Dispersión de contaminantes en cuenca Tumaque entre Lara y Yaracuy en Venezuela

Rafael García Lemmo e-mail: albertlemmo_55@hotmail.com
Universidad Centro-Occidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto. Estado Lara. Venezuela.

Lué Merú Marcó Parra e-mail: mparra@ucla.edu.ve
UCLA. Barquisimeto. Estado Lara. Venezuela

Grecia Aurora Yacelli Acevedo e-mail: greciayaceli@hotmail.com
Consejo Comunal César Lovera, Caserío El Esparramadero, Munipicio Peña, Yaracuy, Venezuela.

Gosmyr Gabriella Torres Sierralta e-mail: gosmyrt@ucla.edu.ve
UCLA. Barquisimeto. Estado Lara. Venezuela.

RESUMEN
El modelo WASP 7.4 se ejecutó en la cuenca Tumaque (estados Lara y Yaracuy, Venezuela) para evaluar la dispersión de contaminantes. La caracterización geográfica de la cuenca se realizó considerando fuentes puntuales y difusas para los puntos de muestreo, apoyados en Google Earth. Se realizó una caracterización fisicoquímica y microbiológica de las aguas. Para el modelo hidrodinámico, se dividió el cuerpo de agua en doce celdas, se calibró y se utilizaron como trazadores los sólidos totales disueltos y el cloruro. La diferencia entre el valor determinado y el predicho es del 6% para el punto de control Entrada al Eneal cuando se usan sólidos disueltos como trazador.

Palabras clave: cuenca Tumaque, dispersión de contaminantes, modelo hidrodinámico.

Contaminant dispersion at Tumaque basin between Lara and Yaracuy in Venezuela

ABSTRACT
The WASP 7.4 model was applied to the Tumaque basin (Lara and Yaracuy states, Venezuela), to evaluate contaminant dispersion. The geographical characterization of the basin was made considering spot and diffuse sources for sampling points with the aid of Google Earth. Physical, chemical and biological characterization of the waters was carried out. For the hydrodinamic model, the water body was divided into 12 cells. The calibration was performed using two tracers: total dissolved solids and chlorides. The differences between determined and predicted values was 6% when dissolved solids is used as a tracer for the control point at Entrada al Eneal.

Keywords: Tumaque basin, contaminant dispersion, hydrodynamic model.

recibido: Febrero 2013 | aprobado: Abril 2014

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los elementos fundamentales para la vida, su excepcional importancia reside en todos los procesos que ocurren en la naturaleza, no sólo en los organismos vivos, animales y vegetales, sino en la superficie no organizada de la tierra (De León 2007). El agua es un bien utilizado por sus distintos usos y dependerá de su calidad el fin al que pueda ser destinada. El crecimiento acelerado de la sociedad ha conllevado un inimaginable desarrollo desde todos los puntos de vista. Este crecimiento es directamente proporcional y va en relación con el tema ambiental. Se ha acentuado la contaminación en especial en los cuerpos de agua, debido al manejo incorrecto de las aguas residuales de origen industrial, agrícola y urbano, además de las actividades mineras.

Las actividades antropogénicas han incrementado significativamente las concentraciones de metales pesados en el ambiente. Cada segundo se vierten 120 mil litros de aguas negras a ríos, lagos y mares. En Venezuela la descarga de aguas de origen doméstico se evidencia en todo el territorio nacional (MPPA 2006). El estado Lara no escapa de esta realidad ya que es una zona urbana e industrializada que genera residuos vertidos principalmente a la cuenca del río Turbio, la cual aloja uno de los reservorios de agua dulce más importantes de la región.

Durán (2008) aseveró que entre los afluentes del río Turbio se encuentra la cuenca Tumaque (estados Lara y Yaracuy), constituida mayormente por bosques densos y matorrales que actúan como reguladores del clima y refugio de la fauna silvestre, la cual nace en el Duaca y desemboca en el Turbio. Esta cuenca presenta perturbaciones que pudieran alterar la disponibilidad de agua para la zona. A lo largo de la cuenca se encuentran asentados, en comunidades, unos 250 000 habitantes, quienes desde hace más de 10 años vienen haciendo denuncias, ante diferentes entes públicos, sobre la disminución de la calidad del agua de la quebrada principal y los manantiales usados para consumo humano y riego ya que las aguas residuales de origen doméstico de las comunidades de Duaca, El Eneal y El Toro son vertidas en lagunas de estabilización para su posterior disposición en el cauce de la quebrada (MPPCTI 2009). A pesar de la problemática ambiental planteada, no se han realizado anteriormente estudios sobre los niveles de contaminación en el cuerpo de agua que permitan tomar decisiones para su gestión, y es de destacar que no se ha evaluado un modelo de transporte de contaminantes.

En consecuencia se planteó en esta investigación implementar el modelo matemático de dispersión de contaminantes WASP 7.4 (Water Quality Analysis Simulation Program) (USEPA 2010) capaz de predecir y simular el transporte de escalares, presentes en diferentes cuerpos de agua (lagos, ríos, estuarios), incluyendo sedimentos y metales pesados. El sistema representa básicamente los procesos de transporte y dispersión de constituyentes originados en fuentes puntuales y difusas, permitiendo calcular sus variaciones espaciales y temporales (USEPA 2010), en la cuenca Tumaque que nace en la población de Duaca, estado Lara y desemboca en la cuenca del Río Turbio, a nivel de la población de Agua Negra, estado Yaracuy en Venezuela. Esta última cuenca constituye el ecosistema de estudio en el marco del proyecto ARCAL RLA 010, bajo el cual se armonizaron criterios para la gestión de cuerpos de agua superficiales contaminados con metales, entre los cuales destaca el uso del programa establecido WASP para la modelación del transporte de contaminantes (Cicerone et al. 2011).

ESTUDIO GEOGRÁFICO DE LA CUENCA TUMAQUE

Se utilizó la herramienta Google Earth (2010) para la ubicación geográfica, demarcando el trayecto principal de la cuenca Tumaque y afluentes secundarios, en el tramo comprendido por las poblaciones de Duaca, El Eneal, El Toro, El Cardón y El Esparramadero. A partir de esto se

delimitó el área en función del relieve y topografía mediante un polígono, dentro del cual se ubicaron las poblaciones de interés y los puntos de muestreo. La fotografía de Google Earth y su relación con la localización en el mapa de Venezuela se muestran en la figura 1.

