

Modelación de la Calidad del Agua en el Dren El Burrión del Distrito de Riego 063, Guasave, Sinaloa, México

L. González-Márquez

Universidad de Occidente, Guasave, Sinaloa, México, lcgm.udeo@gmail.com

F. Torres-Bejarano

Universidad de la Costa, Barranquilla, Atlántico, Colombia, ftorres4@cuc.edu.co

H. Rodríguez Gallegos

Universidad de Occidente, Los Mochis, Sinaloa, México, hrodriguez8@me.com

N. Rivera Rivera

Universidad de Occidente, Guasave, Sinaloa, México, napo_riri90@hotmail.com

RESUMEN

El agua es un recurso indispensable para las actividades humanas, para el desarrollo económico y el bienestar social, es así que la columna vertebral de la agricultura, tanto en México como en el resto del planeta, es el agua, por lo que el riego de los cultivos es muy importante para lograr buenos rendimientos. Sin embargo, este tipo de prácticas en los distritos de riego, genera el transporte de contaminantes mediante descargas puntuales o difusas que son conducidas a través de canales superficiales que tienen la función de drenes agrícolas. En este trabajo, el modelo de calidad del agua QUAL2K, fue aplicado y calibrado al dren El Burrión, el drenaje principal del distrito de riego 063, en el Municipio de Guasave, Sinaloa, México. El modelo se ajustó adecuadamente a los datos medidos, para lo cual se tuvo en cuenta la influencia de descargas puntuales y descargas difusas presentes a lo largo del dren. La calidad de agua fue evaluada para estimar los impactos que las descargas de agua residual y los drenes tributarios tiene sobre el dren principal. Esto permitió examinar la influencia que tienen las estrategias de manejo de calidad del agua en los distritos de riego, sobre los parámetros de calidad del agua más representativos, como el oxígeno disuelto y los nutrientes.

Palabras claves: Modelo Qual2k, drenajes agrícolas, nutrientes

ABSTRACT

Water is a vital resource for human activities, economic development and social welfare, so that the core of agriculture, in Mexico and in the rest of the planet is water, so irrigation is very important to achieve good profits. However, these practices in irrigation districts generate pollutants transport by point or non-point discharges that are conducted through surface channels which have the function of agricultural drains. In this work, the water quality model QUAL2K, was applied and calibrated to the drain El Burrion, the main drain of the irrigation district 063, in the Municipality of Guasave, Sinaloa, Mexico. The model was fitted to the measured data adequately, taking into account the influence of point sources and diffuse sources present along the drain. The water quality was evaluated to estimate the impacts that wastewater discharges and tributary drains have on the main drain. This allowed examining the influence of management strategies on water quality irrigation districts, on most representative water quality parameters, as dissolved oxygen and nutrients.

Keywords: Environmental Information Systems, Numerical Modeling, Water Quality

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, la actividad agropecuaria ha desempeñado un papel importante en el crecimiento económico de México y particularmente del Estado de Sinaloa, al proveer de alimentos, materias primas y fuentes de trabajo. Por lo que el uso de insumos tales como fertilizantes y plaguicidas son factores fundamentales de la producción al incidir directamente sobre los rendimientos de los cultivos (Terrones-Cordero y Sánchez-Torres, 2010).

La columna vertebral de la agricultura, tanto en México como en el resto del planeta, es el agua por lo que el riego de los cultivos es muy importante para lograr buenos rendimientos (Ortega y Orellana, 2007). Por todos es conocido que el agua es un recurso indispensable para las actividades humanas, para el desarrollo económico y el bienestar social.

El objetivo principal del presente trabajo fue monitorear la calidad del agua del dren agrícola El Burrión y aplicar el modelo de calidad del agua QUAL2K, para evaluar las cargas generadas de compuestos fisicoquímicos vertidos al dren principal del distrito de riego 063 en el Estado de Sinaloa, México.

2. ZONA DE ESTUDIO: DISTRITO DE RIEGO 063, GUASAVE, SINALOA, MÉXICO

El Distrito de Riego (DR) 063 se ubica en la parte norte del estado de Sinaloa, en los municipios de Guasave y Sinaloa de Leyva. Se localiza entre los meridianos 108° 10' y 108° 40' de longitud oeste y los paralelos 25° 30' y 25° 50' de latitud norte. En el año agrícola 2009/10 fue uno de los siete distritos de riego con más de 100, 000 ha sembradas (CONAGUA, 2011). La actividad agrícola en el DR 063 demanda anualmente una gran cantidad de agroquímicos sintéticos (plaguicidas y fertilizantes) principalmente para el control de plagas, pero también para agregar nutrientes a los suelos.

