



Revista UIS ingenierías

ISSN: 1657-4583

ISSN: 2145-8456

Universidad Industrial de Santander

Torres-Lozada, Patricia; Arango-Vallejo, Luis Ancizar; Torres-López, Wilmar Alexander
Estimación de la producción de lodos en plantas convencionales
de tratamiento de agua potable mediante modelos de predicción
Revista UIS ingenierías, vol. 21, núm. 4, 2022, Octubre-Diciembre, pp. 87-96
Universidad Industrial de Santander

DOI: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n4-2022008>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=553775188008>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org



Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Estimación de la producción de lodos en plantas convencionales de tratamiento de agua potable mediante modelos de predicción

Estimation of sludge production in conventional drinking water treatment plants through prediction models

Patricia Torres-Lozada ^{1a}, Luis Ancizar Arango-Vallejo ^{1b}, Wilmar Alexander Torres-López ²

¹ Study and Control of Environmental Pollution - ECCA Research Group, Faculty of Engineering, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Orcid: 0000-0001-9323-6677 ^a. Correo electrónico: patricia.torres@correounivalle.edu.co ^a, luis.arango@correounivalle.edu.co ^b

² Faculty of Natural Science, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Orcid: 0000-0002-2482-013X. Correo electrónico: wilmar.alexander.torres@correounivalle.edu.co

Recibido: 27 junio, 2022. Aceptado: 22 septiembre, 2022. Versión final: 30 noviembre, 2022.

Resumen

El tratamiento de agua para consumo humano en plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) convencionales, genera lodos que se retienen principalmente en la etapa de sedimentación y para hacer un manejo adecuado es importante conocer las cantidades producidas. Para aportar a este fin, en este estudio se evaluaron diferentes modelos empíricos (AFEE, Cornwell & Koppers, Coşkun, CETESB, AWWA y Kawamura) y estocásticos (ARIMA) para la predicción de la producción de lodos de una PTAP convencional que utiliza sulfato de aluminio como coagulante. Entre los modelos empíricos, los tres primeros presentaron un mejor ajuste frente a los datos observados; sin embargo, el estocástico ARIMA (0,1,2) fue el de mejor predicción con una diferencia de 1.51% entre el valor pronosticado y el observado ($2173,65 \pm 549$ vs 2207 Kg / día de lodos en base seca), lo que demuestra su aplicabilidad para estimar la producción de lodos.

Palabras clave: lodos de agua potable; modelos empíricos; modelos estocásticos; predicción de producción de lodos; tratamiento de agua potable.

Abstract

The drinking water treatment plants (DWTP) generates sludges that are retained mainly in the sedimentation stage, and to adequate management, it is important to know the produced quantities. With this objective, this study evaluated different empirical models (AFEE, Cornwell & Koppers, Coşkun, CETESB, AWWA and Kawamura) and stochastic models (ARIMA) for the prediction of sludge production in a conventional DWTP that uses aluminum sulfate as a coagulant. Among the empirical models, the first three, presented better fit with the observed data; however, the ARIMA (0,1,2) was the best model, with a difference of 1.51% between the predicted and the observed values (2173.65 ± 549 vs 2207 Kg / day of sludge on a dry basis), which demonstrate the applicability to estimate sludge production.

Keywords: drinking water treatment; drinking water sludge; empiric models; predictive sludge production; stochastic models.

1. Introducción

El objetivo de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP), es el abastecimiento de agua potable y segura para consumo humano [1], [2], siendo las PTAP con coagulación química las predominantes (más del 70%) [3], en las cuales ocurre una generación de lodos del orden del 2 al 5% del volumen total de agua tratada [4], [5]. En el tratamiento convencional, la sedimentación (principalmente) y la filtración, son las principales etapas de separación física de los lodos generados, los cuales deben manejarse adecuadamente para evitar efectos nocivos para el ambiente y la salud pública [5], [6].

La forma tradicional de manejo de estos lodos continúa siendo la disposición final, con el uso de vertederos, alcantarillados públicos, rellenos de terrenos y canteras ya explotadas [7]; en menor proporción y debido a su bajo nivel de nutrientes, también se reportan prácticas de aprovechamiento como la aplicación en suelos para agricultura. En países como Francia, 52% de los lodos de PTAP son utilizados en la construcción civil, diques y compostaje, el 29% es dispuesto al alcantarillado público, 13% a vertederos y 6% aplicado al suelo [8].

Autores como [9], [10], [11], [12] también mencionan la potencial aplicación de lodos de PTAP para la elaboración de materiales de construcción como hormigón, morteros de cemento, materiales de arcilla, productos cerámicos, ladrillos, tuberías, azulejos y adobe, en países como China, Italia, Brasil, México y Colombia, entre otros.

De acuerdo con [13], pocas veces los operadores y diseñadores de PTAP consiguen prever, con algún grado de confiabilidad, la masa y volumen de lodos producidos en el tratamiento de agua y para establecerlos operacionalmente, se requiere de un muestreo exhaustivo que en general implica la suspensión de la operación de la PTAP, lo que en la mayoría de los casos no es práctico puesto que el suministro del agua a los usuarios debe ser continuo. Por esta razón, el cálculo o predicción del volumen de lodos en las PTAP, pertenece a una metodología de carácter secundario [14], [15].