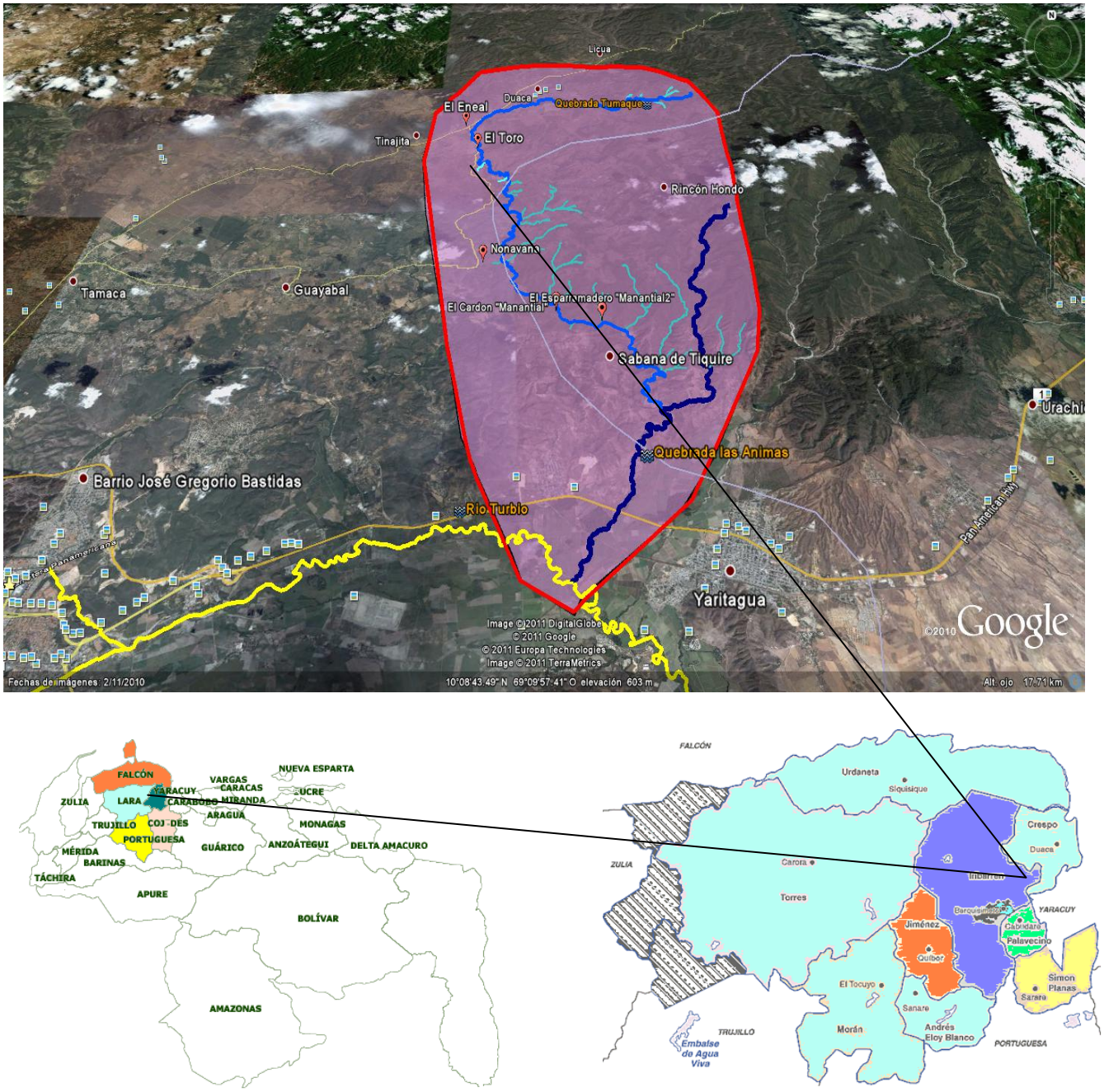


Figura 1. Trayectoria principal de la quebrada de Tumaque (azul cielo), afluentes secundarios (azul claro), la quebrada Las Ánimas (azul oscuro) y el Rio Turbio (amarillo).

La cuenca Tumaque recorre en su trayectoria desde su nacimiento en la parte alta de Duaca, municipio Crespo del estado Lara, hasta su desembocadura en la quebrada las Ánimas en el municipio Peña del estado Yaracuy una distancia de 49000 m aproximadamente. El área de la

cuenca Tumaque, la cual abarca parte de los estados Lara y Yaracuy, cuenta con una extensión de aproximadamente 548,5 km^2. Las coordenadas UTM de la cuenca Tumaque son: Norte: 10º 18' 35" N; 69º 09' 11" O, Sur: 10º 04' 02" N; 69º 09' 47''O, Oeste: 10º 11' 54'' N; 69º 12' 03'' O, Este: 10º 11' 54" N; 69º 05' 57" O.

El diseño, establecimiento y realización del muestreo, así como los análisis, se hizo dentro del marco de los lineamientos del proyecto ARCAL RLA/1/010. (Alberro et al. 2011).

MEDIDAS PRELIMINARES PARA APLICAR MODELO WASP 7.4 DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

Batimetría y medición de caudal

Se realizó la prueba de batimetría. Básicamente se seleccionó una sección del río, se procedió a medir el ancho y luego el ancho fue dividido en secciones de 20 cm. En cada uno de esos puntos se midió la altura del agua a distintas profundidades hasta completar la sección. El caudal se determinó mediante aforo, aplicando los métodos de sección-velocidad y volumétrico.

Parámetros necesarios para la implementación de un modelo hidrodinámico

Para la realización del modelo hidrodinámico se utilizó el programa WASP 7.0 (USEPA 2010), de acuerdo con los lineamientos armonizados establecidos en el proyecto ARCAL RLA 010. Como lo señala la metodología fue necesario hacer los cálculos de velocidad y caudal. Por otro lado fue necesario determinar la distancia entre los diferentes puntos de muestreo, para lo que se contó con la ayuda de la herramienta Google Earth (2010).

El programa WASP utiliza para el transporte advectivo y dispersivo de constituyentes las ecuaciones basadas en el principio de conservación de la masa, considerando cada constituyente de calidad del agua en el balance y que los mismos se transportan desde su fuente hasta la descarga conservando su masa en el espacio y en el tiempo. Deben definirse propiedades tales como: discretización del cuerpo de agua, características del transporte dispersivo y advectivo, concentraciones en los bordes, fuentes de cargas distribuidas y puntuales, parámetros cinéticos y concentraciones iniciales (Nader 2009).

El modelo matemático presenta una ecuación de balance, para cada constituyente, con una ecuación diferencial (1) en derivadas parciales genérica de la forma:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(uc) - \frac{\partial}{\partial t}(vc) - \frac{\partial}{\partial t}(wc) + \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial c}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(E_z \frac{\partial c}{\partial z}\right) + S_L + S_B + S_K \quad (1)$$

donde: c es la concentración puntual del constituyente (mg/l); t es el tiempo (días); u, v, w son las componentes de la velocidad longitudinal, lateral y vertical respectivamente (m/s); E_x, E_y, E_z son los coeficientes de difusión turbulenta longitudinal, lateral y vertical respectivamente (m^2/s); S_L es la tasa de carga directa y difusa (g/(m^3 día)); S_B es la tasa de carga de contorno (g/(m^3 día)); y S_K es la tasa de transformaciones cinéticas totales, positiva si es una fuente y negativa si es un sumidero (g/(m^3 día)).