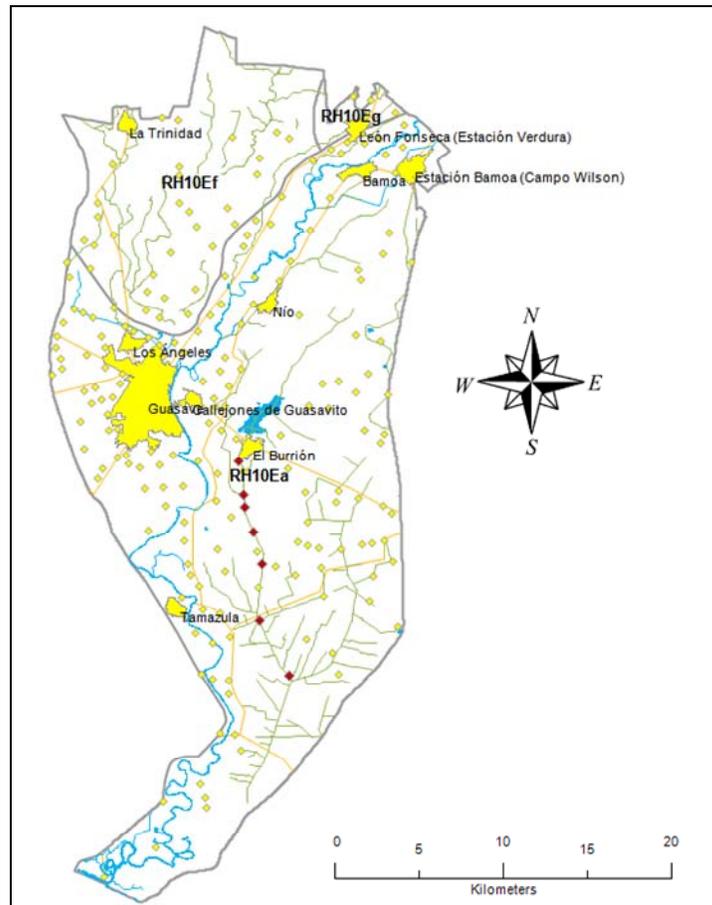


Figura 1. Zona de estudio. Distrito de Riego 063, Guasave, México

El dren del Burrión se ubica en el DR 063 (Figura 1). La longitud total del dren es de aproximadamente 38.7 km. A lo largo de su trayectoria el dren pasa cerca de localidades representativas del municipio de Guasave; tales como la sindicatura de El Burrión, localidad urbana que descarga sus aguas residuales sin tratamiento, sobre el dren. Aguas abajo se presentan descargas puntuales agrícolas y descargas difusas del DR 063. El dren desemboca en el estero Playa Colorada, ubicada en el Golfo de California.

2.1 APLICACIÓN DEL MODELO QUAL2K

El modelo QUAL2K fue utilizado para evaluar la calidad del agua del dren El Burrión, el dren principal del distrito de riego 063. QUAL2K es un modelo de calidad del agua para ríos y corrientes desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos como una versión modernizada del anterior modelo QUAL2E (Brown y Barnwell, 1987). Este modelo simula el transporte y destino de contaminantes convencionales; representa el cauce como un canal unidimensional con flujo no uniforme en estado permanente y simula el impacto de descargas puntuales y difusas (Chapra *et al.*, 2008). Está bien documentado y está disponible gratuitamente (<http://www.epa.gov/>). El modelo puede simular una serie de componentes, incluyendo la temperatura, pH, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda de oxígeno de sedimentos, oxígeno disuelto (OD), nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal (NH₃), nitritos (NO₂) y nitratos (NO₃), nitrógeno total, fósforo orgánico, fósforo inorgánico (PO₄), fósforo total, el fitoplancton y algas de fondo. Q2K trabaja bajo ambiente Windows, fue desarrollado en Visual Basic para aplicaciones con Excel como salida gráfica, y soportado bajo programación en Fortran.

