

Aplicación de un modelo dinámico para determinar la contaminación y remoción de metales pesados del río Moche – Valle Santa Catalina

Application of a dynamic model to determine the contamination and removal of heavy metals from the Moche River - Santa Catalina Valley

Victor Ascurra Valle^{1,*}

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Santa, Av. Pacífico N° 508 – Nuevo Chimbote, Ancash, Perú.

* Autor correspondiente: alejoav2@hotmail.com (V. Ascurra)

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo aplicar un modelo dinámico para determinar el nivel de contaminación por metales pesados en el río Moche, sector valle Santa Catalina para un horizonte de 20 años. La metodología aplicada corresponde al modelamiento matemático-estadístico utilizado para seleccionar y construir modelos de predicción dinámicos. Al analizar la información histórica se pudo deducir un comportamiento decreciente de la concentración promedio de metales pesados en el tiempo y un incremento significativo en las concentraciones, de dichos metales en la cuenca media del río Moche. Los modelos seleccionados corresponden a funciones exponenciales decrecientes, polinomiales y en algunos casos corresponden a modelos construidos a partir de la serie de Fourier. Los resultados permiten concluir que la concentración de metales pesados tiene una tendencia decreciente en el periodo de predicción.

Palabras clave: Calidad del agua; modelo dinámico; simulación.

ABSTRACT

The objective of the research was to apply a dynamic model to determine the level of contamination by heavy metals in the Moche river, Santa Catalina valley sector for a 20-year horizon. The applied methodology corresponds to the mathematical-statistical modeling used to select and construct dynamic prediction models. When analyzing the historical information it was possible to deduce a decreasing behavior of the average concentration of heavy metals in time and a significant increase in the concentrations of said metals in the middle basin of the Moche river. The selected models correspond to decreasing, polynomial exponential functions and in some cases correspond to models built on the basis of the Fourier series. The results allow to conclude that the concentration of heavy metals has a decreasing tendency in the prediction period.

Keywords: Water quality; dynamic model; simulation.

1. INTRODUCCIÓN

Por muchos años se viene construyendo modelos matemáticos de los fenómenos físicos y químicos; con la finalidad de estudiar el comportamiento de los sistemas naturales. Una muestra de ello es la ecuación de los gases ideales, en donde se simplifica la realidad a partir del supuesto que es posible estudiar a los gases reales bajo un comportamiento ideal.

Posteriormente, nos dimos cuenta que existen realidades complejas en donde el comportamiento de las variables, que la definen, sufren cambios. Y que estos cambios son consecuencia de otras variables que influyen en el sistema natural directa o indirectamente. Es decir, una función que depende de otra función, este pensamiento de análisis se denominó sistémico, porque no se analiza solamente una variable independiente sino varias variables, incluida la sinergia que en ellas pueda darse.

En este afán de mejorar la representación matemática de los fenómenos naturales se han desarrollado diversas teorías que ayudan a lograr este objetivo. Así tenemos, el modelamiento y la simulación para llegar luego al monitoreo y control del sistema.

Existen diversos estudios que versan sobre el tema de estudio, la metodología y las herramientas de análisis. Por ejemplo, en Honduras; se analizó la calidad y riesgo de la contaminación del agua en la microcuenca del Río Soledad, Valle de Ángeles. Los parámetros analizados fueron nitratos, fosfatos, coliformes totales y fecal-

les, temperatura, pH, turbidez, sólidos suspendidos, disueltos y totales. Para ser tratados estadísticamente y establecer los Índice de Vulnerabilidad Global; concluyendo que se evidencia un proceso gradual de deterioro de la calidad del agua ocasionado por las actividades antrópicas realizadas (Javier, 2003). Otro lo ejemplo lo constituye el estudio realizado por Ortiz (2012) sobre la contaminación de las aguas superficiales ocasionado por el manejo inadecuado de los rellenos sanitarios, teniendo como variables de análisis su ubicación respecto a los cuerpos agua y a los factores climáticos. Se identificaron a los municipios de Guayama, Guaynabo, Humacao, Juan Díaz y Toa Alta (Puerto Rico) quienes operan rellenos sanitarios desde la época de 1970. Los parámetros analizados fueron conductancia, pH, dureza total, calcio, cloruros, sulfatos, fósforo total, y los metales de arsénico, cromo, níquel, plomo y zinc. Del análisis concluye que existe una alta exposición de los cuerpos de agua superficiales a los contaminantes.