En el sistema estudiado la escala espacial en el sentido principal del escurrimiento es significativamente mayor que las escalas de ancho y la profundidad, y se puede aceptar que existe homogeneidad vertical y lateral de las concentraciones de los constituyentes. Por tanto el transporte se supone unidireccional y se puede aplicar la ecuación unidimensional (2):

$$\frac{\partial}{\partial t}(AC) = \frac{\partial}{\partial x}\left(-U_x AC + E_L A \frac{\partial C}{\partial x}\right) + A\left(S_L + S_B\right) + A\left(S_K\right) \quad (2)$$

donde: C es la concentración media del constituyente en la sección (mg/l); U_x es la velocidad media en la sección (m/s); A es el área de la sección transversal al flujo (m^2); y E_L es el coeficiente de dispersión longitudinal (m^2/s). En el segundo miembro, en el primer paréntesis se representa el campo advectivo y el dispersivo, luego las tasas de cargas y, por último, los distintos tipos de transformaciones (Nader 2009).

El mecanismo de advección del agua de los poros del lecho, sólo para agua y metal disuelto se representa mediante la ecuación (3).

$$\frac{\partial M_{ik}}{\partial t} = Q_{ji} f_{Dj} C_{jk} / n_j \qquad (3)$$

donde: M_{ik} es la masa del metal pesado k en la celda i (g); C_{jk} es la concentración total de metal pesado k en la celda j (mg/l); l_w es el volumen de agua en la celda; l el volumen total de la celda; nj es la porosidad de la celda j (definida como l_w/l); f_{Dj} es la fracción disuelta de metal pesado en la celda j; y Q_{ji} es el flujo de agua de los poros desde j hacia i (m^3/día).

El intercambio entre la superficie béntica y la columna de agua para los sólidos suspendidos viene dado por la ecuación (4):

$$W_{Bs} = A_{ij}\left(W_R S_i - W_D S_j\right) \quad (4)$$

donde: W_{Bs} es el flujo neto de sedimentos (g/día); S_i es la concentración de sedimentos en la celda i (g/m^3); S_j es la concentración de sedimentos en la celda j (g/m^3); W_D es la velocidad de depositación (m/día); W_R es la velocidad de resuspensión (m/día); A_{ij} es el área de la superficie del lecho en planta (m^2); i es la celda del lecho; y j es la celda de la columna de agua.

Aceptando una profundidad constante del lecho, y se desprecia el flujo dispersivo, el balance de sedimentos en un lecho superior estacionario se representa mediante la ecuación (5):

$$di\frac{\partial S_i}{\partial t} = W_D S_j - (W_R + W_S) S_i \qquad (5)$$

donde: d_i es la profundidad (m); S_i es la concentración de sedimentos en el lecho superior (g/m^3); S_j es la concentración de sedimentos en el agua (g/m^3) y W_S es la velocidad de sedimentación del lecho superior (m/día);

Y para la capa inferior del lecho:

$$d_k \frac{\partial S_k}{\partial t} = W_S S_i - W_{Sk} S_k \qquad (6)$$

donde: S_k es la concentración de sedimentos en el lecho inferior (g/m^3); W_{sk} es la velocidad de sedimentación del lecho inferior (m/día); d_k es la profundidad del lecho inferior (m).

Considerando que existe un equilibrio de sorción debido a que las reacciones de adsorción y desorción entre sedimentos y metales son significativamente más rápidas que otros procesos ambientales e hidrodinámicos, se pueden establecer las ecuaciones (7) y (8).

$$C_{Sij} = f_S C_{ij} \qquad (7) \qquad\qquad C_{Wij} = f_D C_{ij} \qquad (8)$$

donde: C_{sij} es la concentración adsorbida del metal i sobre el sólido s en la celda j (mg/l); C_{wij} es la concentración disuelta del metal i en la celda j (mg/l); y C_{ij} es la concentración total del metal i en la celda j (mg/l).

Bajo la condición de equilibrio instantáneo es válido el concepto de coeficiente de partición (K_d) y se establecen las ecuaciones (9) y (10).

$$f_D = \frac{n}{n + \sum_S K_d M_S} \qquad (9) \qquad\qquad f_S = \frac{K_d M_S}{n + \sum_S K_d M_S} \qquad (10)$$

donde: M_s es la concentración de los sólidos en suspensión de tipo *s* (kg/L) y K_d es el coeficiente de partición del metal en *s* (L/kg) (Nader 2009).

Parámetros del sistema y discretización del cuerpo de agua en celdas, volúmenes e intervalo de tiempo para la calibración del modelo hidrodinámico

El tipo de modelo conceptual utilizado fue el de transporte de tóxicos simples (metales), ya que este modelo hidrodinámico persigue modelar el transporte de metales contaminantes. Para los parámetros de transporte se tomó en consideración sólo el flujo advectivo, bajo el formato de caudal (m^3/s), debido a que el número de Peclet (Pe) calculado a partir de las ecuaciones (11), (12) y (13) cumple el criterio para flujo advectivo en todo el sistema en estudio, como se muestra posteriormente. El número de Peclet se define como la relación entre el número de Courant advectivo *Ca* y el número de Courant dispersivo *Cd*:

$$Pe = \frac{C_a}{C_d} \qquad (11)$$

donde: $C_a = \frac{U\,\Delta t}{\Delta x}$ (12) $\qquad\qquad C_d = \frac{D\,\Delta t}{\Delta x^2}$ (13)

donde: C_a es el número de Courant para flujo advectivo, C_d es el número de Courant para flujo dispersivo, U es la velocidad media de circulación, Δt y Δx son los pasos de tiempo y distancia utilizados en el modelo y D = coeficiente de dispersión. Se utilizó un coeficiente de dispersión de valor 1 arbitrariamente, ya que posteriormente se determinó que el sistema no fue sensible a cambios en este parámetro.

Se realizó una segmentación con doce (12) celdas en diferentes puntos de muestreo seleccionados. Los volúmenes de cada celda se calcularon a partir de los datos de la batimetría y determinación volumétrica. En la versión utilizada para este trabajo, el WASP calcula el intervalo de tiempo óptimo a partir de la geometría de las celdas y la velocidad advectiva. De esta forma se asegura la ejecución más eficiente del modelo y se minimiza la dispersión numérica causada por intervalos de tiempo demasiado pequeños. Durante la calibración del modelo se realizó la evaluación de la sensibilidad respecto a la dispersión longitudinal y la velocidad de sedimentación, de acuerdo con los criterios presentados por Nader (2009), donde se establece una variación alrededor de un intervalo del 50% por encima y por debajo del valor inicialmente estimado. El proceso es manual, se dejan fijos todos los parámetros a excepción del evaluado. Se estima la diferencia porcentual simple entre el valor experimental y el valor reportado por el modelo en el punto de control. Dado que los datos provienen de una sola campaña no fue posible establecer criterios estadísticos más robustos.

ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

Como respuesta a las denuncias de los pobladores de diferentes comunidades y del Consejo Comunal "César Lovera" del caserío El Esparramadero del estado Yaracuy, el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente en conjunto con el Departamento de Química de la Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado" realizó la toma de muestras y la determinación de parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, metales pesados y agroquímicos para este estudio

con el fin de evaluar la calidad del agua presente en la quebrada Tumaque y reservorios naturales. Para el procedimiento de muestreo y análisis se siguieron los lineamientos establecidos en el manual de protocolos armonizados del proyecto ARCAL RLA 010 (Alberro et al. 2011).

MODELADO DE LA CUENCA TUMAQUE, ESTADO LARA

Batimetría

En relación con este parámetro los perfiles originados se muestran a continuación en las figuras 2, 3, 4, 5 y 6:

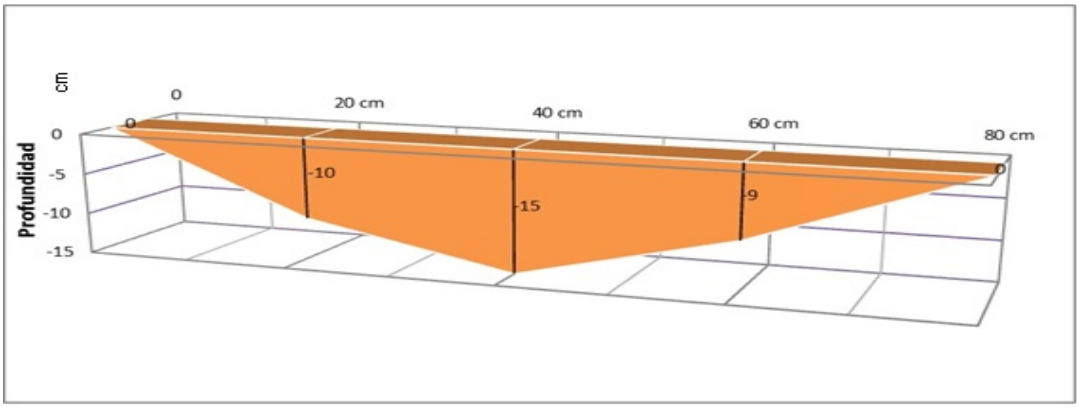


Figura 2. Batimetría Duaca

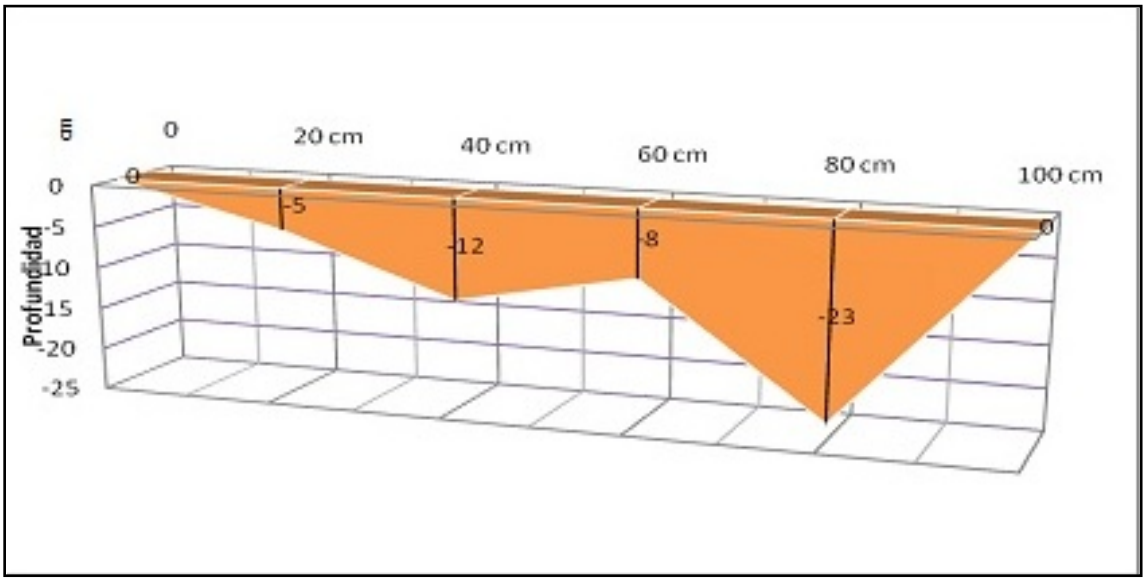


Figura 3. Batimetría Entrada al Eneal

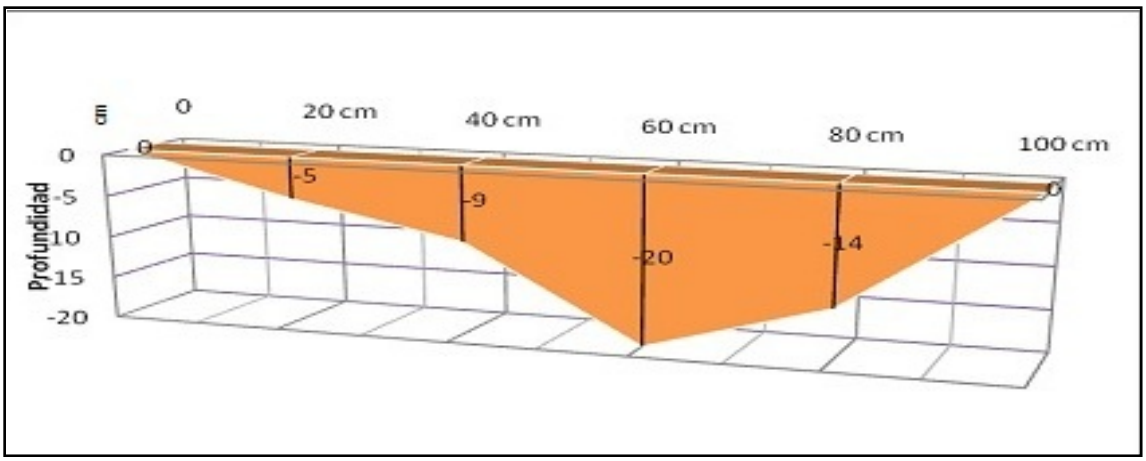


Figura 4. Batimetría salida del Eneal

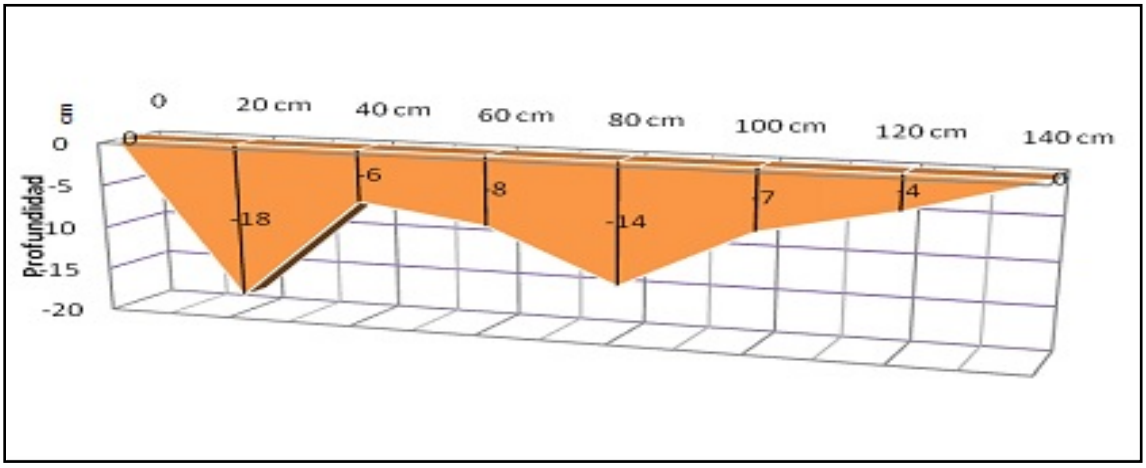


Figura 5. Batimetría salida de El Toro

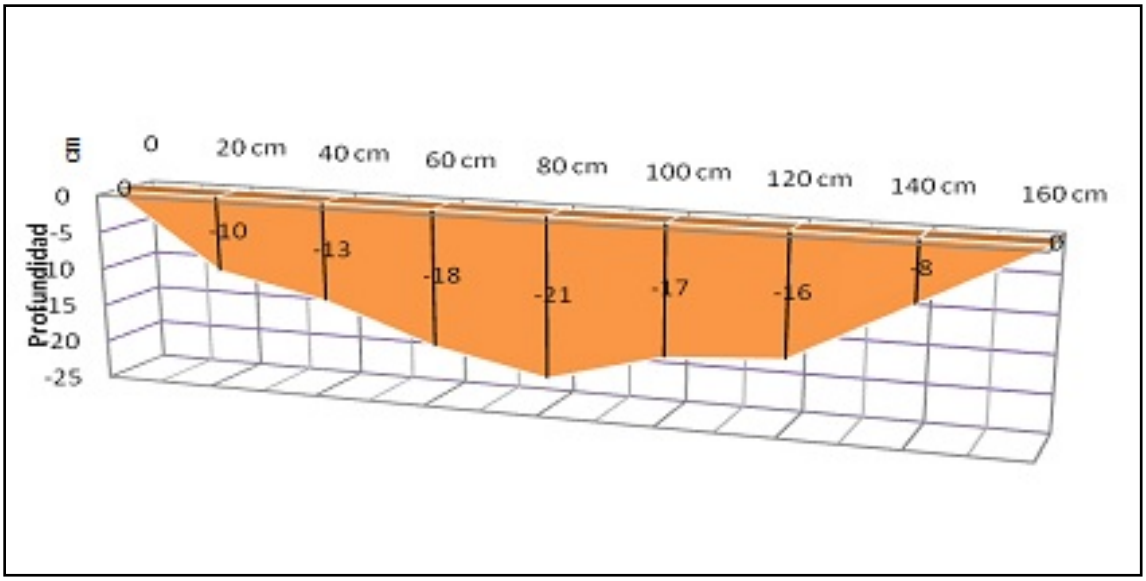


Figura 6. Batimetría Esparramadero

Caudal

En la tabla 1 se observan las áreas totales, la velocidad promedio y el caudal para cada punto donde se realizó la batimetría, se evidencia que el caudal es poco, lo que pudo ser originado por la sequía prolongada que tuvo lugar en el periodo 2008-2009, como lo demuestran los valores de precipitación mensual en el reporte anual del INAMEH (2009).

Tabla 1. Resumen de área, velocidad y caudal de la cuenca Tumaque

Características / Punto de muestreo	Área (m^2)	Velocidad (m/s)	Caudal (m^3/s)	Caudal (L/s)
Duaca	0,068	0,15	0,0102	10,2
Entrada al Eneal	0,092	0,23	0,0210	21,04
Salida del Eneal	0,093	0,26	0,0234	23,79
Salida El Toro	0,118	0,27	0,0318	31,86
El Esparramadero	0,199	0,20	0,0398	39,8