Por las anteriores razones, QUAL2K fue elegido como el modelo de referencia para el estudio del dren El Burrión en Sinaloa, México. La simulación de la calidad del agua en drenes agrícolas es complicada, debido a la existencia de muchas fuentes puntuales y difusas. Asimismo, es difícil identificar los procesos biológicos y químicos que ocurren en los drenes sin caracterizar completamente todas las descargas (Hassanin, 2007)

2.1.1 EL MODULO FLUJO

En este modelo, la corriente se conceptualiza como una cadena unidimensional de segmentos completamente mezclada, que están vinculados de forma secuencial a través de los mecanismos de transporte advectivo y dispersivo (Figura 2). El modelo utiliza una solución de diferencias finitas para las ecuaciones de transporte de masas. El balance de masas general para un constituyente en un elemento se escribe como (Chapra *et al.*, 2008):

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

donde:

- c_i = concentración, [mg/L]
- Q_i = flujo en el *iesimo* segmento, [m³/d]
- Q_{ab} = salida en el elemento *i* debido a extracción puntual o difusa, [m³/d]
- V_i = volumen incremental del *iesimo* segmento, [m³]
- t = tiempo, [d]
- S_i = fuentes y sumideros del constituyente debido a reacciones y mecanismos de transferencia de masa, [mg/m³/d]
- E_i = coeficiente de dispersión longitudinal entre segmentos *i* y *i+1*, [m²/d]
- W_i = carga externa del constituyente en el elemento *i* [mg/d]

La ecuación diferencial es resuelta numéricamente usando un método de diferenciación implícito. Un número de ecuaciones simultáneas se generan y se resuelven usando álgebra matricial.

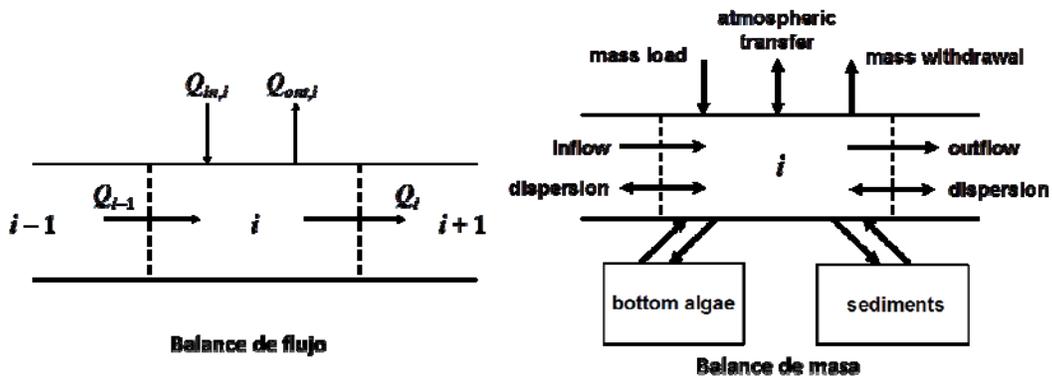


Figura 2. Representación conceptual de una corriente en QUAL2K

2.1.2 EL MODULO DE CALIDAD DEL AGUA

La Figura 3 representa el diagrama esquemático de la interacción de las variables agua de calidad del agua. Chapra *et al.*, (2008), presenta una discusión completa de la teoría de modelos resueltos en el QUAL2K.

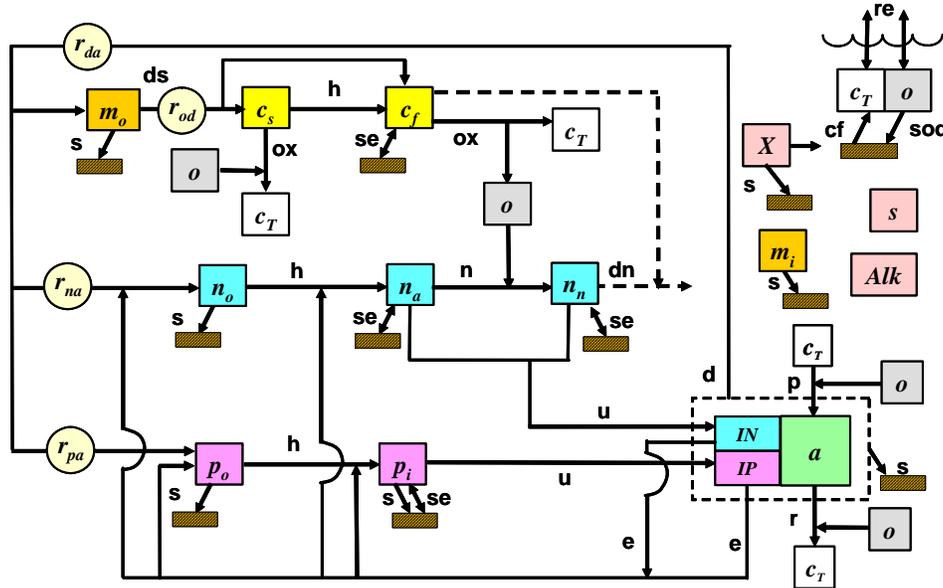


Figura 3. Modelos cinéticos y procesos de transferencia de masa del QUAL2K (Chapra *et al.*, 2008)