Del mismo modo, en el Perú, mediante el software Stella se modeló y mostró el comportamiento dinámico del conjunto de parámetros que caracterizan la calidad de agua de la laguna Patarcocha (Pasco) afectada por los vertimientos de aguas residuales que generan las poblaciones cercanas, se analizaron datos históricos de 10 años y los resultados se proyectaron con valores iniciales del 2010 al 2026. Los resultados indican un deterioro gradual de la calidad ambiental del cuerpo de agua, situación que se agrava si consideramos el crecimiento poblacional (Inga, 2016).

El problema de la contaminación asociada al recurso hídrico se ha presentado en todos los países convirtiéndose en un problema global, como se evidencia en los antecedentes. En el Perú, la problemática es similar, la contaminación proviene de diversas fuentes: agrícolas, industriales, urbanas, entre otras; desarrolladas en zonas próximas a las riberas del río Moche. Cada fuente de contaminación genera vertimientos de aguas residuales que en la mayoría de los casos no son tratadas previa a la descarga. En la zona, existen actividades agrícolas que utilizan diversos productos químicos, existe también pasivos mineros como es el caso Samne, y en las partes altas de la cuenca existe actividad minera formal e informal.

Toda la contaminación recibida por el cuerpo de agua hace que exista mortalidad de la flora y fauna (Maine et al., 1999) debido, entre otros factores, a presencia de metales pesados provenientes de las actividades económicas desarrolladas en la zona de influencia de río Moche. Por esta razón, la investigación se centró en la determinación de la concentración de metales, que son tóxicos tanto para la fauna acuática como para la agricultura, en las aguas que tienen una escorrentía por el valle Santa Catalina en razón de que la contaminación por metales tóxicos o pesados tienen incidencia directa en la fauna, flora y en la salud de las personas que consumen de manera directa o indirecta el agua del río Moche.

La contaminación ambiental se estudia para proponer alternativas de remediación en función de los factores ambientales: agua, aire y suelo. Dependiendo del factor ambiental, el tiempo de residencia del contaminante varía. Así tenemos que la residencia en el aire es bajo, en el agua es medio y en el suelo es alto (Tabla 1) pero el daño que se ocasiona en los organismos el factor agua tiene el mayor nivel de riesgo.

Tabla 1. Comportamiento de los contaminantes en el aire, agua y suelo

Elemento	Tiempo de residencia	Uniformidad de la dispersión	Daño a organismos
Aire	Bajo	Alta	Bajo a medio
Agua	Medio	Media	Alto
Suelo	Alto	Baja	Medo a alto

Fuente: (Bautista, 1999)

En la década de los 80, se identificó alrededor de 63 000 sustancias sintéticas de uso común, cifras que se incrementa año a año. Debido a que el grado de uniformidad de dispersión en el agua es media si lo comparamos con la del aire, los costos de operación de las tecnologías de descontaminación son altas (Bautista, 1999).

Las aguas residuales también contienen nutrientes (NPK) que en concentraciones inadecuadas puede generar vida acuática no deseada y los organismos patógenos pueden transmitir enfermedades infecto contagiosas. Una mención aparte es la existencia de metales pesados y compuestos tóxicos en el agua residual porque ambos provienen generalmente de aguas residuales industriales y comerciales; y su presencia puede interferir en los procesos convencionales de depuración (Sans y Ribas, 1989).

La presencia de metales en el agua influye directamente en la vida acuática. Por ejemplo, la solubilidad del aluminio es mayor en lagos o ríos con pH mayor a 6 ó 7 y por tanto se cree, que el principal efecto nocivo sobre los peces de aguas ácidas se debe a la presencia del aluminio y que la movilización del aluminio en suelos puede ser una de las causas de que las plantas se sequen.

Los metales en solución acuosa pueden formar complejos metálicos con otras especies (compuestos órgano metálico) o con agentes quelantes. Las propiedades de estos compuestos y sus efectos biológicos pueden ser muy diferentes a los propios iones metálicos. Por lo tanto, los tipos de contaminantes que puedan tener las aguas residuales influyen notablemente en el nivel toxicidad de los cuerpos de agua (Cabildo et al., 2013).