Para los puntos Manantial 1 y 2 se utilizó el método volumétrico para la medición del caudal, donde los valores obtenidos se reportan en la tabla 2.

Tabla 2. Caudal obtenido por método volumétrico

	Tiempo promedio (s)	Volumen (L)	Caudal (L/s)
Manantial 1	20,2	20	0,99
Manantial 2	49,4	20	0,40

MODELO HIDRODINÁMICO

Discretización del cuerpo de agua en celdas para el modelo hidrodinámico

El modelo hidrodinámico abarca el sector comprendido entre Duaca y El Esparramadero, supone que la cuenca tiene 4 incorporaciones principales: la salida del Eneal, la salida del Toro, Manantial 1 y Manantial 2. Se divide en doce celdas como se observa en la tabla 3. Para el modelo se adopta un flujo advectivo debido a que el número de Peclet calculado a partir de las ecuación (11) y los datos de las tablas 1 y 3 es siempre mayor que 50 en todos los segmentos del sistema si se acepta un coeficiente de dispersión de 1 m^2s^{-1} y mayor que 5 m^2s^{-1} para un coeficiente 10 veces mayor. Para un L promedio de 2243 m y un flujo promedio de 0,222 ms^{-1} (tomando promedios de los datos de las tablas 1 y 3), el valor del número de Peclet obtenido fue del orden de 500 utilizando ecuación (11). Es importante tomar en cuenta que las variaciones en las concentraciones de los trazadores nunca son mayores del doble de la concentración entre los puntos muestreados a lo largo de la grilla que representa el modelo conceptual (ver figura 7).

El modelo se esquematiza en la grilla de dispersión como se muestra en la figura 7. Los parámetros asociados, que fueron obtenidos principalmente por la batimetría se presentan en la tabla 1. Las distancias de los puntos de muestreo se presentan en la tabla 4. Los volúmenes de cada celda se calcularon a partir de los datos de estos dos parámetros anteriores.

Tipo de modelo conceptual para el transporte de hierro y zinc

Para el caso particular de los metales, se tomaron para el análisis de dispersión y transporte de los metales, los que en el análisis de laboratorio presentaron concentraciones variables, los cuales fueron el zinc y el hierro en Duaca, Entrada El Eneal, Salida El Eneal, El Toro, Manantial 1, Manantial 2 y Esparramadero (ver tabla 5).