Procesos cinéticos: disolución (ds), hidrólisis (h), oxidación (ox), nitrificación (n), desnitrificación (dn), fotosíntesis (p), respiración (r), excreción (e), muerte (d), respiración/excreción (rx).

Procesos de transferencia de masa: reaeración (re) sedimentación (s), la demanda de oxígeno de sedimentos (SOD), intercambio de sedimento (se), y flujo de carbono inorgánico del sedimento (cf).

La transformación de los diferentes parámetros de calidad del agua y sus interdependencias se describe como sigue:

- **DBO:** Aumenta debido a la disolución de detrito, y se pierde por hidrólisis y oxidación.
- **Nitrógeno orgánico (No):** Aumenta debido a la muerte de las plantas. Se pierde por hidrólisis y sedimentación.
- **Amonio:** Aumenta debido a la hidrólisis del nitrógeno orgánico y a la respiración del fitoplancton. Se pierde por la nitrificación y fotosíntesis de las plantas.

- **Nitratos:** Aumenta debido a la nitrificación del amonio. Se pierde por la desnitrificación y fotosíntesis.
- **Fósforo orgánico:** Aumenta por la muerte de las plantas. Se pierde vía hidrólisis y sedimentación.
- **Fósforo inorgánico:** Aumenta por la hidrólisis del fósforo orgánico y la respiración del fitoplancton. Se pierde vía fotosíntesis.
- **Oxígeno disuelto:** Aumenta por fotosíntesis y se pierde vía oxidación de la DBO rápida, la nitrificación y la respiración de las plantas.
- **Fitoplancton:** Aumenta debido a la fotosíntesis. Se pierde por vía de la respiración, muerte y sedimentación.

Estos procesos son representados por modelos matemáticos. Por ejemplo, La ecuación diferencial utilizada en el QUAL2K para describir la reacción o transformación de NO_3 , se presenta en la Ecuación (2). Cada término representa una fuente o sumidero de NO_3 . El nitrógeno de nitrato aumenta debido a la nitrificación del amoníaco y se pierde por desnitrificación y la fotosíntesis de las plantas.

$$\frac{dNO_3}{dt} = F_{na} K_{na} NH_4 - (1 - F_{dn}) K_{dn} NO_3 - r_{na} (1 - P_p) \mu_p P - r_{nd} (1 - P_b) \mu_a A \quad (2)$$

donde:

- F_{na} = atenuación debido a bajos niveles de oxígeno, [adimensional]
- K_{na} = tasa de nitrificación de nitrógeno amoniacal, [1/d]
- F_{dn} = efecto de bajos niveles de oxígeno en la desnitrificación, [adimensional]
- K_{dn} = tasa de desnitrificación, [1/d]
- r_{na} = proporción de oxígeno consumido en la nitrificación, [gO₂/gN]
- P_p = preferencia de amonio como fuente de nitrógeno para el fitoplancton, [adimensional]
- μ_p = tasa de fotosíntesis del fitoplancton, [1/d]
- P = fitoplancton, [mgC/L]
- r_{nd} = proporción de oxígeno consumido en la desnitrificación, [gO₂/gN]
- P_a = preferencia de amonio como fuente de nitrógeno para algas de fondo, [adimensional]
- μ_a = tasa de crecimiento de algas, [1/d]
- A = concentración de biomasa algal, [mgA/L]

2.2 APLICACIÓN DEL QUAL2K A LA ZONA DE ESTUDIO

Para ejecutar el modelo de calidad del agua se requiere inicialmente la segmentación del tramo del cauce que se desea modelar. El cauce se puede dividir hasta en 100 tramos y cada tramo en 1000 elementos computacionales. Cada elemento de cómputo tiene características hidrogeológicas constantes.

2.2.1 SEGMENTACIÓN DEL DREN EL BURRIÓN

La Figura 4, muestra la segmentación realizada para el dren El Burrión, la cual se introduce a través de la hoja Reach diseñada para tal propósito en el Qual2k. La longitud total del cauce en estudio, de 14.8 Km, fue discretizada en 11 tramos con longitudes entre 1.0 y 1.7 Km.