Una de las formas de mayor aplicación en la estimación de los lodos de PTAP es mediante la realización de balances de masa de PTAP y el uso de modelos empíricos que han estado asociados principalmente a PTAP convencionales o de ciclo completo (coagulación, floculación, sedimentación y filtración, seguidas de desinfección y estabilización de pH) [3], [16], que

utilizan sulfato de aluminio o cloruro férrico en dosis compatibles con el mecanismo de coagulación de barrido [17], que es el adecuado en este tipo de tecnología convencional o de ciclo completo [18].

Estos modelos generalmente relacionan el consumo de coagulantes y de ayudantes de coagulación con variables como la concentración de sólidos suspendidos totales (SST), turbiedad y color aparente. Todas estas variables, están asociadas a la presencia de material en suspensión y por tanto tienen relación directa con la cantidad y características de lodos generados. Las ecuaciones asociadas a modelos empíricos para la predicción de lodos [19], [20], [21], [22], [23], [24] son mostradas en Tabla 1.

Estos modelos proporcionan información útil para: i. la optimización del uso de coagulantes; ii. para otros aspectos como el diseño de sistemas de deshidratación natural o mecánica de lodos y iii. para evaluar opciones de aprovechamiento en términos de la estimación del material disponible para tal fin [19], [20].

Adicionalmente, existen modelos estocásticos ARIMA (Autorregresivos Integrados de Medias Móviles) [25], donde se asume que el comportamiento de la serie bajo análisis se puede explicar a través de sus valores pasados y de una suma ponderada de errores aleatorios, con los cuales es posible establecer predicciones de valores futuros [26]. En este estudio, se evaluó la aplicación de los dos tipos de modelos predictivos (empíricos y estocásticos) para la estimación de la producción de lodos de una PTAP convencional que trata agua superficial con el uso de sulfato de aluminio como coagulante.

2. Materiales y métodos

La PTAP evaluada tiene una configuración de Planta convencional o de ciclo completo. Para estimar la producción de lodos se realizaron dos análisis:

- El relacionado con el análisis estadístico de información histórica de la PTAP, tomando datos históricos de tres años (registro diario) de turbiedad, color aparente, pH y alcalinidad (agua cruda, clarificada y tratada), con el fin de observar su comportamiento en el tiempo en relación con el consumo del coagulante (tipo y dosis de coagulante) (estadística descriptiva: promedio, moda (para el pH), desviación estándar, coeficiente de variación, máximo y mínimo).

Tabla 1. Modelos empíricos para la predicción de lodos producidos en PTAP

Ecuación/ modelo	Descripción	Autor
$P = 3.5 \times 10^{-3} T^{0.66}$ $W = 86400 \times P \times Q$	P= Producción de sólidos (g de materia seca/m ³ de agua tratada) T= Turbiedad agua cruda (UTN) W= Cantidad Sol. secos (Kg/día) Q= Caudal agua cruda-tratada (m ³ /s)	[21]
$P = (1.2 \times T + 0.07 \times C + 0.17 \times D + A) \times 10^{-3}$ $W = 86400 \times P \times Q$	D= Dosis del sulfato de aluminio (mg/L) A= otros aditivos, como polímeros (mg/L)	Association Francaise Pour L'étude Des Eaux – AFEE (1982)*
$P = (0.44 \times D + 1.5 \times T + A) \times 10^{-3}$ $W = 86400 \times P \times Q$	D= Dosis sulfato aluminio(mg/L) A= otros aditivos, como polímeros (mg/L) W= Cantidad Sol. secos (Kg/día) Q= Caudal agua cruda-tratada (m ³ /S)	[22]
$P = (D \times Fc1) + (T \times Fc2)$	D= Dosis sulfato aluminio(mg/L) Fc1= Factor que depende del número de moléculas de agua asociadas a cada molécula de sulfato de aluminio. Usualmente varía entre 0,23 a 0,26 Fc2= Razón entre la concentración de sólidos suspendidos totales presentes en el agua bruta y la turbidez de la misma. Generalmente varía entre 1,0 a 2,0	[23]
$S = 86.4 \times Q (0.44D + SS + A)$	S= lodo producido (Kg/día, base seca) Q= Caudal agua cruda, (L/s) D= dosis sulfato aluminio (Kg/L) SS= sólidos suspendidos del agua cruda, (Kg/L) A= productos químicos adicionales como polímero, entre otros.	[24]
$P = (0.23 \times D + 1.5 \times T) \times 10^{-3}$ $W = 86400 \times P \times Q$	P= Producción de sólidos (g de materia seca/m ³ de agua cruda - tratada) D= Dosis del sulfato de aluminio (mg/L) T= Turbiedad del agua cruda (UTN) W= Cantidad de sólidos secos (Kg/día) Q= Caudal de agua cruda - tratada (m ³ /S)	CETESB (2001)**

• Dadas las dificultades operativas que reviste cuantificar los volúmenes de lodos generados, se estimó la producción teórica diaria aplicando los modelos empíricos mostrados en la [Tabla 1](#), empleando datos de caudal, consumo de coagulante, sólidos suspendidos y turbiedad y los modelos estocásticos ARIMA, utilizando información histórica del volumen de lodos y asumiendo que el comportamiento de la serie bajo análisis se puede explicar a través de su propia historia [\[21\]](#).