Tabla 3. Celdas o segmentos del modelo hidrodinámico

Segmentos	Distancia (m)
Duaca	3308
Duaca ½	3310
E. Eneal	1132
S. Eneal	2234
El Toro	2435
SEG 1	2765
SEG 2	2550
SEG 3	2650
SEG 4	2978
Manantial 1	2215
Manantial 2	342
Esparramadero	1000

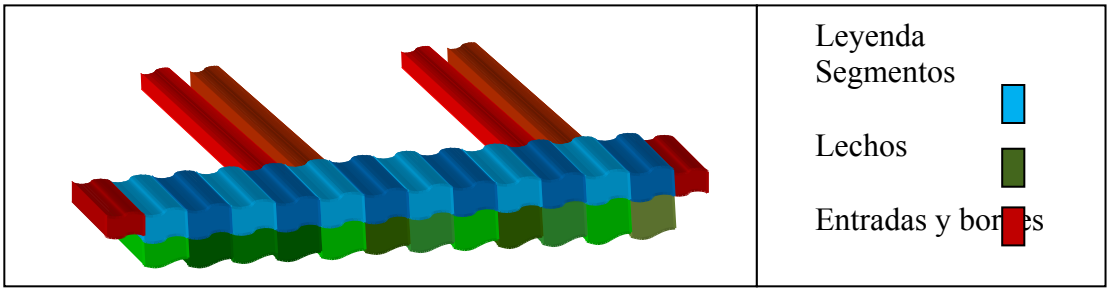


Figura 7. Grilla de dispersión en cuenca Tumaque desde Duaca hasta El Esparramadero

Tabla 4. Distancia entre los puntos de muestreo de la cuenca Tumaque

Puntos de muestreo	Distancia (m)
Duaca - E. Eneal	6618
E. Eneal - S. Eneal	1132
S. Eneal – El Toro	2234
El Toro - Manantial 1	13378
Manantial 1 - Manantial 2	2215

Tabla 5. Bordes y concentración de hierro y zinc

Bordes	Zinc (mg/l)	Hierro (mg/l)
Duaca	0,02	0,26
Entrada al Eneal	0,09	0,08
Salida del Eneal	0,02	0.10
El Toro	0,52	0,24
Manantial 1	0,03	0,10
Manantial 2	0,06	0,10
Esparramadero	0,14	0,26

Parámetros de transporte para el modelo hidrodinámico

El sistema no fue sensible al coeficiente de dispersión, área y distancia de intercambio. En la tabla 6 se observan los coeficientes de dispersión y las áreas de los segmentos.

Tabla 6. Área y coeficiente de dispersión de los segmentos

SEGMENTO	Área de la sección (m^2)	Coeficiente de Dispersión (m^2s^{-1})
Duaca	0,068	1
Duaca ½	0,068	1
E. Eneal	0,092	1
S. Eneal	0,093	1
El Toro	0,118	1
SEG 1	0,118	1
SEG 2	0,118	1
SEG 3	0,118	1
SEG 4	0,118	1
Manantial 1	0,118	1
Manantial 2	0,118	1
Esparramadero	0,199	1

Parámetros de carga y descarga de contaminantes para los modelos hidrodinámico y de transporte de contaminantes

Este grupo de parámetros incluye concentraciones en los límites (o bordes) y descargas de contaminantes y el punto de control Entrada al Eneal. A los fines del modelo hidrodinámico se probaron dos trazadores: sólidos totales disueltos y la concentración de cloruros en Duaca, Entrada al Eneal, Salida del Eneal, el Toro, Manantial 1, Manantial 2 y Esparramadero, para la calibración del modelo (ver tabla 7).

Tabla 7. Bordes, punto de control* y concentración de sólidos totales disueltos y cloruro

Bordes	Sólidos disueltos totales (mg/l)	Cloruro (mg/l)
Duaca	884	77,9
Entrada al Eneal*	924	110
Salida del Eneal	862	110
El Toro	1239	138
Manantial 1	743	68,83
Manantial 2	76	4,11
Esparramadero	668	67

En las figuras 8, 9 y 10 se presentan las gráficas comparativas entre los valores predichos en el modelo y los experimentales. Se observa en la figura 8 que la diferencia entre el valor determinado y el valor predicho por el modelo para los cloruros es mayor que el 20 % para el punto de entrada al Eneal.

Los cambios en la dispersión y los parámetros hidrodinámicos no produjeron una reducción de la diferencia cuando se utiliza la concentración de cloruros como trazador. Para el caso de los sólidos disueltos la diferencia obtenida es del 6 % para el mismo punto, lo cual indica que el modelo hidrodinámico se calibró de forma correcta, tal cual lo reportó Chirinos (2010) al utilizar la misma metodología presentada en este trabajo.

En relación con el transporte de los sólidos suspendidos, se observa en la figura 9 que lo predicho por el modelo WASP 7.4 se ajusta al comportamiento obtenido en las mediciones, con una incertidumbre no mayor del 36%, específicamente en el punto entrada al Eneal. En la tabla 8 se observan los datos de la predicción del modelo hidrodinámico. En este caso, el modelo realiza una sobreestimación del parámetro, la cual no fue posible corregir con cambios en los parámetros de entrada. Se deben realizar mediciones de los mismos, y ajustes en las velocidades

de sedimentación estimadas experimentalmente, como planteó Nader (2009) en su trabajo. Esto no fue posible en este primer estudio realizado al ecosistema.