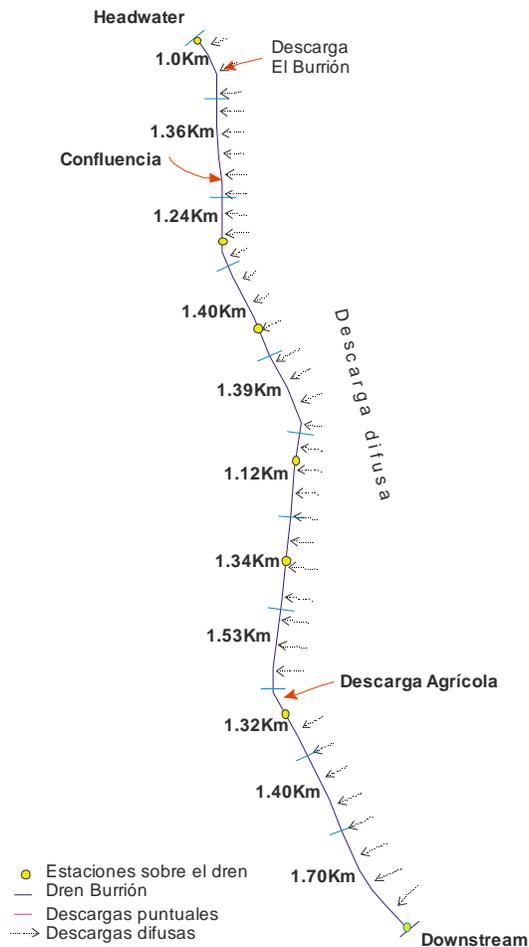


Figura 4. Segmentación y ubicación de fuentes de contaminación a lo largo del Dren El Burrión

Adicionalmente, la Figura 4 muestra la ubicación de las descargas puntuales y se considera que existe entrada de descarga difusa a lo largo de todo el dren. El modelo utiliza los datos de cabecera (Headwater) para definir la condición de frontera aguas arriba.

2.3 REQUERIMIENTO DE DATOS

Los datos geométricos y velocidades medidas en el río, fueron utilizados para determinar las características hidráulicas en cada lugar de muestreo. Los 11 tramos en que se dividió el dren, fueron a su vez, subdivididos cada uno en cuatro elementos, que son la unidad fundamental computacional del modelo.

Tabla 1: Datos geométricos e hidráulicos del Dren El Burrión

Nombre	Long. (m)	Ancho (m)	Area superficial (m ²)	Profundidad (m)	Volumen (m ³)	Tiempo de viaje (d)	Velocidad (m/s)
Tramo 1	1000.42	9	9003.79	0.30	2701.14	0.2251	0.0514
Tramo 2	1360.33	9	12242.94	0.15	1775.23	0.1479	0.1064
Tramo 3	1239.72	9	11157.44	0.11	1171.53	0.0976	0.1470
Tramo 4	1399.80	9	12598.17	0.07	818.88	0.0682	0.2374
Tramo 5	1390.37	9	12513.34	0.13	1564.17	0.1303	0.1235
Tramo 6	1122.88	9	10105.88	0.19	1869.59	0.1558	0.0834
Tramo 7	1337.40	9	12036.58	0.12	1444.39	0.1204	0.1286
Tramo 8	1529.15	9	13762.33	0.11	1513.86	0.1262	0.1403
Tramo 9	1320.55	9	11884.96	0.10	1188.50	0.0990	0.1543
Tramo 10	1399.77	9	12597.96	0.10	1259.80	0.1050	0.1543
Tramo 11	1725.50	9	15529.51	0.10	1552.95	0.1294	0.1543

En la siguiente sección se presenta el detalle de las concentraciones de los diferentes parámetros de calidad del agua, medidos en el dren El Burrión.

2.3.1 SITIOS DE MONITOREO Y DATOS INICIALES INGRESADOS AL QUAL2K

La información que se debe proporcionar referente a las descargas es la siguiente:

- Posición de las descargas en el río,
- Caudal descargado (flujo),
- Caracterización química (Concentración de los parámetros),
- Una descripción general de la descarga (opcional).