Adicionalmente, se incorporó el análisis de observaciones atípicas en series temporales [\[27\]](#) debido a que los modelos ARIMA pueden ver afectada tanto su identificación como su estimación por la ocurrencia de este tipo de observaciones.

La serie temporal se estabilizó en varianza y en nivel (promedio) empleando la transformación en potencia propuesta por Box & Cox [\[28\]](#) y aplicando el operador diferencia un número apropiado de veces según la prueba de Dickey & Fuller [\[29\]](#), respectivamente.

Con la serie estacionaria (estable en varianza y en nivel), se inspeccionaron las funciones de autocorrelación simple (FAC) y parcial (FACP) para identificar las componentes autorregresivas y/o de medias móviles a utilizar en la estimación del modelo de pronóstico [\[30\]](#), seleccionando el modelo ARIMA más adecuado según los criterios de información de Akaike (AIC) y Bayesiano (BIC), además del error cuadrático medio (RMSE) como medida de desempeño de los modelos dentro del periodo de observación [\[31\]](#).

A partir de los residuales del modelo ajustado, se identificaron e incorporaron al modelo observaciones atípicas aditivas (afecta en un solo instante de tiempo la serie observada), observaciones atípicas con cambio temporal (afecta la serie observada en un instante determinado y se disipa su efecto a lo largo del tiempo), observaciones atípicas con cambio de nivel (afecta la serie en un momento dado y permanece su efecto en el tiempo) y observaciones atípicas innovacionales (afecta la serie en un instante determinado y su efecto se propaga en el tiempo de acuerdo con el modelo ARIMA estimado). El análisis estadístico se llevó a cabo empleando el programa de libre distribución R versión 4.0.3 [32], utilizando un nivel de significancia del 5%.

Para comparar los resultados de estas estimaciones teóricas con la producción real de lodos, se realizó un muestreo de lodos sistemático lineal, en espacio y tiempo al azar en las unidades de sedimentación, a muestras compuestas y heterogéneas [33]. Para este fin, se midió la profundidad del lodo in situ y este dato se multiplicó por el área conocida de las unidades de sedimentación correspondientes y el valor de la densidad (1.02 g/mL), obteniéndose una producción de lodos de 14718 Kg/d en base húmeda. Teniendo en cuenta que la humedad del lodo es de 85.02%, se realizó la corrección por humedad. Las condiciones registradas durante el tiempo evaluado

fueron 785 L/s, sulfato de aluminio y policloruro de aluminio de 32.0 y 28.6 mg/L respectivamente y sólidos suspendidos de 9.56 mg/L [34].

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis estadístico de datos históricos

La **Tabla 2** muestra la estadística descriptiva de las variables fisicoquímicas (agua cruda, clarificada y tratada). Se observa que la matriz de agua cruda es la que presenta la mayor variación, reflejado en los valores tanto de la desviación estándar como del coeficiente de variación (CV), principalmente de la turbiedad y el color aparente, lo cual está directamente relacionado con la alta variación en las condiciones climáticas y en los usos del suelo alrededor de la cuenca de abastecimiento [2] y adicionalmente, estas dos variables en general son las que normalmente definen los requerimientos de coagulante en sistemas de tratamiento de agua con coagulación química, donde el pH y la alcalinidad son de vital importancia para garantizar condiciones de coagulación por barrido, mecanismo de coagulación adecuado para la formación de flocs de tamaño adecuado para ser retenidos en la etapa de sedimentación de las PTAP convencionales o de ciclo completo [6], [23], [35].

