

MODELACIÓN DEL CURSO ALTO DEL RÍO LERMA (CARL), UTILIZANDO QUAL2KW, CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN Y VARIACIÓN DE NITRÓGENO AMONIAL Y NITRÓGENO COMO NITRATOS

MODELLING OF COURSE LERMA RIVER HIGH (CARL), USING QUAL2KW, CONSIDERING THE DISTRIBUTION AND VARIATION OF AMMONIA NITROGEN AND NITROGEN AS NITRATES

Salinas Tapia, Humberto;¹ Flores Gutiérrez, Leonarda; García Aragón, Juan Antonio; Tejeda, Samuel³ y López Rebollar, Boris²

Resumen:

El Curso Alto del Río Lerma (CARL) se encuentra en una región industrial altamente activa, con importantes niveles de producción agrícola y un acelerado crecimiento industrial. Estudios han comprobado que se ha deteriorado la calidad del agua del CARL, situándolo entre los ríos más contaminados de México. En el presente trabajo se calibró y validó el modelo QUAL2Kw con datos obtenidos experimentalmente en época de estiaje. Se simuló un tramo de 30 km del Río Lerma que va desde el puente de la carretera México-Toluca (cerca de su nacimiento) hasta antes de la presa J.A. Alzate, en lo que se refiere al nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico y nitrógeno como nitritos. La metodología general del trabajo se divide en tres etapas: investigación preliminar, calibración y validación del modelo. Para el nitrógeno amoniacal (NH_4^+), la diferencia entre el valor modelado y el valor observado fue en promedio del 26%, si bien la diferencia es alta se considera que se debe a errores en las mediciones en los tributarios. Otro parámetro que ayuda a distinguir el rendimiento del modelo en el periodo de calibración con el periodo de validación es el RMSE, obteniendo un valor global en la calibración de 4,07 y validación de 3,25, para NH_4^+ , los valores son 9,10 y 4,76 respectivamente. Comparando los valores obtenidos en este trabajo contra los reportados por otros autores, se concluye que con los datos disponibles se logró un buen ajuste del modelo, el cual permitirá plantear escenarios a corto, mediano y largo plazo que sirvan de apoyo en la toma de decisiones.

Palabras clave: modelo; nitrógeno amoniacal; río Lerma; calidad de agua, calibración

Abstract:

The Upper Course of Lerma River (CARL) is a highly active industrial region, with significant levels of agricultural production and accelerated industrial growth. Studies have shown that the quality has deteriorated CARL water, placing as one of the most polluted rivers in Mexico. In this work was calibrated and validated the model QUAL2Kw with data experimentally obtained in the dry period. A simulated of 30 km length of the Lerma River that goes from the bridge of the Mexico-Toluca highway (near its source) to be simulated before the dam JA Alzate, in regard to ammonia nitrogen, organic nitrogen and nitrite nitrogen. The general methodology of work is divided into three stages: preliminary investigation, calibration and validation of the model. For ammonia nitrogen (NH_4^+), the difference between the modeling value and the observed value was in average 26%, although the difference is high is considered to be due to error in measurement on the tributaries. Another parameter that helps distinguish model performance in calibration period with the validation period is the RMSE, getting an overall value of 4.07 in the calibration and validation of 3.25, to NH_4^+ , values are 9.10 and 4.76 respectively. Comparing the values obtained in this work with those reported by other authors, concluded that with the available data was its obtained a good fit of the model, which will permit propose scenarios in the short, medium and long term that support are the decision making.

Keywords: model; ammonia nitrogen; Lerma River; water quality, calibration

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo es indiscutible el incremento del deterioro de la calidad del agua en los ríos. La cantidad de agua disponible en la tierra no aumenta ni disminuye, pero si la población humana crece drásticamente, incrementando la necesidad de este

recurso con calidad adecuada para su consumo. En diversas regiones del mundo es un factor limitante para la salud humana, la producción de alimentos, el desarrollo industrial, el mantenimiento de los ecosistemas naturales y su biodiversidad.

¹ Profesor-Investigador, Centro Interamericano de Recursos del Agua, UAEM, Toluca, Estado de México, México

² Maestro en Ciencias de Agua, Centro Interamericano de Recursos del Agua, UAEM, Toluca, Estado de México, México

³ Profesor-Investigador, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Estado de México, México

E-mail: hsalinast@uaemex.mx,

La salud de un ecosistema acuático es esencial y depende no sólo de la cantidad del agua, sino principalmente de su calidad (Díaz et al., 2005). Las características físicas, químicas y biológicas del agua determinan su calidad las cuales pueden ser modificadas por procesos naturales y/o a través de los contaminantes generados por el hombre.

En México la descarga de aguas residuales municipales e industriales a los ríos, sin tratamiento previo y/o análisis de ningún tipo, es un problema histórico. Actualmente el crecimiento de las actividades antropogénicas desarrolladas en la cuenca del Curso Alto del Río Lerma (CARL) ha dado origen a un gran volumen de descargas de aguas residuales con altas cargas de materia orgánica y otros contaminantes. En términos de calidad del agua, los estudios fisicoquímicos demuestran que el agua no cumple con las características mínimas necesarias para su uso como agua de riego ni mucho menos para la protección de la vida acuática (Ávila et al., 2008; García-Aragón et al., 2013).

Existe una fuerte correlación entre las cargas de nutrientes en los ríos con el uso de la tierra, y especialmente con las prácticas agrícolas. Históricamente la carga de nutrientes en los ríos ha ido en aumento de forma paralela al incremento de la población humana en sus cuencas. Sin embargo, Xu et al. (2013), demostraron que la mayor carga de nitrógeno no proviene de las tierras de cultivo (fertilizantes) si no de las descargas residuales domésticas y que en los últimos 30 años ha sido una de las principales causas de la degradación del agua y eutrofización de los ríos (Chen et al., 2013).

Los nutrientes son sustancias solubles que las plantas necesitan para su desarrollo. Sin embargo, el exceso afecta negativamente los procesos químicos y la dinámica de los ecosistemas acuáticos. La carga de nutrientes de los ríos en zonas densamente pobladas, depende de diversos factores, por ejemplo: la hidrología, las entradas de fuentes terrestres, como es la escorrentía y los procesos de advección, difusión y dispersión en la corriente que conducen a la transformación, la retención y eliminación durante su viaje hacia aguas abajo. La evaluación de la importancia de estos procesos complejos y relacionados entre sí, puede proporcionar un entendimiento de cómo la calidad del agua del río y el funcionamiento ecológico reflejan el uso de la tierra y de la actividad humana en la cuenca (Billen et al., 2007).