Los parámetros de calidad del agua monitoreados fueron: temperatura, conductividad, pH, OD, nitrógeno total (NT), nitrógeno de amonio (NH₄), nitrógeno de nitratos (NO₃), fósforo total, fósforo inorgánico (PO₄), flujo en el dren y en las descargas o canales tributarios (Q), velocidades y profundidades. El flujo y las velocidades fueron medidos con un medidor de flujo portátil FH950 marca HACH, tomando mediciones de la velocidad en 4 puntos a lo largo de la sección transversal del dren. El caudal del dren El Burrión para el mes de enero fue de 0.146 m³/s. Los parámetros de campo se midieron con una sonda multiparámetro YSI. El muestreo, preservación, transporte y análisis de muestras de agua se realizó siguiendo lo indicado por el Estandar Methods (APHA-AWWA-WPCF, 1989). En la tabla 2 se presentan los valores medidos para cada parámetro a lo largo del dren El Burrión y en las descargas recibidas por éste, que fueron utilizadas como condiciones iniciales aguas arriba y para calibración del modelo Qual2k.

Tabla 2: Parámetros de calidad del agua medidos en el dren El Burrión

Estación de Muestreo	Temperatura (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	SPC (µs/cm)	SDT (mg/L)	pH	NO ₃ -N (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	PO ₄ - P (mg/L)	Tipo
1	15.8	4.4	3071	1995.5	8.04	3.591	0.35	0.271	Headwater
2	23.5	0.5	3033	1976	8.15	1.881	0.01	3.783	Descarga puntual
3	15.5	9.6	2017	1313	8.79	1.026	0.6	0.318	Dren tributario
4	15.7	2.6	2948	1917.5	8.28	2.223	0.03	0.437	Dren
5	15.6	5.4	2367	1540.5	8.43	4.104	0.02	0.372	Dren
6	15.4	6.6	2730	1774.5	8.57	3.249	0.02	0.44	Dren
7	16.1	7.3	3234	2099.5	8.53	2.565	0.01	0.447	Dren
8									Dren tributario
9	17	7.5	4171	2678	8.6	2.736	0.02	0.339	Dren
10	18.2	10.2	5779	3763.5	8.78	3.249	0.03	0.341	Downwater

2.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La confiabilidad de la calibración y validación de los modelos depende de la exactitud de los datos de entrada (Hassanin, 2007). Los valores de los parámetros calibrados en el modelo se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Tasas, constantes y coeficientes usados para la simulación

Constante/coeficiente	valor adoptado	Unidades
Oxidation rate	5.5	/d
Nitrificación del amonio	5	/d
Denitrificación de nitrato	0.1	/d
Hidrolisis P orgánico	5	/d
Velocidad de sedimentación P orgánico	0.005	m/d
Velocidad de sedimentación P inorgánico	0.12	m/d
Coeficiente de sorción de P inorgánico	0.073	L/mgD
Fitoplancton:		
Máxima tasa de crecimiento	2.5	/d
Tasa de respiración	0.1	/d
Cte de sat. media de nitrógeno	2.5	ugN/L
Cte de sat. media de fósforo	500	ugP/L
Cte de sat. media de carbono inorgánico	2.00E-05	moles/L
Preferencia por amonio	10	ugN/L
Velocidad de sedimentación	0.15	m/d
Alga de fondo:		
Máxima tasa de crecimiento	100	mgA/m ² /d or /d
Tasa de respiración	0.15	/d
Tasa de Excreción	0.1	/d
Tasa de mortalidad	0.09	/d
Cte de sat. media de nitrógeno	400	ugN/L
Cte de sat. media de fósforo	10	ugP/L
Cte de sat. media de carbono inorgánico	1.00E-05	moles/L
Preferencia por amonio	50	ugN/L
Tasa de absorción máxima de nitrógeno	105	mgN/mgA/d
Tasa de absorción máxima de fósforo	5.009	mgP/mgA/d

En el caso de la tasa de reaeración, se ajustó de manera específica para los diferentes tramos del dren. Se adoptó un valor de 3 d⁻¹ para los tres primeros tramos (desde aguas arriba hasta el kilómetro 11.2) y para los siguientes tramos se usó una tasa de reaeración de 15 d⁻¹, con lo cual se logró un buen ajuste del resultado de la simulación con los datos medidos en el dren (Figura 7).

2.4.1 CALIBRACIÓN

La calibración es un proceso iterativo, en el cual el modelo se ejecuta con los datos disponibles y las estimaciones iniciales de las velocidades de reacción, de sedimentación, etc. Posteriormente, los resultados del modelo y los valores observados son comparados, y se ajustan los parámetros de calibración hasta que se logre una coincidencia razonable entre los valores modelados y observados.