Tabla 2. Estadística descriptiva de variables fisicoquímicas

Variable	Estadística Descriptiva	Agua Cruda			Agua Clarificada			Agua Tratada		
		Año 1	Año 2	Año 3	Año 1	Año 2	Año 3	Año 1	Año 2	Año 3
Turbiedad (UTN)	Mínimo	1.24	1.4	1.4	1.03	1.22	0.84	0.16	0.36	0.33
	Máximo	172.74	71.12	22.39	2.64	2.83	3.38	2.23	1.73	1.09
	Promedio	30.88	10.57	4.54	1.64	1.73	1.72	0.46	0.61	0.65
	Desviación	33.97	13.15	4.45	0.41	0.41	0.62	0.3	0.22	0.21
	CV (%)	110.01	124.41	98.02	25	23.7	36.05	65.22	36.07	32.31
Color Aparente (UPtCo)	Mínimo	8.98	12	9	3.3	4.38	3.86	1.53	2	1.98
	Máximo	171.93	95.69	47.21	11.5	14.96	14.45	5.6	8.73	7
	Promedio	40.49	25.67	19.66	5.67	9.11	9.61	2.42	4.26	4.31
	Desviación	30.91	15.43	8.96	2.03	3.49	3.77	0.84	2.33	1.52
	CV (%)	76.34	60.11	45.57	35.8	38.31	39.23	34.71	54.69	35.27
pH	Mínimo	6.44	7.35	7.55	6.42	6.56	5.39	5.57	6.81	6.84
	Máximo	11.77	11.43	7.77	8.44	8.34	8.76	7.43	7.56	7.76
	Moda	7.63	7.73	7.68	6.97	7.26	7.23	6.91	7.15	7.17
	Desviación	0.8	0.56	0.06	0.36	0.41	0.56	0.29	0.24	0.19
	CV (%)	10.44	7.27	0.78	5.16	5.65	7.8	4.19	3.36	2.64
Alcalinidad (mg/L)	Mínimo	27.47	27.31	33.11	No hay datos reportados			18.46	17	22.33
	Máximo	53.23	57.65	53.23				48.72	55.95	45.15
	Promedio	39.43	42.1	42.47				30.27	34.04	34.87
	Desviación	6.97	7.71	5.19				8.08	10.65	6.11
	CV (%)	17.68	18.31	12.22				26.69	31.29	17.52

Fuente: elaboración propia.

En contraste con el comportamiento observado en el agua cruda, el agua clarificada y tratada muestran una significativa reducción de la turbiedad y el color (Tabla 3), demostrando el eficiente desempeño de la separación de los flocs formados en la coagulación – floculación, principalmente en la etapa de sedimentación, lo que es compatible con la mayor proporción de lodos acumulados en estas unidades y es similar a lo reportado por otros autores [6], [23], [36].

3.2. Modelamiento predictivo de la producción de lodos en la PTAP

La Figura 1 muestra la producción observada (datos reales) y estimada de lodos de la PTAP mediante los modelos empíricos presentados en la Tabla 3; en ella se observan dos grupos de tendencias o agrupaciones de los modelos:

- El primero corresponde a los modelos descritos por AFEE (1982) citado por [19], [22] y [24];
- El segundo grupo lo conforman los modelos de CETESB (2001) citado por [20], [21] y [23].

En general, entre estos modelos, el primer grupo es el que más se ajusta a las condiciones de generación de los lodos en la PTAP, lo que es de gran interés, ya que esta estimación puede aportar a generar una aproximación del tiempo y cantidad de lodos que aporten información para la toma de decisiones sobre las labores de mantenimiento y lavado de los tanques sedimentadores y a la proyección de cantidades de lodo a ser manejado, ya sea para aprovechamiento o para disposición final.

Con relación al modelo estocástico ARIMA, se comprobó si la serie de producción de lodos presentaba estacionariedad en varianza utilizando la transformación de Box y Cox (Figura 2.a), donde se observa que el intervalo de confianza al 95% contiene el valor $\lambda=0$, lo cual sugiere que la serie requiere una transformación logarítmica. Posteriormente, se obtuvieron las funciones FAC y FACP para la serie bajo análisis (Figuras 2.b y 2.c, respectivamente), las cuales tienen varios rezagos o autocorrelaciones significativas que no decaen con relativa rapidez a cero, lo cual sugiere que la serie no es estacionaria en nivel; por tal motivo, la serie necesita ser diferenciada por lo menos una vez para lograr estabilidad en media [30].

Tabla 3. Eficiencia de remoción turbiedad y color en clarificación, filtración y total por año de observación

Variable	Clarificación			Filtración			Total		
	Año 1	Año 2	Año 3	Año 1	Año 2	Año 3	Año 1	Año 2	Año 3
Turbiedad (UTN)	94.7%	83.6%	62.1%	3.8%	10.6%	23.6%	98.5%	94.2%	85.7%
Color Aparente (UPtCo)	86.0%	64.5%	51.1%	8.0%	18.9%	27.0%	94.0%	83.4%	78.1%

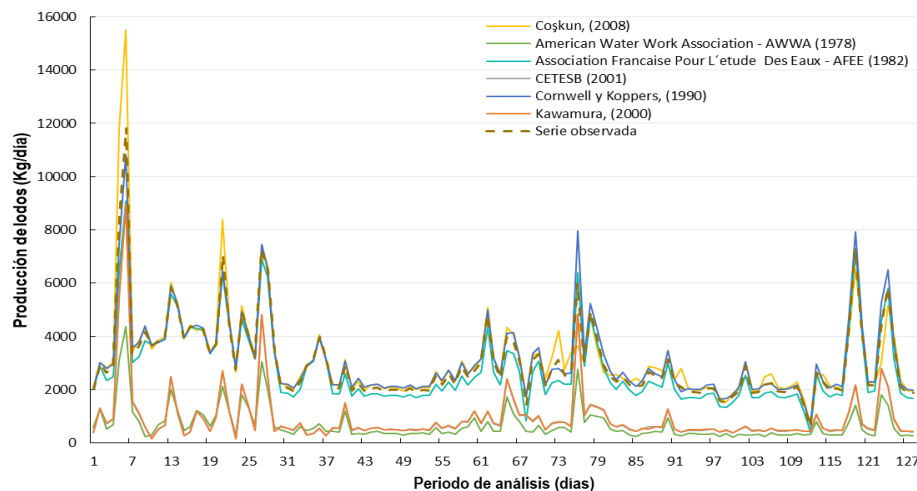


Figura 1. Producción Estimada de Lodos PTAP. Fuente: elaboración propia.