La eutrofización ha sido el principal problema que enfrenta la mayoría las aguas superficiales en todo el mundo (Smith y Schindler, 2009; Wu y Xu, 2011). La reducción de las cargas de nutrientes es esencial para la mejora de la calidad del agua y la restauración ecológica de los cuerpos de agua. Siendo el nitrógeno (N) y fósforo (P), los causantes principales de la eutrofización.

Debido a su deterioro y alta contaminación, el Curso Alto del Río Lerma (CARL) es uno de los ríos de

mayor interés en México. Se localiza en el Estado de México, en una región industrial altamente activa, con importantes niveles de producción agrícola y un acelerado crecimiento industrial y poblacional (Ávila et al., 2008). Estudios han comprobado que la calidad del agua del CARL se ha deteriorado, al grado de situarlo entre los ríos más contaminados de México (Greenpeace, 2014). De ahí que, en el presente trabajo se calibró y validó el modelo QUAL2Kw en un tramo del Río Lerma, en relación al nitrógeno amoniacal y nitrógeno como nitratos, con la finalidad de evaluar la influencia que tienen los tributarios en la calidad del agua del cauce principal, y con los resultados realizar estimaciones futuras. Adicionalmente se modeló el nitrógeno total de Kjeldahl para identificar los tributarios que se consideran críticos según los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas que establece la norma oficial NOM-001-SEMARNAT, en función del uso posterior que tendrá el agua.

2. METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

El sistema hidrológico Lerma-Chapala-Santiago es uno de los más importantes de México, con una superficie estimada de 130,000 km². Esta cuenca ocupa porciones de los estados de México, Michoacán, Querétaro, Guanajuato, Jalisco, Aguascalientes, Zacatecas, Durango y Nayarit (Figura 1), donde se encuentran varios de los centros de población más importantes del Altiplano Central Mexicano (Díaz-Delgado et al., 2002).

El río Lerma es el cauce principal de ésta cuenca. El perfil longitudinal del colector principal de la Cuenca Alta del Río Lerma, lo que corresponde al Estado de México, y un criterio hidrológico-tectónico permiten la división de su curso en tres porciones: Alto, Medio y Bajo.

Uno de los principales problemas que enfrenta actualmente la cuenca, es la contaminación de agua, suelo y aire (GEM, 2010a), problema que se ha agudizado por el incremento del desarrollo urbano e industrial. El crecimiento en la industrialización en el valle de Toluca después de 1960, provocó el aumento en la generación de desechos y las descargas de aguas residuales, que en conjunto con las descargas de aguas de origen doméstico y la disminución del caudal, por el transvase a la ciudad de México, convirtieron al río Lerma en uno de los más contaminados del país (Greenpeace, 2014).

La cuenca es un caso emblemático de la contaminación de ríos en México: cuenta con más de 500 mil habitantes en el área de influencia demográfica y más de 500 industrias de diversos giros (químico, farmacéutico, plásticos, alimenticio, etc.) establecidas en el corredor Toluca-Lerma formando la segunda zona industrial más importante del país (INEGI, 2015).

Todas estas industrias producen aguas residuales que contienen diversas sustancias químicas, algunas con propiedades nocivas para la salud y el ambiente; entre ellas se pueden encontrar metales pesados altamente tóxicos como mercurio, plomo y cadmio (García-Aragón et al., 2013) y otros químicos dañinos como el tolueno y benceno (Greenpeace, 2014), que no se incluyen en ninguna regulación nacional sobre las descargas al agua.

El área de estudio corresponde al tramo del CARL que va desde el puente de la carretera México-Toluca hasta la Presa José Antonio Alzate, con una longitud aproximada de 27.5 km. Esta zona se ha identificado en estudios previos como el tramo más contaminado (Hinojosa, 2006). En este tramo del río, descargan diferentes ríos tributarios, los principales son el río Tejalpa, río Verdiguél, río Ameyalco, río Atarasquillo, río Sta Catarina, canal Totoltepec y río Temoaya, además de la descarga de las plantas de tratamiento Toluca Norte y Reciclagua (Figura 1).

2.2. Modelo de calidad del agua QUAL2Kw

La importancia de la modelación de la calidad del agua radica en conocer la cantidad, calidad y tipo de contaminantes que son arrojados a un cuerpo de agua, y relacionar la concentración de contaminantes en las entradas con la calidad del cuerpo receptor. Con base en la calidad, se pueden fijar condiciones particulares de descarga, acciones encaminadas a la conservación del recurso, ayudando así a mantener la flora y fauna de los cuerpos receptores y la reutilización del agua (Montelongo, et al., 2007).

Los trabajos en materia de modelos de calidad del agua han sido numerosos en los últimos años (Hossain et al., 2014; Gikas, 2014;). Dentro de los modelos matemáticos de calidad del agua se encuentra la serie QUAL, desarrollados por el laboratorio de investigación ambiental de la USEPA, cuyo objetivo es simular el comportamiento de los componentes hidrológicos y de calidad de agua en un sistema de corrientes.

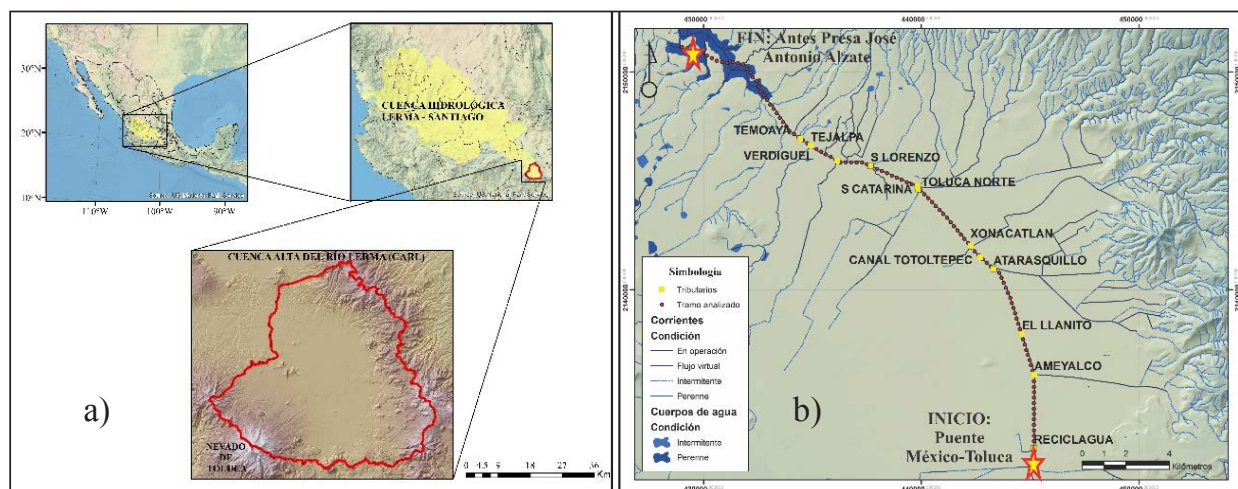


Figura 1.- Área de estudio. a) Localización de la Cuenca Alta del Río Lerma.
b) Localización de los tributarios