La calibración del modelo para los datos de calidad del agua en cinco estaciones de monitoreo sobre el dren El Burrión, se muestran desde la Figura 5 a la Figura 7. Los resultados de la simulación se presentan como líneas continuas y los datos observados como símbolos.

Los resultados de la calibración se ajustan adecuadamente y muestran una buena correspondencia con los datos medidos, con algunas excepciones.

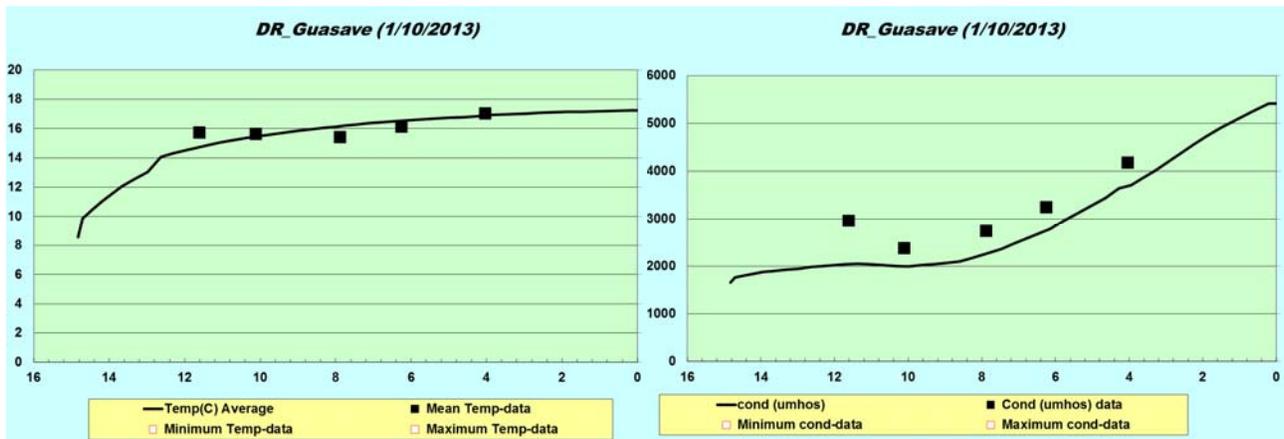


Figura 5. Resultados para la temperatura y conductividad eléctrica

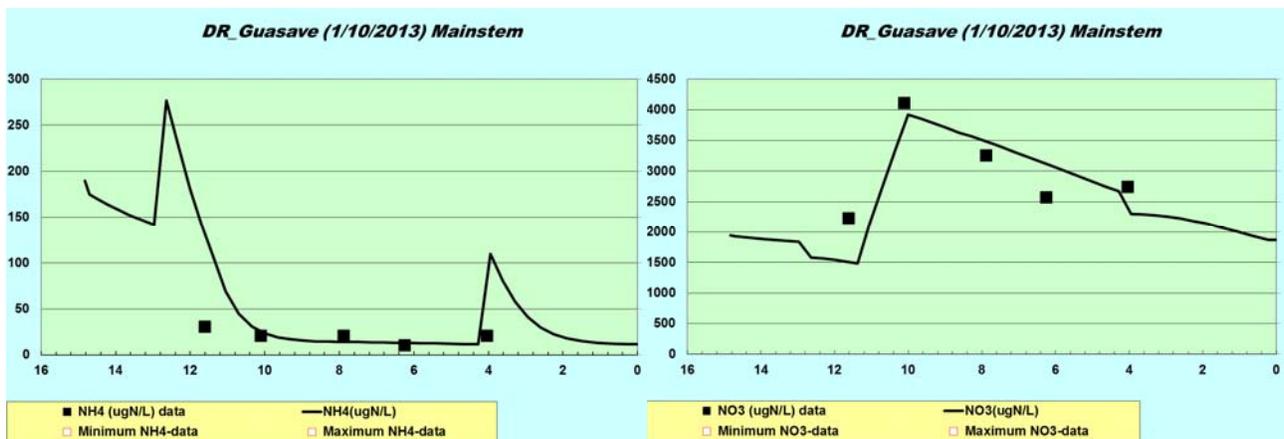


Figura 6. Resultados para el NH₄ y NO₃

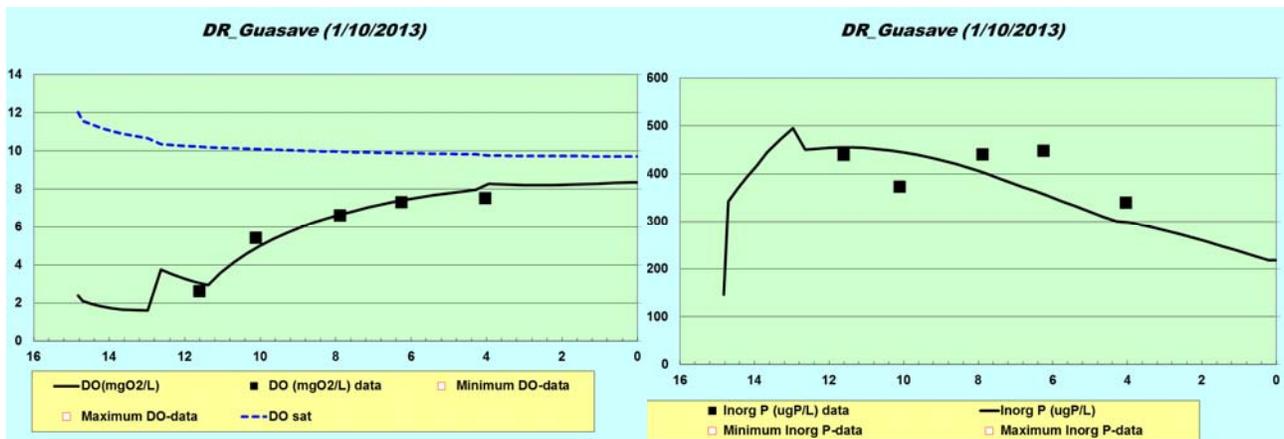


Figura 7. Resultados del Oxígeno Disuelto y Fósforo Inorgánico

3. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó la modelación de la calidad del agua del dren agrícola El Burrión, en el distrito de riego 063, en Guasave, México, mediante la aplicación y calibración del modelo QUAL2K. De

acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que este modelo representa adecuadamente los procesos de transformación que se dan en este tipo de sistemas, que son influenciados por fuentes de contaminación puntuales y difusas, provenientes de la zona agrícola.

El proceso de calibración se realizó mediante la comparación con mediciones en campo, obteniéndose un buen ajuste del modelo a las condiciones observadas. Por lo cual, el modelo QUAL2K es una herramienta confiable que puede ser aplicada para otros escenarios de descarga, así como en drenes con similares características.

Los drenes agrícolas, que adicionalmente reciben aportes de aguas residuales municipales, se destacan por presentar altas concentraciones de nutrientes y alto consumo de oxígeno; estos procesos son adecuadamente representados por el QUAL2K, por lo tanto, la aplicación de la modelación en el sistema de drenaje del distrito de riego 063, garantiza el uso de este modelo para implementar estrategias de manejo y control de nutrientes en este tipo de sistemas.