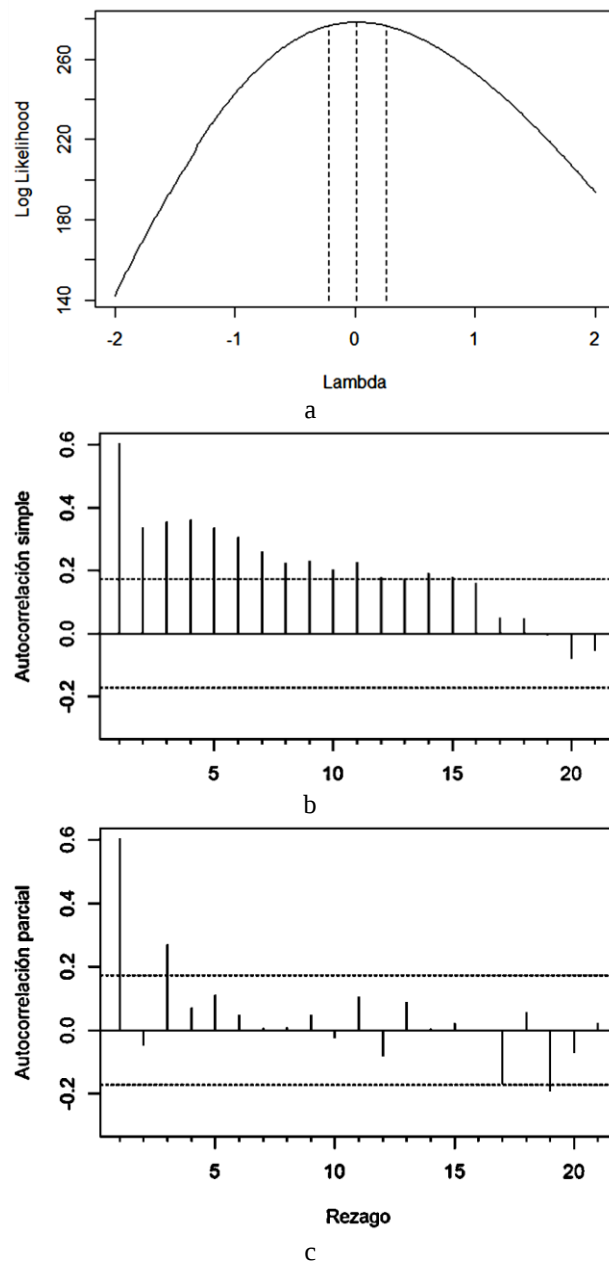


Figura 2. Verificación de condiciones de estacionariedad para la serie de lodos observada: a. Transformación de Box-Cox, b. Función de autocorrelación simple y c. Función de autocorrelación parcial. Fuente: elaboración propia.

A pesar de que en la serie de producción de lodos no se observan evidencias de tendencias en el periodo de observación ni ciclos que sugieran algún comportamiento en particular, se presentan algunos picos donde aumenta la producción de lodos o decrece considerablemente en comparación a otros días. Este comportamiento puede ocasionar inestabilidad en la

varianza y por tanto es necesario aplicar transformaciones para lograr estimaciones de la producción de lodos más precisas. En este sentido, las transformaciones de Box-Cox son ampliamente usadas y aunque existen varias opciones según las características de los datos, la transformación con el logaritmo natural tiene la ventaja de mantener la forma de la distribución y la facilidad de regresar a la variable original de producción de lodos [37].

La prueba de raíces unitarias de [29] (Tabla 4) determina si la producción de lodos necesita al menos una diferenciación para ser estacionaria en nivel [37]. Dado que el valor-p en la serie sin diferenciar es mayor a un nivel de significancia del 5% y es inferior a este valor con la primera diferenciación, se concluye que la serie es estacionaria en nivel con una diferenciación.

Tabla 4. Prueba de raíces unitarias

Serie	Estadístico	Valor-p
Sin diferenciar	-28.579	0.219
Con una diferenciación	-6.309	<0.01

En la Figura 3 se observa la FAC y FACP para la serie diferenciada una sola vez, donde se puede apreciar que hay 2 autocorrelaciones significativas, lo cual sugiere que el modelo ajustado deberá tener dos parámetros involucrados de medias móviles o autorregresivos [38].