El término “metal pesado” se utiliza para los metales que tienen una densidad mayor o igual a 6 g/cm³. A diferencia de “elemento pesado” que se refiere a elementos que son tóxicos para los humanos y que son utilizados cotidianamente en la industria, la característica principal de estos elementos es su relativa abundancia y que provocan graves perturbaciones a los ciclos biogeoquímicos (Pb, As, Se, Cd, Hg, Sb, Tl, In, Bi y Te). En función del nivel de toxicidad de los elementos se acuña en el término “elemento potencialmente tóxico”, en esta categoría están incluidos aquellos elementos ya sea metales pesados, esenciales, vestigios, etc.; que debido a sus características y concentraciones pudieran ser tóxicos para la biota. De acuerdo con esta definición, el arsénico que no es metal, pero es tóxico estaría dentro de esta clasificación.

La concentración de un componente tóxico en el agua puede modelarse y simular su comportamiento. Modelar es un proceso de representación de un fenómeno natural en una expresión matemática, dependiendo de la complejidad del fenómeno y al objetivo del estudio se recurre a modelos algebraicos o diferenciales (Puigianer et al., 2006). En cualquiera de los casos se parte de datos experimentales.

Como se puso de manifiesto anteriormente, las ecuaciones representan el comportamiento de las variables que describen la realidad. La realidad puede estar definida por un número infinito de variables. Pero el investigador debe restringir el número de variables, identificando las relevantes para explicar el comportamiento en el tiempo del objeto de estudio. En función del tipo de información que se disponga, es posible aplicar diversas metodologías para construir y estimar los modelos. Si los datos están organizados en series de tiempo, el método estadístico proporciona modelos estáticos y dinámicos que describen el comportamiento de las variables estudiadas (Yip, 1981).

La construcción de un modelo se realiza desde la perspectiva propuesta por Urquía y Martín (2013), consistente en identificar cinco entidades y dos relaciones entre ellas. Las entidades corresponden a la estructura del sistema que se estudia, la base de datos que definen el comportamiento del sistema, el modelo matemático que representa al sistema, el simulador (programa computacional) y el marco experimental.

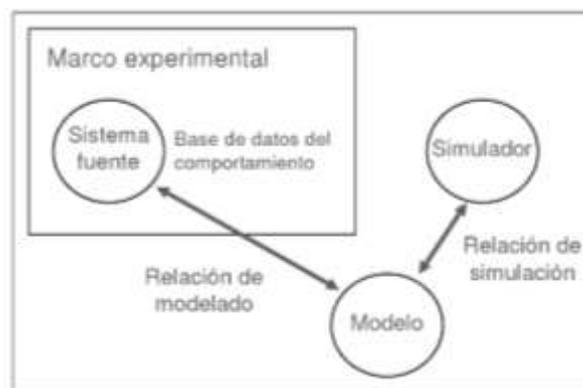


Figura 1. Relación de las entidades básicas del modelado y simulación

Fuente: (Urquía y Martín, 2013)

El sistema es el fenómeno que se estudia, por lo tanto, constituye la fuente de los datos observables dentro de un entorno real o virtual. Estos datos observables conforman la base de datos del comportamiento del sistema. Tanto el sistema como la base de datos observables corresponden a un marco experimental (marco de referencia) que está conformado por las condiciones bajo las cuales el sistema es observado o se experimenta con él. El marco experimental es definido a partir de los objetivos del estudio.

Las otras dos entidades que se relacionan directa o indirectamente con el marco experimental son el modelo y

el simulador. Las entidades del proceso de modelado y simulación se vinculan entre sí, a través de dos relaciones: relación de modelado (validez) entre el sistema y el modelo, y la relación de simulación (corrección del simulador) entre el simulador y el modelo (Urquía y Martín, 2013). El modelo puede estar definido por una o más expresiones matemáticas, que en su conjunto permite reproducir el comportamiento del sistema analizado. Los modelos de predicción pueden ser estáticos o dinámicos; y de igual forma si la simulación ocurre para un instante de tiempo constituye una simulación estática. De lo contrario será una simulación dinámica.

El modelo dinámico se define a partir de la variabilidad sistemática y de la perturbación que puedan tener las relaciones dinámicas entre la variable dependiente y las variables explicativas. Representándose estas relaciones en la siguiente función:

$$c(x) = f(x) + f(t) \tag{1}$$

En donde $f(x)$ representa la parte sistémica y $f(t)$ la perturbación que puede tener el sistema.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Material de estudio

La concentración de metales en el río Moche

2.2 Métodos y técnicas

En la recolección de datos primarios se aplicó la técnica de la observación y el muestreo. Mientras que para la obtención de datos secundarios se aplicó la entrevista y el análisis documental.