El modelo QUAL2Kw (Chapra y Pelletier, 2008) es un modelo unidimensional, con modelación de sistemas hídricos de tipo dendrítico, que permite simular descargas y extracciones tanto puntuales como dispersas. El modelo simula los parámetros de: conductividad, sólidos suspendidos inorgánicos, oxígeno disuelto, DBO rápida (DBO_5), DBO lenta (DBO_{20}), nitrógeno orgánico disuelto, nitrógeno amoniacal, nitratos, alcalinidad, carbono orgánico total, algas de fondo, temperatura y caudal, entre otros. En las últimas versiones el modelo trabaja bajo condiciones anaeróbicas y de anoxia.

La representación de la corriente principal en el modelo, se realiza mediante una esquematización que representa las características hidro-geométricas. La corriente es conceptualizada como una sucesión de elementos computacionales (Figura 2), que operan como reactores completamente mezclados, ligados uno a otro por mecanismos de transporte y

difusión. Estos elementos se agrupan en segmentos que se caracterizan por tener las mismas propiedades hidráulicas (pendiente, sección transversal, rugosidad, etc.). Para cada elemento se realiza un balance hidrológico en términos del caudal Q , un balance térmico en términos de la temperatura T , y un balance de masa en términos de concentración c , de cada parámetro a evaluar.

El caudal es calculado, considerando conservación de masa, en cada elemento mediante la siguiente expresión (Figura 2a):

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{h,i} - Q_{out,i} \quad (1)$$

Donde: Q_i , caudal en la salida del elemento i ; Q_{i-1} , caudal en la entrada del elemento, $Q_{h,i}$, caudal de descargas en el elemento i y $Q_{out,i}$, caudal de extracciones o salidas en el elemento i .

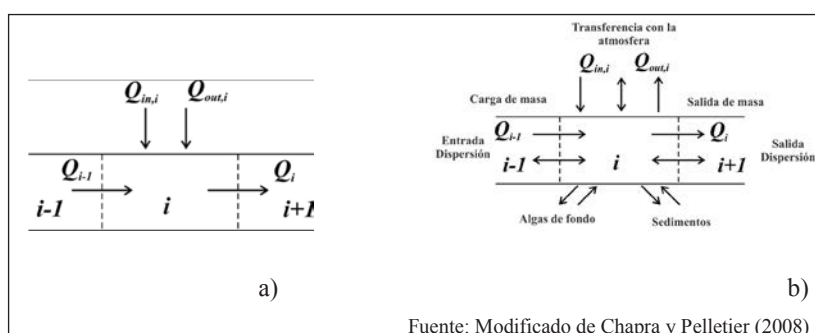
En los elementos puede haber ganancia o pérdida de masa debido a procesos de transporte, fuentes externas o por fuentes internas (Figura 2b). El modelo QUAL2Kw, permite evaluar la capacidad asimilativa del agua residual de un sistema, mediante

la simulación de varios constituyentes de calidad del agua, resolviendo las ecuaciones de advección-dispersión de masa y de reacción. El balance general de masa en cada elemento se calcula como:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} c_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i} c_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (c_{i-1} - c_i) + \frac{E'_i}{V_i} (c_{i+1} - c_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i \quad (2)$$

Donde: dc/dt , variación de la concentración del constituyente respecto al tiempo en el elemento i ; E' , variación de la concentración debido a la dispersión; W_i , carga externa del constituyente en el elemento i y S_i , entradas y salidas del constituyente debido a las reacciones y los mecanismos de transferencia.

Las ecuaciones de balance resultantes se resuelven con un método clásico de diferencias finitas implícito. Los resultados finales se traducen en curvas que muestran la variación de los parámetros modelados a lo largo de la corriente.



Fuente: Modificado de Chapra y Pelletier (2008)

Figura 2.- Conceptualización de la corriente. a) Balance de caudal en la corriente.
b) Balance de masa en la corriente.

2.3 Información disponible

El presente trabajo se limitó a la búsqueda de información referente a la época de estiaje por considerarse la época más crítica en cuanto a la calidad del agua en el río. En esta época no existe dilución debido a la precipitación, y las descargas de los tributarios corresponden a agua servida. Por lo tanto, la información recopilada es del mes de marzo y se utilizó información del año 2006 para la calibración y del año 2013 para la validación, se consideran estos años debido a la información disponible.

2.4 Parámetros hidráulicos

Una vez definido el tramo de estudio, que corresponde al cruce del río con la carretera México-Toluca hasta antes de la presa José Antonio Alzate, con las secciones transversales disponibles, se procedió a calcular los parámetros hidráulicos para alimentar el modelo. Se optó alimentar el modelo con curvas de relaciones hidráulicas, por considerar que permiten representar mejor las propiedades hidráulicas del río. Para la obtención de los coeficientes de estas curvas se utilizó el software HEC-RAS, donde se modeló el caudal del mes de marzo de 2006.

2.5 Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos utilizados en la alimentación del modelo QUAL2Kw fueron: temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, velocidad del viento, porcentaje del cielo cubierto por nubes y sombra sobre el río. Estos datos son de importancia para el funcionamiento del modelo QUAL2Kw, ya que sirvieron para la calibración de la temperatura. La temperatura es la base para la determinar la velocidad de las reacciones en el agua.

Las variables se obtuvieron de la estación hidrométrica ALZATE ubicada en el Estado de México en el Municipio de Toluca (Lat 19° 24' 34.92", Long 99° 44' 12.12"), controlada por Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a través del Servicio Meteorológico Nacional. Los datos proporcionados fueron los correspondientes a los años 2008 a 2013, realizándose el análisis de los datos del mes de marzo. Como resultado de este análisis se obtuvo la temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento en un intervalo de 24 horas. El valor promedio diario de la temperatura ambiental fue 12.3 °C, mientras que la temperatura de punto de rocío fue 2 °C, y la velocidad del viento fue 4.17 m/s.