De acuerdo con lo anterior, los modelos que se proponen inicialmente con base en la FAC y la FACP son ARIMA (0,1,2) y ARIMA (2,1,0), respectivamente. Adicionalmente, al utilizar la función automática del software R para encontrar el mejor modelo ARIMA según los criterios de información AIC y BIC, éstos concuerdan con el modelo ARIMA que ha sido diferenciado una vez y con dos parámetros de medias móviles (ARIMA (0,1,2): AIC=78.44 y BIC=86.98; ARIMA (2,1,0): AIC=87.84 y BIC=96.37).

La Figura 4 muestra el efecto de los valores atípicos identificados a partir de los residuales obtenidos del modelo ARIMA, lo cual sugiere que a partir del día 30 de observación, la serie temporal presentó un cambio de nivel, reduciéndose la cantidad de lodo producido de manera permanente. De igual forma, se identificaron algunas observaciones inusuales que influyen sobre el comportamiento de la serie de manera transitoria cuyo efecto se disipa en el corto tiempo.

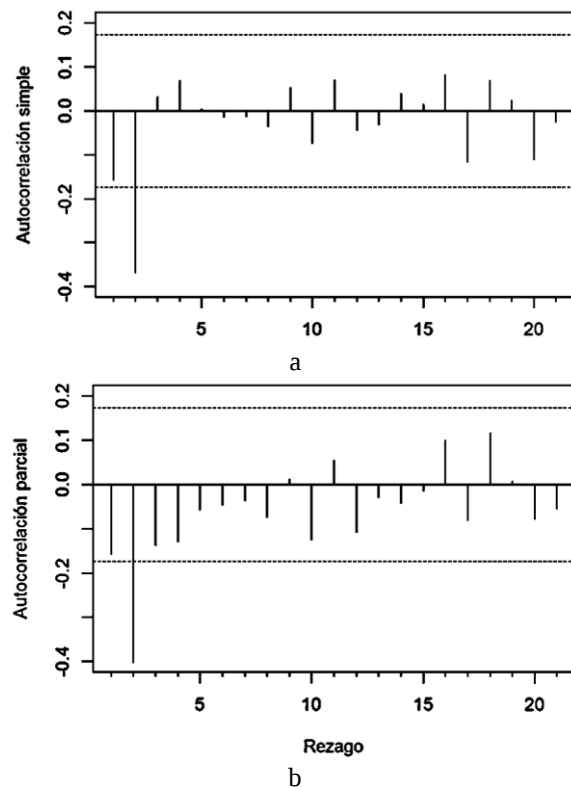


Figura 3. Verificación de condiciones de estacionariedad para la serie de lodos diferenciada: a. Función de autocorrelación simple y b. Función de autocorrelación parcial. Fuente: elaboración propia.

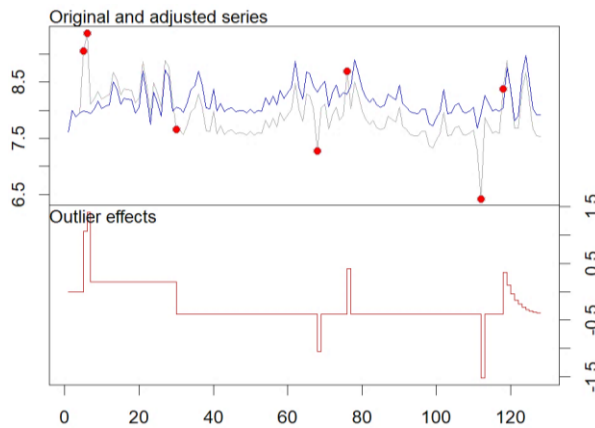


Figura 4. Efecto de los valores atípicos identificados. Fuente: elaboración propia

La **Tabla 5** muestra los parámetros estimados del modelo estocástico propuesto para pronosticar la producción diaria de lodos. Este modelo sugiere que la producción de lodos en un día está influenciada por lo ocurrido en los dos días inmediatamente anteriores más el efecto de los eventos exógenos (valores atípicos: aditivos (AO), Cambio temporal (TC), cambio de nivel (LS) e

innovacional (IO)), los cuales afectan el comportamiento regular de la serie observada a partir de un instante de tiempo determinado.

Tabla 5. Estimación de parámetros del modelo ARIMA

Coefficiente	Estimación	Error estándar	Valor-p
θ_1	-0.3204	0.0828	0.0001
θ_2	-0.4856	0.0824	3.7×10^{-6}
IO5	1.0984	0.2299	0.0018
AO6	0.7336	0.1733	0.0231
LS30	-0.5701	0.1505	0.0002
AO68	-0.6507	0.1747	0.0002
AO76	0.8133	0.174	0.0029
AO112	-1.1256	0.1738	9.4×10^{-8}
TC118	0.7474	0.2149	0.0005

Fuente: elaboración propia.