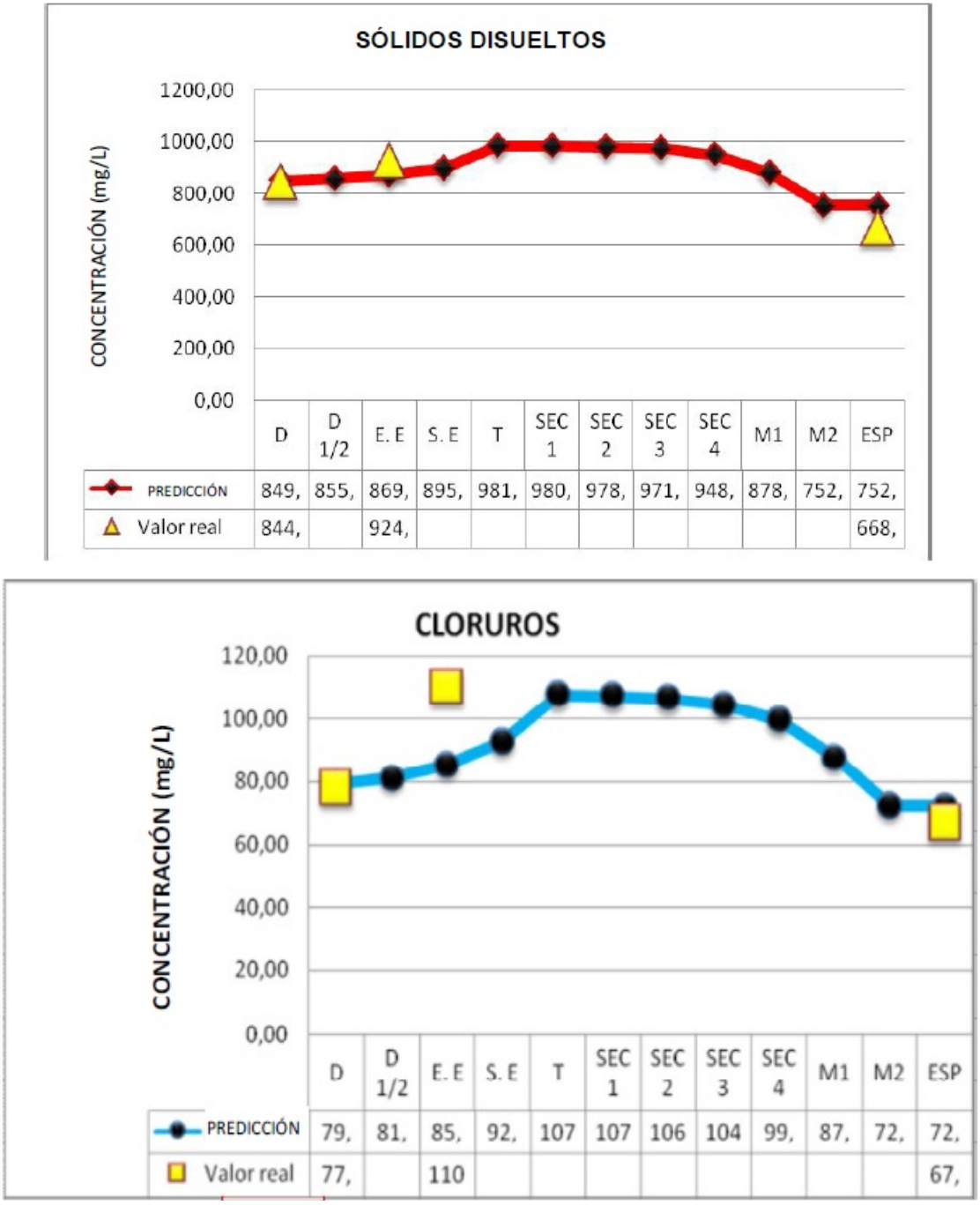
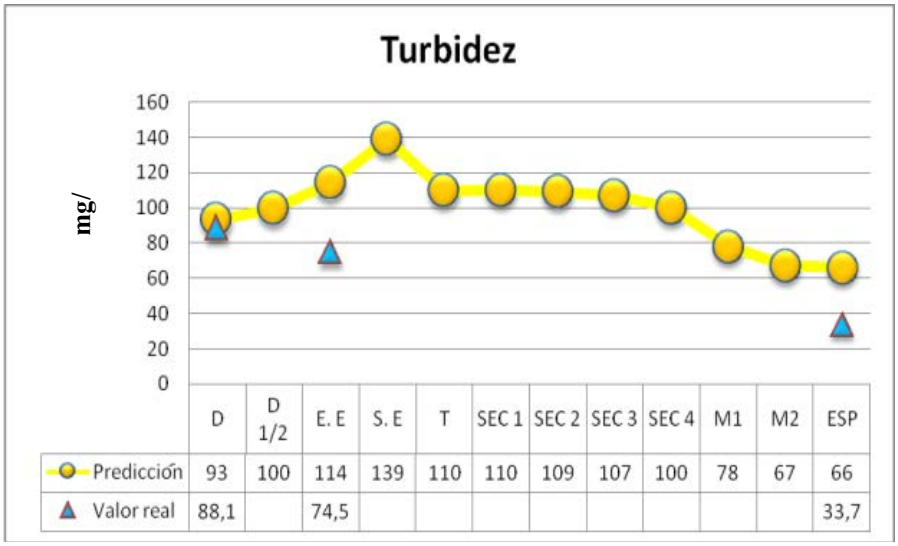
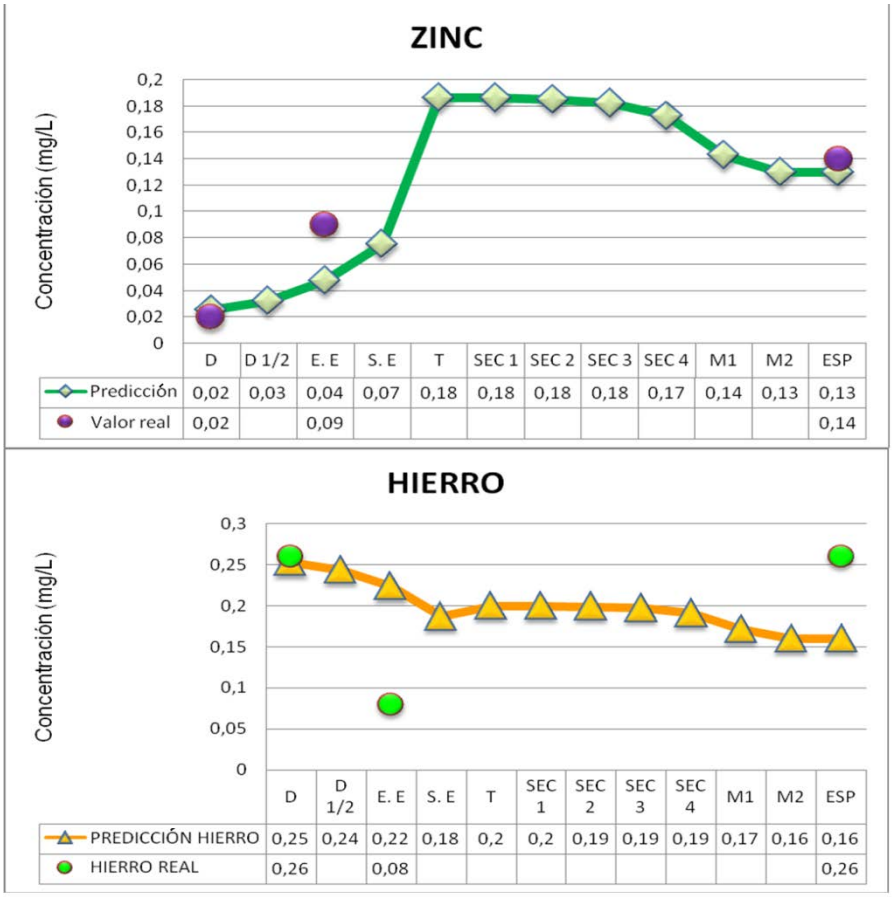


Figura 8. Gráficas de calibración del modelo WASP



	D	D 1/2	E. E	S. E	T	SEC 1	SEC 2	SEC 3	SEC 4	M1	M2	ESP
Predicción	93	100	114	139	110	110	109	107	100	78	67	66
Valor real	88,1		74,5									33,7

Figura 9. Gráfica comparativa entre la predicción y el valor real de la turbidez



	D	D 1/2	E. E	S. E	T	SEC 1	SEC 2	SEC 3	SEC 4	M1	M2	ESP
Predicción	0,02	0,03	0,04	0,07	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,14	0,13	0,13
Valor real	0,02		0,09									0,14