Para la variable de sombra se utilizó un valor de 0%, con ayuda del software Google Earth se reconoció

visualmente el CARL y se observó que no hay sombra debida a topografía o vegetación. Mientras que para la cobertura de nubes se utilizó un valor del 10%, se consideró que en ese mes del año, la mayor parte de los días permanecen despejados. Cabe mencionar que todas las variables meteorológicas se consideraron constantes a lo largo del tramo del río.

2.6 Datos de calidad del agua

Existen diversos estudios sobre calidad del agua del CARL, (García-Aragón, 2013; Greenpeace, 2014), cuyos resultados han mostrado que el CARL se encuentra altamente contaminado. En estos estudios se han evaluado diversos parámetros de calidad del agua entre los más comunes, oxígeno disuelto, DQO, DBO₅, color, pH, incluso en algunos se han evaluado la contaminación por metales.

Para la calibración se utilizaron los datos obtenidos por Tejeda (2011) para el mes de marzo del 2006, se consideró este estudio porque incluye datos de calidad del agua tanto en el cauce principal como en los ríos tributarios, además el estudio presenta resultados de nitrógeno amoniacal. El estudio dispone de trece estaciones de muestreo sobre el río Lerma, de los cuales nueve están en el área de estudio. También cuenta con dieciocho estaciones de muestreo sobre los ríos tributarios, de los cuales 12 están en el área de estudio (Figura 3).

Mientras que, para la validación se utilizaron datos obtenidos por la Comisión Nacional del Agua

(CONAGUA) para marzo del año 2013. La CONAGUA realiza muestreos de forma mensual en diferentes estaciones sobre el río Lerma, la información disponible es de cinco estaciones sobre el CARL y tres estaciones ubicadas en los tributarios (Toluca-Norte, Canal Totoltepec y río Temoaya) (CONAGUA, 2014b), en la figura 3 se muestra las ubicaciones de las estaciones sobre el río Lerma.

En la tabla 1, se muestran los datos de calidad del agua para los principales tributarios, utilizados para la calibración, donde se observa que descargan cantidades significativas de nitrógeno amoniacal, los cuales superan las normas oficiales mexicanas.

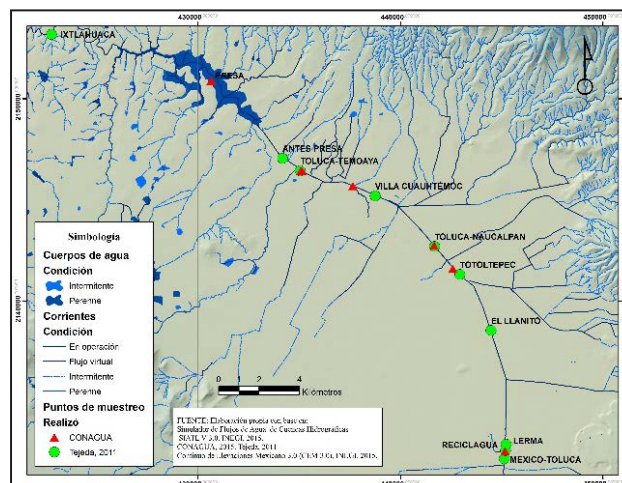


Figura 3.- Localización de las estaciones de muestreo Tejeda (2011) y CONAGUA (2014).

Tabla 1.- Parámetros de calidad del agua de los principales tributarios (Tejeda, 2011).

Tributarios	Q (L/s)	T (°C)	OD (mg/L)	BDO ₅ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg N/L)	Procedencia de las aguas residuales
Reciclagua	450	30.1	0.2	82.41	18.3	Industrial - Planta de tratamiento
Ameyalco	95	16.8	0.9	62.38	43.6	Municipal
Canal Totoltepec	1000	19.7	0.7	86.66	34.6	Industrial + Municipal – Planta de tratamiento
Xonacatlan	95	18.8	1.4	55.27	48.9	Municipal
Toluca norte	1250	20.9	1.6	28.75	40.4	Industrial + Municipal – Planta de tratamiento
Tejalpa	426	25.5	2.7	60.25	64.2	Industrial + Municipal

2.7 Calibración y validación

La calibración puede resumirse como la actividad de llevar a un margen mínimo la diferencia entre los datos simulados por el modelo y los datos medidos en campo para el mismo parámetro. En un modelo ambiental la calibración está encaminada al ajuste de las constantes cinéticas que influyen en los procesos del modelo, se asume que la información con la que se alimenta el modelo (condiciones de entrada, condiciones de frontera) es confiable.

Para este estudio la calibración se realizó con datos puntuales del muestreo efectuado por Tejeda (2011) en marzo de 2006, tanto en el río principal como en los tributarios. Para la calibración de las constantes cinéticas se realizó un total de 100 generaciones con 100 poblaciones, se utilizaron los factores de peso propuestos por Kannel et al. (2007). Para más información acerca del proceso de calibración en Pelletier et al., (2006).

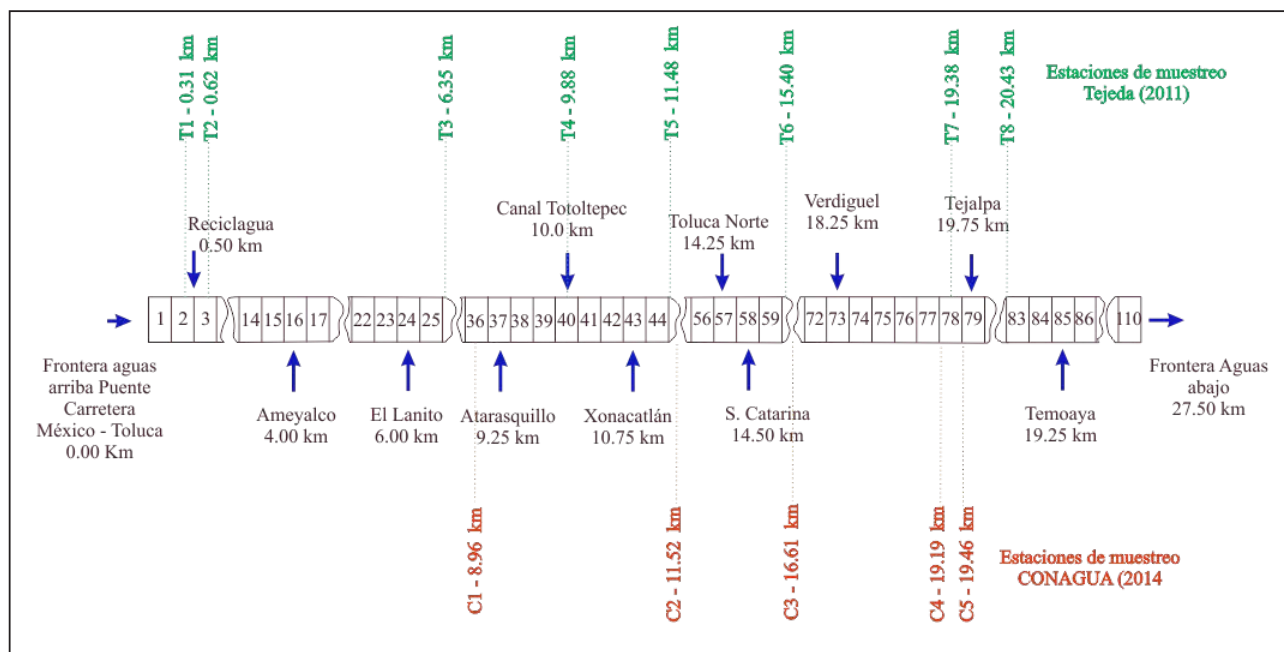


Figura 4.- Conceptualización del río Lerma en QUAL2Kw

Mientras que, la validación del modelo se realizó con datos obtenidos por CONAGUA (2014), en las diferentes estaciones situadas en el río, con fecha de muestreo marzo de 2013. Para los tributarios se calculó el caudal y la carga de contaminante (nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico) en función de la población. En la tabla 2 se muestran datos utilizados en la validación, para tributarios con mayor aporte en el río Lerma. .

Tabla 2. Parámetros de calidad del agua utilizados en la validación (Conagua, 2014).

Tributario	NH ₄ ⁺ (mg N/L)	Q (m ³ /s)
Ameyalco	50.4	0.095
Xonacatlán	69.0	0.131
Tejalpa	79.17	0.517

3. RESULTADOS

Los modelos de calidad del agua son utilizados extensamente para el manejo de ríos y arroyos, así como apoyo en la toma de decisiones. Estos modelos son calibrados ajustando gran número de parámetros para alcanzar un acuerdo óptimo entre el modelo de salida y las mediciones hechas en campo. Los parámetros cinéticos calibrados se muestran en la tabla 3. Los valores máximos y mínimos utilizados fueron los propuestos por Pelletier et al., (2006). Se observa, que la tasa de nitrificación es muy baja, debido a las concentraciones bajas de oxígeno disuelto en el río.

Tabla 3.- Parámetros cinéticos calibrados con el modelo QUAL2Kw

Parámetro	Unidad	Valor	Valor mín.	Valor máx.
Estequiometría				
Carbono	gC	40	30	60
Nitrógeno	gN	7.2	5	9
Peso seco	gD	100	100	100
Clorofila	gA	1	0.5	2
Oxígeno				
O ₂ para la nitrificación de NH ₄	gO ₂ /gN	4.57		
Nitrógeno orgánico				
Hidrólisis	/d	0.1230525	0.05	0.3
Nitrógeno amoniacal				
Nitrificación	/d	0.3048594	0.05	3
Nitratos				
Desnitrificación	/d	1.65076	0	2

3.1 Resultados de la calibración

En la figura 5a se muestra el resultado de la calibración de la velocidad con QUAL2Kw, comparado con el resultado de HEC-RAS, y se observa que se ajustan adecuadamente, lo que significa que los parámetros de las curvas características de caudal utilizadas en el modelo son válidos. De forma particular, en la figura 5b se muestra el perfil del caudal y la velocidad obtenida con QUAL2Kw, se observa como el caudal aumenta debido a la descarga de los tributarios,

siendo los que mayor caudal descargan el canal Totoltepec y el colector de la planta Toluca-Norte, ubicados en el kilómetro 10 y 14 respectivamente. Los resultados se compararon con los registrados de la estación hidrométrica México-Toluca (estación ubicada en la frontera aguas arriba) que registra caudales en un intervalo de 0.5-0.7 m³/s en el mes de marzo. Y en la estación hidrométrica la "Y" (ubicada antes de la entrada a la presa José Antonio Alzate) se registra caudales de 4.5 a 5.0 m³/s en el mes de marzo. Por lo tanto, se considera adecuado el balance hídrico propuesto.

También se observa como la velocidad es baja, menor a 0.1 m/s al principio del tramo en estudio y va aumentando a medida que hay mayor aporte de los tributarios, sin embargo, el aumento también se debe al cambio de pendiente en los diferentes tramos del río. Las velocidades registradas en las estaciones hidrométricas México-Toluca y la "Y" en el mes de marzo se encuentran en un intervalo de 0.05-0.12 m/s y 0.4 a 0.9 m/s, respectivamente.

También, se realizó la calibración de la temperatura en el modelo, en la figura 6 se observa un buen ajuste del modelo a las mediciones hechas en campo, estas se encuentran en el rango máximo y mínimo simulado. El valor promedio modelado es de 18°C y de acuerdo con la NOM-001 SEMARNAT 1996, haciendo referencia a la temperatura, el agua de este río podría destinarse para cualquier uso.

Además en la figura 6 se observa un aumento significativo de la temperatura después de la descarga de Reciclagua y solo pequeños saltos en las descargas de las plantas de tratamiento Toluca norte y Toluca oriente. Esto se debe a que la temperatura del agua residual suele ser siempre más elevada que la del agua de suministro, debido principalmente a la incorporación de agua caliente procedente de las casas y los diferentes usos industriales. Este parámetro resulta muy importante dentro de la modelación de calidad del agua, debido a que afecta directamente a muchos de los procesos biológicos y fisicoquímicos, incluyendo los nutrientes que se encuentran en el agua. En especial, afecta la solubilidad de diversos elementos y principalmente el oxígeno disuelto.

Otro parámetro de interés en la calibración del modelo fue el oxígeno disuelto, los valores, resultado de la modelación fueron más bajos que los registrados en campo (Figura 7). Sin embargo, estos datos se encuentran en el rango de máximo y mínimo. La presencia de oxígeno disuelto es casi nula, menor a 1 mg/L, lo cual representa que no existe suficiente oxígeno para soportar vida animal, esto es válida por la alta contaminación del río. El modelo predice un aumento de la concentración a partir del km 14, este cambio se debe a la aportación de caudal de la planta de tratamiento Toluca-Norte, punto donde se presenta un aumento de velocidad y mezclado del agua. Esta condición casi de anoxia es de esperarse dada la gran cantidad de descargas de

tipo doméstico e industrial que los municipios hace sobre esta corriente y que en definitiva no permiten la auto recuperación de la corriente.