A partir de las estimaciones obtenidas de producción de lodos en Kg/día, se planteó el siguiente modelo ARIMA: Ec. 1.

$$\nabla \log(y_t) = \sum_{i=1}^7 v_i(B)A_t + (1 + 0.3204B + 0.4856B^2)a_t \quad (1)$$

donde $\log(y_t)$ es la producción de lodos transformada con logaritmo natural, A_t es el valor atípico detectado, $v_i(B)$ es el efecto sobre la serie observada de la i -ésima observación atípica detectada, B es el operador de rezago y a_t es la componente de error del modelo la cual es una variable aleatoria no observable.

En la **Figura 5** se observan los valores experimentales de la producción de lodos y los valores estimados con el modelo ARIMA; en general se encuentra que éstos son similares (RMSE=815.5), presentando un valor de la métrica RMSE superior a las reportadas por el primer grupo de modelos empíricos (RMSE: Cornwell & Koppers=291.8, AFEE=407.8 y Coşkun=553.3) y menor a las reportadas por el segundo grupo de modelos empíricos (RMSE: Kawamura=2240.9, CETESB=2251 y AWWA=2551.3). La predicción mediante el modelo ARIMA sugiere que en promedio se producen alrededor de 2173.65 ± 549 kg/día de lodo en base seca según el intervalo de predicción al 95%, mientras que experimentalmente se encontró que la PTAP produce alrededor de 2207 Kg, lo que indica una diferencia relativa de 1.51% entre el valor pronosticado y el valor observado.

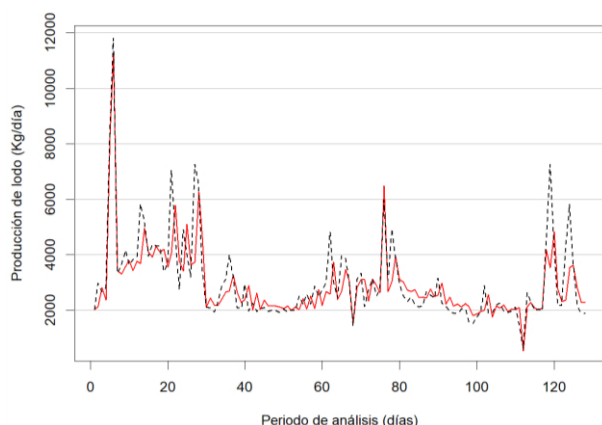


Figura 5. Estimación de la producción de lodos en el periodo evaluado (línea roja: serie estimada; línea negra: serie observada). Fuente: elaboración propia.

En general, en la literatura se encuentran estimaciones variables de producción de lodos, por lo que no es recomendable generalizar, ya que ésta depende de muchos factores como las características del agua cruda, el tipo y dosis de coagulante, las condiciones o mecanismo de coagulación y la configuración de la PTAP, por lo que la estimación de la producción de lodos de PTAP es variable en cada PTAP, como lo muestran estudios como el de [39].

Debido a que el modelo fue ajustado con datos correspondientes a un periodo de 5 meses, se recomienda actualizar constantemente el modelo y realizar un debido seguimiento para verificar su capacidad predictiva en periodos posteriores y rangos de tiempo mayores, lo que permitirá que la operación asociada al manejo de los lodos de la PTAP sea más eficiente.

4. Conclusiones

El análisis de las variables turbiedad y color aparente del agua cruda, clarificada y filtrada, ratifican que como es de esperarse en una planta de tratamiento de agua convencional o de ciclo completo, la gran proporción de sólidos suspendidos (en términos de eficiencia de reducción promedio de turbiedad y color aparente, respectivamente), es retenida en la sedimentación (80.13% y 67.2% respectivamente) en comparación con la filtración (12.67% y 17.97% respectivamente) durante los 3 años de seguimiento, lo que indica la importancia de considerar los lodos de la sedimentación como los de mayor prioridad desde el punto de vista de manejo tanto para disposición final como para potencial aprovechamiento.

Los modelos empíricos de predicción Cornwell y Koppers, AFEE y Coşkun, mostraron mayor similitud con la producción de lodos observada en la sedimentación de la PTAP; sin embargo, el modelo estocástico ARIMA, que considera la propia historia de la serie para realizar predicciones sin depender de variables exógenas, fue más ajustado a los datos reales de producción de lodos, encontrándose una producción diaria estimada de lodos sedimentados del orden de 2173.65 ± 549 Kg diarios de lodo en base seca comparados con los 2207 Kg/día determinados en la PTAP.

Como estrategia de operación y de predicción de la producción de lodos en PTAP, es recomendable establecer un registro sistemático de la producción de lodos de manera continua, de tal forma que se puedan identificar de manera más adecuada los modelos que favorezcan establecer mecanismos de predicción más próximos a la realidad, y así identificar e implementar acciones de manejo de los mismos. Adicionalmente, es recomendable realizar estudios similares para identificar el o los modelos predictivos acordes con la producción de lodos generados en la operación de lavado de filtros.