	D	D 1/2	E. E	S. E	T	SEC 1	SEC 2	SEC 3	SEC 4	M1	M2	ESP
PREDICCIÓN HIERRO	0,25	0,24	0,22	0,18	0,2	0,2	0,19	0,19	0,19	0,17	0,16	0,16
HIERRO REAL	0,26		0,08									0,26

Figura 10. Gráfica comparativa entre la predicción y el valor real del zinc y hierro

Tabla 8. Parámetros hidrodinámicos

SEGMENTO / Puntos de muestreos	Área de la sección (m^2)	Largo (m)	Volumen de celda (m^3)	Velo-cidad (m/s)	Profundidad máxima (m)	Ancho (m)	Caudal (m^3/s)
Duaca	0,068	3308	224,94	0,15	0,15	0,8	0,0102
Duaca ½	0,068	3310	225,08	0,15	0,15	0,8	0,0102
E. Eneal	0,092	1132	104,15	0,23	0,23	1,0	0,0212
S. Eneal	0,093	2234	207,76	0,27	0,20	1,0	0,0242
El Toro	0,118	2435	287,33	0,27	0,18	1,4	0,0319
SEG 1	0,118	2765	326,27	0,27	0,18	1,4	0,0319
SEG 2	0,118	2550	300,90	0,27	0,18	1,4	0,0319
SEG 3	0,118	2650	312,70	0,27	0,18	1,4	0,0319
SEG 4	0,118	2978	351,40	0,27	0,18	1,4	0,0319
Manantial 1	0,118	2215	261,37	0,27	0,18	1,4	0,0319
Manantial 2	0,118	342	40,36	0,27	0,18	1,4	0,0319
Esparramadero	0,199	1000	119,0	0,20	0,23	1,6	0,0398

En la figura 10 se presentan las gráficas comparativas entre valores predichos del modelo y la evidencia experimental. Se distingue que la diferencia entre el valor determinado y el predicho por modelo en los puntos de control, para el caso del Zinc fue de 55 % inferior al valor experimental en el punto de control. Para el punto entrada Eneal los valores (predicho y experimental) fueron similares; para el caso del Hierro las diferencias observadas fueron 63 % mayores que el valor experimental para el punto de control entrada al Eneal. Es importante tener en cuenta que en el estudio no se toma en cuenta el comportamiento químico de ambos metales en el agua y su especiación. También debe destacarse que el valor de pH en el agua del punto de control Entrada Eneal fue el máximo, alcanzando un valor de 8, lo cual ejerce un efecto determinante sobre la concentración de ambos metales en agua que no fue tomado en cuenta en este estudio y que escapa al marco establecido en el mismo. El sistema no fue sensible a cambios en los valores de los datos de entrada, como lo describe Nader (2009). De igual forma, los resultados presentan una incertidumbre mayor del 50 %, entre el valor predicho y el medido para la concentración de metales, en el punto de control entrada al Eneal.

CONCLUSIONES

El sistema de posicionamiento global de Google Earth permitió desarrollar el estudio geográfico de la cuenca Tumaque, a través de mapas generados de imágenes satelitales, donde se calculó la trayectoria de la Quebrada principal, sus puntos exactos de desembocadura, efluentes secundarios, relieve y vertientes de la cuenca. Además permitió delimitar el área con coordenadas geográficas. El modelo WASP 7.4 permitió calibrar el modelo hidrodinámico con una incertidumbre menor de 6% cuando se utiliza como trazador la concentración de sólidos disueltos totales, suponiendo un flujo advectivo. El modelaje de la concentración de sólidos suspendidos y de los elementos Zn y Fe presentó diferencias importantes que no fueron resueltas, del orden del 30% para los sólidos suspendidos y del 50% para los metales, lo cual indica que deben tomarse en cuenta nuevos aspectos como la estimación experimental de las velocidades de sedimentación, la textura de los sedimentos y la especiación química de los metales. El sistema no fue sensible a cambios en los valores de los datos de entrada referentes a la dispersión longitudinal.

RECONOCIMIENTO

Al proyecto ARCAL RLA 010 y proyecto del Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico, código: RAG-001-2007 de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado por el financiamiento de esta investigación.

REFERENCIAS

Alberro N., Bedregal P., Crubellati R. y Stegen, S. (2011).“Manual de protocolos armonizados y evaluados para la toma de muestra y análisis de agua y sedimentos para la región de América Latina y el Caribe”. Proyecto ARCAL RLA 010. Auspiciado por Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA). 1ª edición: Patricia Bedregal Salas, Lima, Perú.

Chirinos F. (2010). “Calibración del modelo hidrodinámico (Programa WASP 7.4) y kit de acuicultor para la caracterización fisicoquímica de las sub-cuencas media y baja del río Turbio”. Trabajo Especial de Grado, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Venezuela.

Cicerone D., Magallanes J., Sánchez P., Nader M. y Bedregal P. (2011). “Manual de gestión de información ambiental: bases de datos y modelización para evaluación de la calidad de agua de cuerpos de aguas superficiales”. Proyecto ARCAL RLA 010. 1ª edición: Patricia Bedregal Salas, Lima, Perú.

De León M. (2007). “Agua que malgastas hoy”. Extraído de: http://burica.wordpress.com/2007/03/22/25-es-dulce-y-975-es-agua-salada-en-el-mundo/, en noviembre 2010.

Durán J. (2008). “Propuesta para la constitución de un polo de desarrollo sustentable en la cuenca hidrográfica de Tumaque, que inserte a las comunidades adyacentes en los estados Lara y Yaracuy”. Trabajo Especial de Grado. Univ.Bolivariana de Venezuela, estado Lara, Venezuela.

Google Earth (2010). “Descarga de la versión de Google Earth 5.1 (Programa en línea)”. Extraído de: http://earth.google.es/, en febrero 2010.

INAMEH (2009). “Precipitación año hidrológico 2008-2009”. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, extraído de: http://www.inameh.gob.ve/, en febrero 2011.

MPPA (2006). “Saneamiento del río Turbio-estado Lara”. Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, extraído de: http://www.marn.gov.ve/default.asp?caso=11&idrev=21&idsec=215&idart=937, en febrero 2011.

MPPCTI (2009). “Informe sobre Análisis de aguas de la cuenca Tumaque, temporada de sequía, estados Lara y Yaracuy”. Ministerio del Poder Popular para Ciencia, Tecnología e Industrias Intermedias. Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico, Sartenejas, Venezuela.

Nader G. (2009). “Conceptualizar, formular y calibrar un modelo que prediga el transporte de contaminantes metálicos en el río Reconquista en el tramo comprendido entre la ex Ruta 8 y la Panamericana”. Tesis de Licenciatura en Análisis Ambiental. Universidad Nacional San Martín, Buenos Aires, Argentina.

USEPA (2010). “Water Quality Analysis Simulation Program (WASP)”. Manual en línea. United States Environmental Protection Agency. Ecosystems Research Division, extraído de: http://www.epa.gov/athens/wwqtsc/html/wasp.html, en febrero 2010.