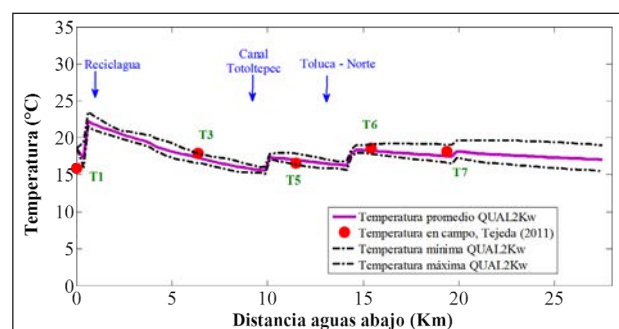


Figura 5.- Perfiles de velocidad y caudal en el río Lerma.

Para el Nitrógeno Amoniacal (NH₄⁺), en la figura 8 se observa el ajuste del modelo con los valores obtenidos en campo. Se realizaron diversas calibraciones y de acuerdo con los parámetros se considera que este fue la mejor aproximación. La diferencia entre el valor modelado contra el observado es en promedio del 26%, si bien la diferencia es alta se considera que se debe a errores en las mediciones en los tributarios, pues a manera de comparación los datos mostrados por GEM (2010) en los tributarios son más altos que los reportados por Tejeda (2011), para los mismos puntos. Sin embargo, en la figura se observa como la concentración del nitrógeno amoniacal disminuye después de la descarga de Reciclagua (km=0), pero aumenta en las descargas del Canal Totoltepec, Toluca Norte y el tributario Tejalpa, que de acuerdo a la clasificación de procedencia, el agua residual es de origen municipal más que industrial. Por lo tanto, se considera que la mayor carga de nitrógeno simulada en el CARL, se debe principalmente a los aportes de los ríos tributarios, Ameyalco, Xonacatlan, Sta. Catarina y Tejalpa. Con esto se concluye que las descargas municipales son las que mayor nitrógeno amoniacal aporta al río Lerma. Esto último es derivado de las actividades desarrolladas en cada subcuenca y la densidad de población indicando que el nitrógeno amoniacal para la época de estiaje no procede de tierras de cultivo, si no de descargas domésticas.

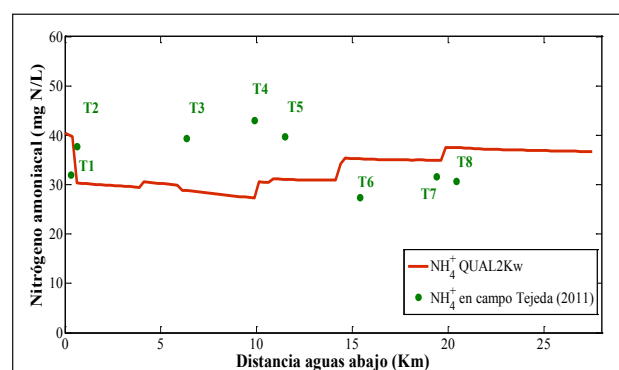


Figura 8.- Nitrógeno amoniacal modelado para el río Lerma en el año 2006.

3.2 Resultados validación

La utilidad de los modelos matemáticos está determinada por su habilidad de reproducir con precisión series de datos observados, pero más aún, por su capacidad predictiva. Se entiende ésta como la capacidad del modelo de describir otras series de tiempo sin que se requiera el ajuste de alguno de los parámetros calibrados. Por ello, la validación se realizó con datos de marzo de 2013, obtenidos por la CONAGUA (2014).

El caudal en la frontera fue modificado, mientras que, para los tributarios se calculó en función de la proyección de la población al año 2013 (Tabla 2) (Flores, 2015). El caudal calculado se consideró como válido, pues al realizar el balance de caudal y comparándolo con la estación hidrométrica la "Y" se obtuvo un error relativo de 3.41%.

Para el nitrógeno amoniacal se observa un mejor ajuste del modelo en la validación (Figura 10) que en la calibración. En el perfil se observa una disminución en Reciclagua, que de acuerdo a sus reportes ha mejorado la calidad del agua de su efluente en los últimos años, cerca del 50% (GEM, 2011a). Se observa una pequeña disminución debida al aporte del canal Totoltepec sin embargo, vuelve a subir en el tributario Xonacatlan. La disminución más significativa se ve en la descarga de la planta de tratamiento Toluca Norte, pero vuelve a incrementarse por el aporte del río Santa Catarina y hay un aumento aún más significativo en el río Tejalpa. Con esto se demuestra la importancia que tiene los tributarios, los cuales se consideran que son aportes de aguas residuales domésticas.

Para la etapa de validación se modeló el nitrógeno orgánico, nitritos + nitratos y nitrógeno total de Kjeldahl (Figuras 10, 11 y 12). Como era de esperarse la presencia de nitritos y nitratos en el río es casi nula, debido a las condiciones de anoxia que prevalecen, y los pocos productos que se pueden formar en la nitrificación, rápidamente van a la atmosfera debido a la desnitrificación. Para comprender el comportamiento del nitrógeno total, en la figura 13 se muestra de forma espacial las concentraciones de nitrógeno total a lo largo del río, esta información permite detectar zonas de atención.

Adicionalmente se modeló el nitrógeno total de Kjeldahl para comparar con la NOM-001-SEMARNAT, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, en aguas y bienes nacionales en función del uso posterior que tendrá el agua. La norma establece que para agua destinada a riego el Nitrógeno total de Kjeldahl no debe exceder los 40 mg N/L (Figura 12). En el gráfico se observa que el río no cumple la norma en varios puntos y que es de atención especial el río Tejalpa. La norma establece para uso público urbano una descarga no mayor a 40 mg N/L, mientras que para protección de la vida acuática de 15 mg N/L, valor del que se encuentra muy lejos el río Lerma.

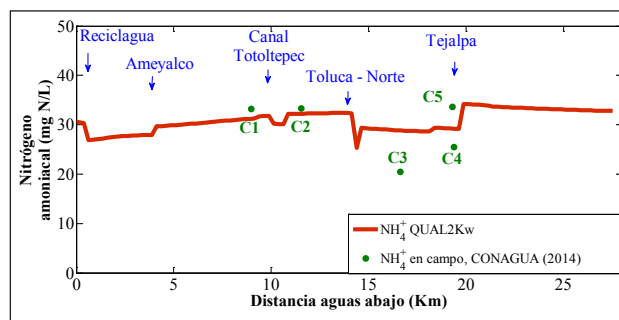


Figura 9.- Concentraciones de Nitrógeno amoniacal en el río Lerma en el año 2013

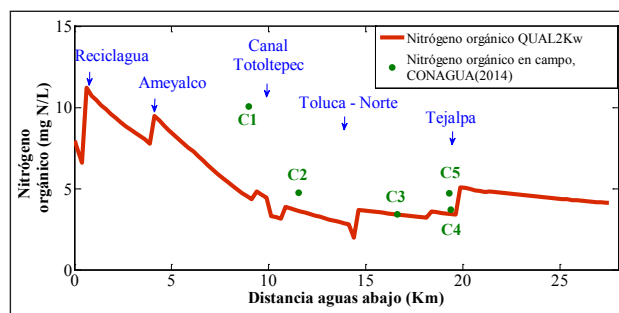


Figura 10.- Concentraciones de Nitrógeno orgánico en el río Lerma en el año 2013

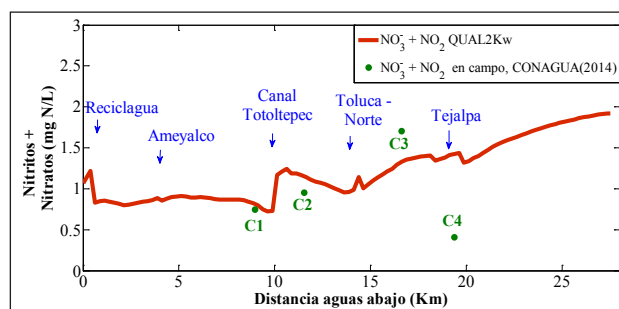


Figura 11.- Concentraciones de Nitritos + Nitratos en el río Lerma en el año 2013

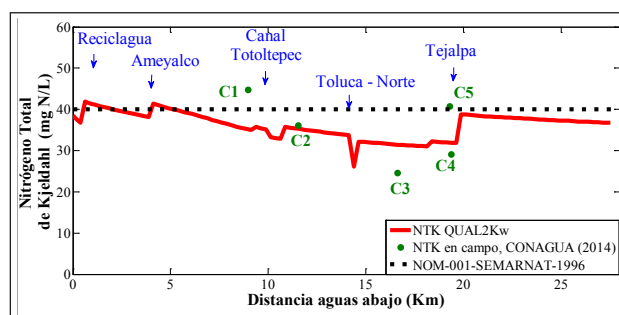


Figura 12.- Concentraciones de Nitrógeno Total de Kjeldahl en el río Lerma en el año 2013

3.3. Raíz del Error Cuadrático Medio

No solo es suficiente la apreciación visual del ajuste del modelo, ni la comparación directa del valor del modelo y el valor real, es necesario algún indicador numérico para conocer el error del valor modelado contra el valor real. La función de ajuste propuesta por Pelletier et al., (2006) toma en cuenta la Raíz del

Error Cuadrado Medio (RMSE), que es una medida de la diferencia entre los valores pronosticados por el modelo y los valores realmente observados. Este indicador sirve para agregar en una sola medida la capacidad de predicción del modelo. Estos valores ayudan a distinguir el rendimiento del modelo en el periodo de calibración con el periodo de validación.

Las formas adimensionales de la RMSE son útiles porque a menudo se quiere comparar RMSE con diferentes unidades. Es necesario normalizar la RMSE a la media de los datos observados, obteniendo así el coeficiente de variación (RMSCV). En la tabla 4 se muestran los valores de la RMSCV obtenidos en este trabajo y en la tabla 5 los reportados por otros autores.

Tabla 4.- Valores de RMSE en la calibración y validación.

Ajuste Global	CALIBRACIÓN		VALIDACIÓN	
	4.07		3.25	
Parámetro	RMSE	RMSCV (%)	RMSE	RMSCV (%)
Temperatura (°C)	0.73	4.20	1.14	6.5
Oxígeno Disuelto (mg/L)	0.42	62.85	1.27	94.21
NH ₄ ⁺ (mg/L)	9.10	26.69	4.76	16.31
Nitrógeno Orgánico (mg/L)			2.63	58.72
NO ₃ + NO ₂ (mg/L)			0.81	81.65
TNK (mg/L)			9.76	27.20

Tabla 5.- RMSCV (%) reportados por otros autores.

Parámetro	Kannel et al. (2007)		Kori et al. (2013)	
	CAL	VAL	CAL	VAL
Temperatura (°C)	8	3.6		
Oxígeno Disuelto (mg/L)	15	19.2	5.5	14.06
NH ₄ ⁺ (mg/L)			27	39.6
NO ₃ + NO ₂ (mg/L)			57.6	65.3
NT	20.3	25.3		

El ajuste global del modelo fue mejor en la calibración (4.07) que para la validación (3.25), aunque visiblemente se observa un mejor ajuste en la validación. El NH₄⁺ tuvo un mejor ajuste en la validación, 16.31% de diferencia promedio entre el valor modelado y el valor real, mientras que la temperatura y el oxígeno disuelto el mejor ajuste lo presentaron en la calibración. Cabe recordar que el ajuste final del modelo contempla los factores de peso. El peso más grande lo tiene asignado el oxígeno disuelto (50) por lo tanto repercute de manera significativa en el ajuste final del modelo. Al realizar la comparación entre los valores obtenidos en este trabajo contra los reportados por otros autores, se concluye que con los datos disponibles se logró un buen ajuste del modelo.

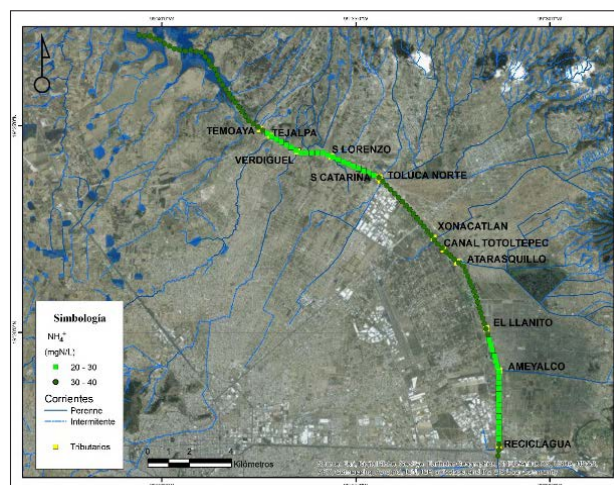


Figura 13.- Concentraciones de Nitrógeno amoniacal en el río Lerma en el año 2013, en planta

4. CONCLUSIONES

El modelo QUAL2Kw es una herramienta importante para modelación de calidad del agua, permite ajustar el modelo a las condiciones de la corriente y contribuir a la toma de decisiones para mejorar la calidad de la misma.

Se calibró y validó el modelo QUAL2kw con los datos disponibles de calidad de agua e hidráulicos del CARL, teniendo un buen ajuste en ambos casos. El parámetro con menor coeficiente de variación del RMSE fue la temperatura, con un coeficiente de variación de 4.20%. Mientras que el oxígeno disuelto fue el que presentó el mayor coeficiente de variación con 60.81%. Mientras que el RMSE del nitrógeno amoniacal fue de 16.31% y 25.78% en la calibración y validación respectivamente, estos valores se consideran adecuados para que el modelo sea representativo del río Lerma.

Respecto a la comparación del resultado obtenido con el modelo y los obtenidos en campo para el Nitrógeno Amoniacal (NH₄⁺), la diferencia entre el valor modelado contra el observado es en promedio del 26%, si bien la diferencia es alta se considera que se debe a errores en las mediciones en los tributarios.

La calibración y validación del modelo permitirá plantear escenarios a corto mediano y largo plazo, con el fin de establecer acciones de remediación, como es la colocación de plantas de tratamiento o mejorar la eficiencia de las existentes.

AGRADECIMIENTO

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México, por el apoyo brindado al estudiante de maestría para la realización de sus estudios en el Centro Interamericano de Recursos del Agua.

BIBLIOGRAFÍA

- Ávila, P., Tejeda, S. y Zarazúa, G. 2008. La CONTAMINACIÓN en el Curso Alto del Río LERMA. *Contacto Nuclear*, No. 52, 12-35.
- Billen, G., Garnier, J., Némery, J., Sebilo, M., Sferratore, A., Barles, S., Benoit, P. y Benoit M. (2007). A long-term view of nutrient transfer through the Seine river continuum. *Science of the Total Environment*, No.375, 80-97.
- CONAGUA, 2014a. Datos de las estaciones hidrométricas La Y y Puente carretera del año 2006 a 2014. Datos proporcionados en copias. Toluca, Estado de México.
- CONAGUA, 2014b. Datos de calidad del agua del río Lerma del año 2013 y 2014. Datos proporcionados en digital. Toluca, Estado de México.
- CONAGUA, 2014c. Datos de la estación meteorológica automatizada ALZATE del año 2006 a 2014. Datos proporcionados en digital. Toluca, Estado de México.
- Chapra, S.C. and G.J. Pelletier. 2008. *QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Beta Version): Documentation and Users Manual*. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA.
- Chen, N., Peng, B., Hong, H., Turyaheebwa, N., Cui, S. y Mod, X. 2013. Nutrient enrichment and N:P ratio decline in a coastal bay-river system in southeast China: The need for a dual nutrient (N and P) management strategy. *Ocean & Coastal Management*, No.81, 7-13.
- Díaz, C., Esteller, V., y López, M. 2005. Recursos hídricos: conceptos básicos y estudios de casos en Ibero América. Ilustraciones, figuras, cuadros y gráficos. Toluca, México: CIRAUAEM
- Díaz-Delgado C., D. J., Anton (editores). 2002. Sequía en un mundo de agua. San Jose/Toluca, Piriguazú Ediciones / CIRA-UAEM pp.420
- García-Aragón, J., Zarazúa-Ortega, G., Díaz-Palomarez, V., Tejeda-Vega, P. y Ávila-Pérez, P. 2013. Modelo del transporte y deposición de Fe y Mn en el curso alto del río Lerma. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 14 (3), 355-367.
- Gikas, G. 2014. Water Quality of Drainage Canals and Assessment of Nutrient Loads Using QUAL2Kw. *Environ. Process.* 1, 369–385
- Gobierno del Estado de México, Secretaría de Medio Ambiente 2010a. Propuesta Metodológica de Monitoreo. Plan maestro para la restauración ambiental de la cuenca alta del río Lerma. Estado de México, México. 109 p.
- Greenpeace. 2014. Ríos tóxicos: Lerma y Atoyac. La historia de negligencia continúa. <http://www.greenpeace.org/mexico/Global/mexico/Docs/2014/toxicos/Rios%20t%C3%B3xicos%20Lerma%20y%20Atoyac-WEB.pdf>
- Hossain M.A., Sujaul I.M. and Nasly M.A. 2014. Application of QUAL2Kw for water quality modeling in the Tunggak River, Kuantan, Pahang, Malaysia *Research Journal of Recent Sciences* Vol. 3(6), 6-14
- Hinojosa, A. 2006. Diseño de una red estratégica de monitoreo para el curso alto del río Lerma y su utilización en el estudio espacial y temporal de los parámetros físico-químicos. Tesis de Maestría. Centro Interamericano de Recursos del Agua, UAEM. Toluca, México. 100 p.
- INEGI. 2015. Consulta del Censo Económico. Recuperado en Agosto de 2015 de <http://www.inegi.org.mx/>
- Kannel, P. R., Lee, S., Lee Y.S., Kanel, S.R., Pelletier, G.J. 2007. Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. *Ecological Modelling*, 202, 503-517"
- Montelongo, R., Gordillo, A., Otazo, E., Villagómez, J., Acevedo, O. y Prieto, F. 2007. Modelación de la calidad del agua del río Tula, Estado de Hidalgo, México. *Dyna*, 75 (154), 5-18.
- Pelletier, G., Chapra, S. y Tao, H. 2006. QUAL2Kw e A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Environmental Modelling & Software*, 21, 419-425
- Smith, V. H., Schindler, D.W. 2009. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends Ecol.* 24 (4), 201-207.
- Tejeda, S., 2011. Balance de masa de contaminantes inorgánicos y orgánicos en el Curso Alto del Río Lerma. Tesis Doctoral en Ingeniería Ambiental. Instituto Tecnológico de Toluca. Metepec, México.
- Wu, G.Z., Xu, Z.X. 2011. Prediction of algal blooming using EFDC model: case study in the Daoxiang Lake. *Ecological modelling*. 222, 1245-1252.
- Xu, H., Chen Z., Finlayson B., Webber M., Wu, X., Li, M., Chen, J., Wei, T., Barnett, J. y Wang, M. 2013. Assessing dissolved inorganic nitrogen flux in the Yangtze River, China: Sources and scenarios. *Global and Planetary Change*, 106, 84-89.