Tabla 2. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

Técnica	Instrumento
Observación	Libreta de apuntes / Cámara fotográfica
Entrevista	Cuestionario
Muestreo	EPP / Envases
Análisis documental	Fichas resumen
Computacional	Software especializado

2.3 Diseño de muestreo

El muestreo se realizó en 3 puntos diferentes del cauce del río Moche, Sector: Conache – Valle Santa Catalina, distantes entre sí aproximadamente 500 metros uno del otro. En cada uno de los puntos de muestreo seleccionados se recolectaron en recipientes de plásticos esterilizados de un litro de capacidad de muestra de agua, obtenida a una profundidad de 20 a 40 cm. Las muestras se llevaron a laboratorio las que fueron preservadas con ácido nítrico concentrado hasta tener un pH cercano a 2, condiciones que favorece la preservación de metales para la cuantificación, para luego ser refrigerados a 4 °C.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Delimitación de la zona de estudio

La cuenca del río Moche (Figura 2) se ubica en la zona norte del Perú, nace sobre los 3988 m.s.n.m. con el nombre de río Grande, luego río Constancia y aproximadamente a 14 km de la Laguna Grande recibe el nombre de río Moche. Por las características geográficas la cuenca se divide en tres zonas, cuenta alta, media y baja. La cuenca alta corresponde a las provincias de Otuzco y Santiago de Chuco (Huerta y Loli, 2014).

La cuenca alta, tiene una altitud comprendida entre los 2220 a 3500 m.s.n.m. (Huaranga et al., 2012) y se conoce también con el nombre de cuenca húmeda. En esta zona se ubican los principales ríos tributarios, como son río Shorey, Sinsicap, Chota, Chanchacap, La Cuesta, Huangamarca, Pollo, La Merced, Santa Catalina, Purida, Luz Angélica, Quinual y Los Negros (MEM, 1997).

La cuenca media está comprendida entre los 1420 y 2220 m.s.n.m. (Huaranga et al., 2012) y corresponde centros poblados bajos de la provincia de Otuzco (Samne, centros poblados: Cushman, Platanar y Casmiche, entre otros.) con los ríos Chanchacap y Sincipap como principales tributarios.

La cuenca baja está comprendida desde 0 y 1420 m.s.n.m. (Huaranga et al., 2012). Esta zona se caracteriza por la disminución de ríos tributarios y por el contrario las aguas del río Moche se distribuyen por un sistema de canales que conducen el agua a campos de cultivos. Los canales más importantes son: Poroto, Quirihuac, Santo Domingo, Shiran, La Mochica, entre otros (Paredes y Guerrero, 2013).

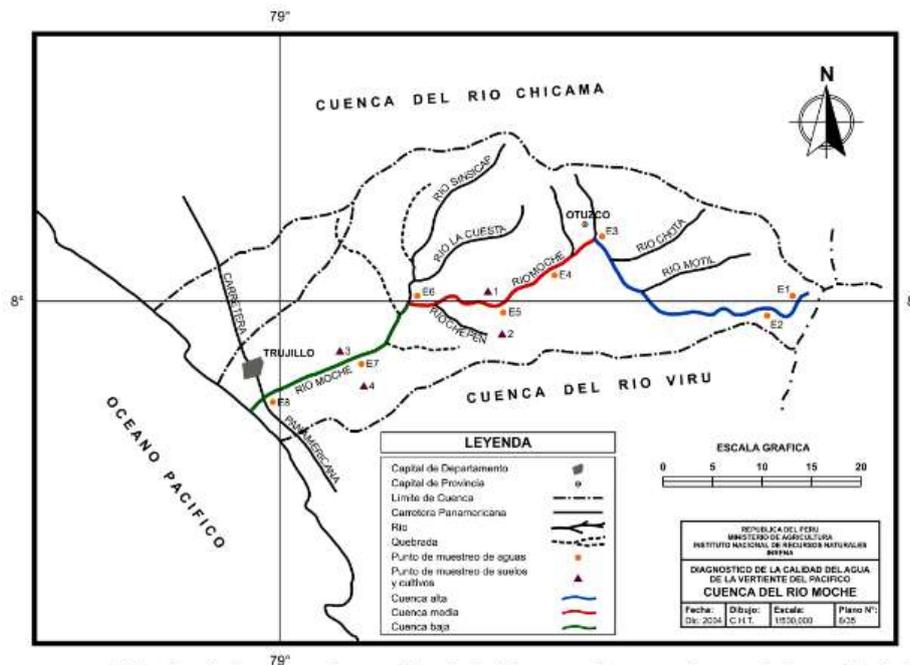


Figura 2. Cuenca alta, media y baja del río Moche

Fuente: (Huaranga et al., 2012)

3.2 Datos históricos de los niveles de contaminación por metales pesados del río Moche

En la Figura 3 se muestran las tendencias de los valores promedios anuales de la concentración de metales en toda la cuenca del río Moche (alta, media y baja), existiendo un denominador común que al año 2010, a excepción del Fe, todas las concentraciones promedio están por debajo de 0,100 mg/L.