4. REFERENCIAS

- Terrones-Cordero, A. y Sánchez-Torres. (2010). Demandas de insumos de la producción agrícola en México, 1975-2011. Universidad y Ciencia, Vol. 26, núm. 1, pp. 81-91.
- Ortega, F. y Orellana, R. (2007). El riego con aguas de mala calidad en la agricultura urbana: aspectos a considerar. i. aguas salinas o alcalinas. Ciencias Técnicas Agropecuarias, 16(001), pp. 41-44.
- Brown y Barnwell. (1987). The Enhanced Stream Water Quality Model QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and user's Manual, EPA/600/3-87/039, U.S. Environmental Protection Agency.
- Chapra, S.C., Pelletier, G.J. y Tao, H. (2008). QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11: Documentation and User's Manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA.
- Hassanin, S. (2007). Evaluation of water quality of Elnasr-3 main drain in Egypt using Qual2k Model. Eleventh International Water Technology Conference, IWTC11 2007 Sharm El-Sheikh, Egypt.
- APHA, AWWA y WPCF(1989). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 17th edition, American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Pollution Control Federation (WPCF), Washington.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2011). Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Año agrícola 2009-2010. Ed., 2011. Coyoacán, México D.F. Disponible en: <ftp://ftp.conagua.gob.mx/SISI1610100092412/Estadisticas%20de%20los%20Distritos%20de%20Riego/2009-2010/Estad%EDsticas%20Agr%EDcolas%20DR%202009-2010.pdf>

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en las memorias de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito.