2008)

En el reporte se explica con claridad los fundamentos técnicos y teóricos que respaldan la modelación en WEAP de calidad del agua, incluyendo ecuaciones y métodos. Como se puede observar, el análisis comparativo entre los parámetros históricos de calidad del agua medidos y los simulados en la plataforma WEAP es bastante aceptable como se muestra en la figura 2, donde se analiza el comportamiento de los sólidos disueltos totales. En la modelación, se siguieron los mismos segmentos ya establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) y por la Comisión de Calidad Ambiental de Texas (TCEQ por sus siglas en inglés), considerando también a los ríos tributarios Pecos, Devils, San Felipe, San Juan, y Pesquería. A pesar de que no se considera en la modelación al Río Conchos por falta de información, el modelo de calidad del agua traza una línea útil para generar uno para la cuenca del río Conchos.

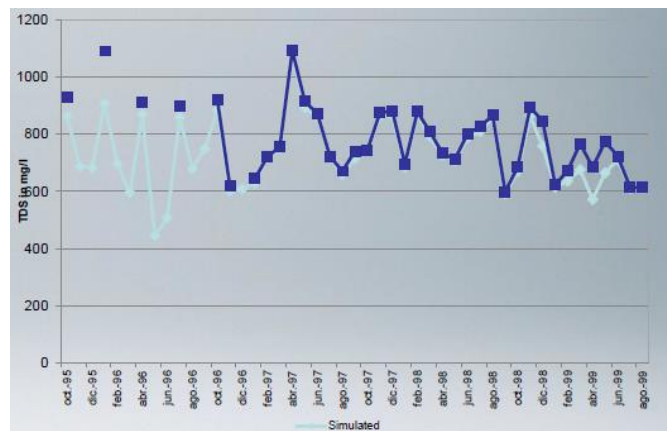


Figura 2. Resultados calibración del Modelo WEAP Bravo calidad del agua tramo Falcón-Golfo de México (Aparicio, J., 2008)

Fuentes de información, metodologías, tutoriales y técnicas de procesamiento de información se toman de este estudio para plantear una propuesta de simulación en la cuenca del Río

Conchos; fungiendo, así como un antecedente para plantear la metodología del modelo a generar en el presente estudio.

Aporte del trabajo a las investigaciones realizadas

Como se ha presentado, existen distintos modelos de planeación para el Río Bravo que han sido construidos bajo diferentes propósitos y en varias plataformas. Entre algunos de los propósitos de estudio se encuentran la resolución de conflictos, análisis de disponibilidad del agua, gestión de sequías, etc. Ahora bien, los modelos de planeación que existen para la subcuenca Río Conchos se encaminan hacia la gestión del agua, gestión de sequías, respuesta lluvia-escorrentía, y la evaluación de efectos de cambio climático en la gestión del recurso hídrico (Sandoval-solis et al., n.d.). Por lo tanto, se ha identificado la inexistencia y necesidad de un modelo que represente detalladamente el comportamiento de la calidad del agua en la cuenca del Río Conchos.

Este trabajo aporta el análisis a los modelos existentes que contemplan la región del río Conchos, bajo un enfoque ambiental que permita plantear una metodología para modelar y evaluar la calidad del agua superficial. Además, incluye la consideración de caudales ecológicos en el río y se destaca la importancia de su consideración dentro del mismo sistema a analizar. El desarrollo de este modelo involucra también el apoyo con sistemas de información geográfica y una búsqueda minuciosa de la información a utilizar. Este estudio pretende ser un estudio complementario a los proyectos que ya se han desarrollado en la región y que permita reflejar las condiciones actuales en cuanto a la contaminación del río. La metodología planteada, para el desarrollo del modelo, presenta la situación del Río

Conchos con información analizada de al menos 10 años posteriores o de diferencia con los modelos ya existentes. Finalmente, este estudio considera y destaca la importancia del cumplimiento de la Norma Mexicana de caudales ecológicos en tributarios para la gestión integral de cuencas.