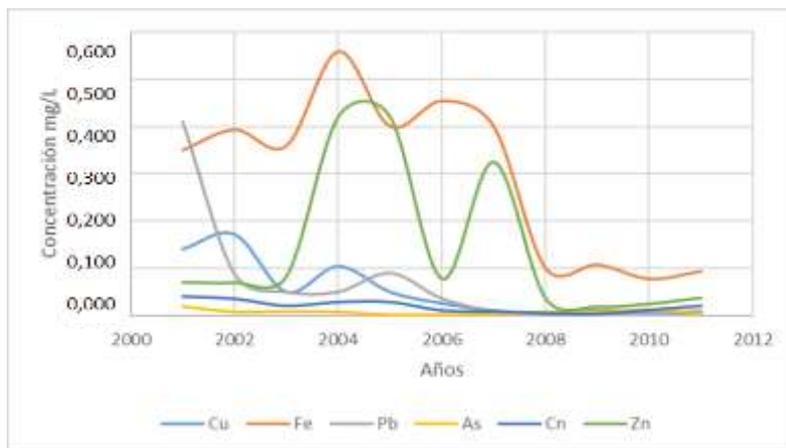


Figura 3. Monitoreo del agua del río Moche antes de las operaciones de la empresa minera Panamerican Silver SAC (Valor promedio anual en mg/L), 2001 – 2011

Fuente: Compendio estadístico 2012 – La Libertad. INEI

Al contrastar la información con los datos reportados Huaranga et al. (2012) para los periodos 2000 y 2010 (Figura 4) los valores promedio son mayores que los reportados por el INEI. Pero, las tendencias son iguales.

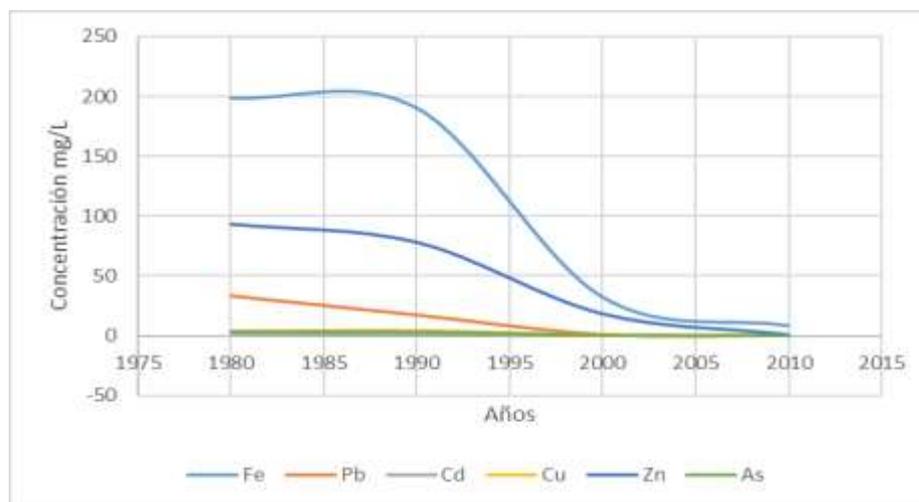


Figura 4. Dinámica de las concentraciones de metales en las aguas del río Moche (1980 - 2010)

Fuente: (Huaranga et al., 2012)

3.3 Fuentes contaminación del río Moche

Existen diversas fuentes de contaminación desde fuentes domésticas a industriales. Las fuentes de interés para la investigación lo constituyen aquellas que tengan contenido de metales pesados como el plomo y cadmio, entre otros. Así, se identificó la existencia de la planta concentradora de minerales “Virgen de la Puerta” ubicada en el caserío de Mótíl, distrito de Agallpampa, provincia de Otuzco, que constituye un riesgo de contaminación a la cuenca del río Moche. El riesgo se incrementa ante la presencia de minería informal, es así que en julio de 2018 la ANA, mediante Resolución Jefatural N° 196-2018-ANA, declaró el estado de emergencia de recursos hídricos por sesenta días por inminente riesgo de afectación de la calidad de agua del río Moche (Castro, 2018).

Además, en la zona media de la cuenca se encuentra influenciada por Pasivo Ambiental Minero de Samne conformada por un depósito de relaves que datan desde los años 60; época en que operaba la Northern Mining Corporation y posteriormente, operó la Compañía Minera Otuzco. Debido a la cantidad acumulada de aproximadamente 500 000 toneladas, la inestabilidad física y química del relave, el régimen pluviométrico; y la cercanía al río Moche constituye un riesgo de contaminación por metales pesados (MEM, 1997).

3.4 Modelo de simulación dinámica

El objetivo de la investigación es el modelamiento de la variabilidad de la concentración de metales pesados en el río Moche. Para este efecto se planteó el siguiente modelo:

$$C_M = f(x) + \gamma ; \gamma = f(t)$$

Donde:

C_M : es la concentración del metal,

x : es la longitud del río Moche,

γ : es la concentración del metal que varía en función del tiempo, y

t : es el tiempo

Hasta ahora se tienen dos modelos: uno que proyecta el perfil de concentraciones en función del recorrido del río Moche y el segundo modelo que corrige dichas concentraciones en función del periodo transcurrido. El resultado global permite obtener concentraciones desde la cabecera de cuenca hasta el punto final del río Moche, ubicado en el sector La Bocana, distrito de Victor Larco Herrera.

Los modelos de proyección se han ajustado a 20 años, recomendándose hacer un ajuste cada 5 años en la función $\gamma = f(t)$ debido a su alta variabilidad. En el caso de $f(x)$, mientras que las fuentes de contaminación sigan presentes se recomienda ajustar el modelo cada 10 años.

3.4.1 Modelo de la concentración de metales en función del recorrido de las aguas del río Moche

Estos modelos describen el comportamiento de la concentración de metales en función del recorrido de las aguas sobre el cauce del río Moche. Debido a que en la trayectoria del río recibe caudales de ríos tributarios que incrementan tanto el flujo de agua como la concentración de los metales, sobre todo en la cuenca alta y media.

Con la finalidad de incluir los efectos de los ríos tributarios sobre la concentración de metales en cabecera de cuenca y la capacidad de resiliencia del río, se aplicó un tratamiento estadístico sobre los datos obtenidos de la Autoridad Nacional del Agua (2014) para el periodo de lluvias (febrero).

Los modelos comparados fueron: exponenciales, polinomiales y cuando los r^2 o r^2 -Ajustado no se encuentran en rango aceptable se recurrió al modelo de Fourier.

En el caso de la concentración del cobre en las aguas del río Moche se evaluaron tres modelos: polinomial, exponencial y Fourier. El valor más alto del r^2 -Ajustado correspondió al modelo exponencial de grado 2, con un valor del 0,8300.

General model Exp2:
 $f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x)$
 Coefficients (with 95% confidence bounds):
 a = 1,43 (-3,708; 6,569)
 b = -0,352 (-1,261; 0,5573)
 c = 0,4559 (0,139; 0,7728)
 d = -0,01038 (-0,02332; 0,002571)

Al evaluar el comportamiento de la concentración de hierro con los modelos polinomiales, exponenciales y de Fourier, encontramos que el valor más alto del r^2 -Ajustado está en el modelo de Fourier con dos términos con un valor de 0,7578.

General model Fourier2:
 $f(x) = a_0 + a_1 \cdot \cos(x \cdot w) + b_1 \cdot \sin(x \cdot w) + a_2 \cdot \cos(2 \cdot x \cdot w) + b_2 \cdot \sin(2 \cdot x \cdot w)$
 Coefficients (with 95% confidence bounds):
 a0 = 16,85 (0,7497; 32,95)
 a1 = 16,11 (-2,043; 34,27)
 b1 = 0,0336 (-20,99; 21,06)
 a2 = 16,78 (-7,372; 40,94)
 b2 = 18,88 (-17,98; 55,73)
 w = 0,1178 (0,1067; 0,129)

En el caso del plomo los modelos con mayor r^2 -Ajustado son el de Fourier de dos pasos y el polinomial de grado cuatro. La diferencia entre ambos modelos es de 0,0264. Razón por la cual se selecciona el polinomial de grado cuatro.

Linear model Poly4:
 $f(x) = p_1 \cdot x^4 + p_2 \cdot x^3 + p_3 \cdot x^2 + p_4 \cdot x + p_5$
 Coefficients (with 95% confidence bounds):
 p1 = 2,863e-07 (4,427e-08; 5,283e-07)
 p2 = -6,732e-05 (-0,0001182; -1,644e-05)
 p3 = 0,005253 (0,001816; 0,00869)
 p4 = -0,1508 (0,2322; -0,06947)
 p5 = 1,4 (0,9167; 1,882)

En el caso del arsénico los datos procesados con las herramientas estadísticas de MATLAB permitieron comparar la viabilidad de los modelos de predicción, concluyéndose que el mejor modelo corresponde a un exponencial de grado 2.

General model Exp2:
 $f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x)$
 Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} a &= 1,207 (-1,771; 4,184) \\ b &= -0,3131 (-0,9141; 0,2879) \\ c &= 0,1376 (-0,05605; 0,3313) \\ d &= -0,002748 (-0,02356; 0,01806) \end{aligned}$$

Al analizar la disposición de los datos experimentales de la concentración del cadmio, en el plano cartesiano se observó un comportamiento ligeramente lineal, procediéndose a analizar un modelo polinomial de grado 1. El r^2 -Ajustado dio un valor de 0,7478 y al incrementar el grado del polinomio el valor disminuyó a 0,7284; evidenciándose que a medida que se incrementa el grado del polinomio el r^2 -ajustado disminuye.

General model Exp1:
 $f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$
 Coefficients (with 95% confidence bounds):
 $a = 0,02229 (0,0171; 0,02749)$
 $b = -0,01261 (-0,01964; -0,005584)$

La concentración de zinc se evaluó con los modelos polinómicos, exponencial y de Fourier. El modelo lineal tiene el mayor valor de r^2 -Ajustado = 0,6873, le sigue en importancia el polinomial de grado 3 con una diferencia no significativa de 0,0085. Por tanto, se acepta al modelo lineal.

Linear model Poly1:
 $f(x) = p1 \cdot x + p2$
 Coefficients (with 95% confidence bounds):
 $p1 = -0,01688 (-0,02615; -0,007622)$
 $p2 = 2,163 (1,605; 2,72)$

3.4.2 Modelo de la concentración de metales en función tiempo

El modelado parte por la construcción de una ecuación diferencial objetivo, para ello se definen las variables que componen el sistema, la concentración del metal y el tiempo transcurrido de las aguas:

t : distancia que recorre las aguas del río Moche (años)

C : mg del metal pesado por litro de agua del río Moche (mg/L)

Estas variables se representan como función:

$C(t)$: mg/L de metal pesado después de haber transcurrido el instante “ t ”

Para describir la velocidad de cambio de la concentración respecto al tiempo, derivamos la ecuación:

$$dC/dt = -k C$$

Expresando como función:

$$C(t) = C_0 \cdot e^{(-k \cdot t)} \quad (2)$$

Que al ajustar la ecuación con los valores del INEI y Huaranga et al., se tiene los siguientes modelos:

$$\begin{aligned} C_{Fe}(t) &= 51,625 e^{(-1,49149 t)} \\ C_{Pb}(t) &= 1,9756 e^{(-4,4733451 t)} \\ C_{Cd}(t) &= 0,486 e^{(-3,981277 t)} \\ C_{Cu}(t) &= 7,1 e^{(-2,164367 t)} \\ C_{Zn}(t) &= 45,585 e^{(-3,69857 t)} \\ C_{As}(t) &= 8,45 e^{(-2,534582 t)} \end{aligned}$$

3.5 Software de simulación dinámica



Figura 5. Interfaz gráfica del Simulador Dinámico de Concentración de Metales.

4. CONCLUSIONES

El cauce de río Moche tiene diversos pisos altitudinales que debido a la variedad de su geografía la velocidad del agua corresponde a flujos turbulentos y laminares, los primeros contribuyen a que se produzca una mezcla perfecta de las sustancias y compuestos; mientras que los flujos laminares contribuyen a la sedimentación de material en suspensión.

La información histórica obtenida es consistente debido a que, a pesar de haberse utilizado diversos métodos para obtenerla, guardan relación en cantidades cuantitativas, tendencia y temporalidad.

La diferencia entre modelos matemáticos y estadísticos es la presencia del error cuantificado en sus predicciones, y debido a que el modelo de predicción es dinámico y como tal sujeto a cambios; se fusionaron ambos modelos que permitieron proyectar resultados con un 95% de confianza.

El software desarrollado permite realizar una simulación dinámica respecto a cambios en el recorrido de las aguas y la variación del tiempo como variable de perturbación de los resultados.

El software fue validado con resultados experimentales, obteniéndose un margen de error entre 5% y 8%, cifras aceptables si se considera un error estadístico del 5% debido al modelo de predicción.

Basándose en el hecho que la tendencia de la concentración de los metales es negativa y cuyo valor tiempo se acerca a los ECAS para un periodo de 20 años, no será necesario incluir el proceso de remoción de dichos metales.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ANA. 2014. Evaluación de la Calidad del Agua y de los Sedimentos en la Cuenca del Río Moche - La Libertad, febrero 2014. Lima, Perú: Autoridad Nacional de Agua. Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos - DGCRH. Informe Técnico N° 010-2014-ANA-DGCRH-VIG: 12 – 34 p.
- Bautista, F. 1999. Introducción al Estudio de la Contaminación del Suelo por Metales Pesados. Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, México: 22 – 24 p.
- Cabildo, M.; Comango, M.; Escolástico, C.; Esteban, S.; López, C.; Sanz, D. 2013. Bases químicas del medio ambiente. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid. España. 123 – 134 p.
- Castro, W. 2018. ANA declara en emergencia del río Moche afectado por relaves. La República, del 11 de julio 2018: 3 p.
- Huaranga, M., F.; Méndez, E.; Quilcat, V.; Huaranga A., F. 2012. Contaminación por metales pesados en la Cuenca del Río Moche, 1980 - 2010, La Libertad - Perú. Scientia Agropecuaria, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Trujillo: 235 – 247 p.
- Huerta, P.; Loli, O. 2014. Erosión Hídrica en la Cuenca Alta del río Moche. Ecología Aplicada, 13(1): 15 - 22. p. ISSN 1726-5474
- INEI. 2012. Compendio estadístico 2012 – La Libertad. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Lima: 231 – 237 p.
- Inga, E. 2016. Modelo dinámico de sistemas para determinar la calidad de agua en la laguna Patarcocha por vertimiento de aguas residuales de los Asentamientos Humanos aledaños, Pasco, 2016. Universidad César Vallejo. Facultad de Ingeniería. Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Lima, Perú. 78 -82. p.
- Javier, A. 2003. Calidad y riesgo de contaminación de las aguas superficiales en la microcuenca del Río La Soledad, Valle de Ángeles. CATIE. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Escuela de Posgrado. Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas. Honduras. Turrialba, Costa Rica. 51 -56 p.
- Maine, M.; Suñe, N.; Pedro, M.; Duarte, M. 1999. Eliminación de cadmio y cromo desde agua utilizando macrofitos. Información Tecnológica – 10(6): 11 – 18 p.
- MEM. 1997. Estudio de Evaluación Ambiental Territorial y de Planteamientos para la reducción o eliminación de la contaminación de origen minero en la cuenca del río Moche. Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Asuntos Ambientales. Lima. Perú. 34 – 42 p.
- Ortiz, A. 2012. Contaminación de los cuerpos de agua superficiales por sistemas de relleno sanitario en Puerto Rico. Universidad del Turabo. Escuela de Ciencias y Tecnología. Maestría en Ciencias Ambientales. Gurabo, Puerto Rico. 43 – 48 p.

- Paredes, J.; Guerrero, A. 2013. Balance hídrico para uso agrícola en la Cuenca Media y Baja del río Moche, área de influencia del Proyecto Especial CHAVIMOCHIC, Perú. 2010. Rebiolest. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo. Perú: 5 – 13 p.
- Puigianer, L.; Ollero, P.; De Prada, C.; Jiménez, L. 2006. Estrategias de modelado, simulación y optimización de procesos químicos. Editorial Síntesis S.A. Madrid. España. 28 – 34 p.
- Sans, R.; Ribas, J. 1989. Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos. Marcombo. Boixareu Editores. Barcelona. España. 112 – 117 p.
- Urquia, A.; Martín, C. 2016. Métodos de simulación y modelado. Editorial UNED. Madrid. España. 62 – 71 p.
- Yip, K. 1981. Estimación de un Modelo Econométrico de Oferta y Demanda del Cemento para el Perú. Universidad Nacional de Ingeniería. Programa Académico de Economía. Lima. Perú. 32 – 36 p.