Referencias

- [1] World Health Organization, *Guidelines for Drinking-water Quality*, 3rd ed. Geneva: World Health Organization, 2011.
- [2] A. Pérez-Vidal, P. Torres-Lozada, J. Escobar-Rivera, "Hazard identification in watersheds based on water safety plan approach: case study of Cali-Colombia," *Environ. Eng. Manag. J.*, vol. 15, no. 4, pp. 861–872, 2016, doi: <http://10.30638/eemj.2016.093>
- [3] W. Q. Betancourt, J. B. Rose, "Drinking water treatment processes for removal of Cryptosporidium and Giardia," *Vet. Parasitol.*, vol. 126, no. 1–2, pp. 219–234, 2004, doi: <http://10.1016/j.vetpar.2004.09.002>
- [4] S. R. Qasim, E. M. Motley, G. Zhu, *Water Works Engineering: Planning, Design, and Operation*. Prentice Hall PTR, 2000. [Online]. Available: <https://books.google.com/books?id=cAlSAAAMAAJ>
- [5] R. F. Quirós, "Lodos producidos en el tratamiento del agua potable," *Técnica Ind.*, vol. 275, p. 47, 2008.
- [6] L. Di Bernardo, D. B. Dantas, "Métodos e técnicas de tratamento de água," *Eng. Sanit. e Ambient.*, vol. 11, no. 2, pp. 107–107, 2006, doi: <http://10.1590/S1413-41522006000200001>

- [7] Y. Q. Zhao, X. H. Zhao, A. O. Babatunde, "Use of dewatered alum sludge as main substrate in treatment reed bed receiving agricultural wastewater: Long-term trial," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 2, pp. 644–648, 2009, doi: <http://10.1016/j.biortech.2008.07.040>
- [8] J. H. Adler, "Fables of the Cuyahoga: Reconstructing a History of Environmental Protection," *SSRN Electron. J.*, 2002, doi: <http://10.2139/ssrn.333140>
- [9] O. Ceron, S. Millan, F. Espejel, A. Rodríguez, R. M. Ramirez, "Aplicación de lodos de plantas potabilizadoras en materiales cementantes para elaborar productos de la construcción," trabajo fin de curso, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.
- [10] P. Torres, D. Hernández, D. Paredes, "Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos," *Rev. Ing. construcción*, vol. 27, no. 3, pp. 145–154, 2012, doi: <http://10.4067/S0718-50732012000300003>
- [11] C. Ferone et al., "Sustainable management of water potabilization sludge by means of geopolymers production," *J. Clean. Prod.*, vol. 229, pp. 1–9, 2019, doi: <http://10.1016/j.jclepro.2019.04.299>
- [12] S. De Carvalho Gomes, J. L. Zhou, W. Li, G. Long, "Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 145, pp. 148–159, 2019, doi: <http://10.1016/j.resconrec.2019.02.032>
- [13] V. T. Katayama, C. P. Montes, T. H. Ferraz, D. M. Morita, "Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica," *Eng. Sanit. e Ambient.*, vol. 20, no. 4, pp. 559–569, 2015, doi: <http://10.1590/S1413-41522015020040105046>
- [14] "Comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico," 2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.cra.gov.co/>
- [15] B. O. Ferreira, M. R. Vianna, "Caracterização qualitativa e quantitativa do lodo originário dos decantadores de uma estação de tratamento de água da região metropolitana de Belo Horizonte tratando água de baixa turbidez," *Construindo*, pp. 17–20, 2011.
- [16] A. Pérez-Vidal, J. C. Escobar-Rivera, P. Torres-Lozada, "Evaluación del riesgo en procesos de tratamiento de agua para el desarrollo de un Plan de Seguridad del Agua – PSA," *DYNA*, vol. 85, no. 206, pp. 304–310, 2018, doi: <http://10.15446/dyna.v85n206.65427>
- [17] American Water Works Association, *Water quality and treatment: A Handbook Of Community Water Supplies*. New York, 1999.
- [18] D. Bartiko, M. De Julio, "Construção e emprego de diagramas de coagulação como ferramenta para o monitoramento contínuo da floculação em águas de abastecimento," *Ambient. e Agua - An Interdiscip. J. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 1, 2015, doi: <http://10.4136/ambi-agua.1239>
- [19] A. Saron, B. M. Barbosa, "Quantificação de lodo em estação de tratamento de água," trabajo de maestría, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, doi: <https://10.11606/D.3.2012.tde-19072013-161144> 2001
- [20] G. F. Januário, S. S. Ferreira Filho, "Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da Região Metropolitana de São Paulo," *Eng. Sanit. e Ambient.*, vol. 12, no. 2, pp. 117–126, 2007, doi: <http://10.1590/S1413-41522007000200002>
- [21] American Water Works Association, *Alum sludge in the aquatic environment*. AWWA Research Foundation and American Water Works Association, 1978.
- [22] D. A. Cornwell, H. M. Koopers, Slib, Schlamm, Sludge. AWWARF and KIWA Ltd., 1990.
- [23] S. Kawamura, *Integrated design of water treatment facilities*, 1st ed. New York, 2000.
- [24] S. Coşkun, "Evsel atık sulardan partikül kirliliği gideriminde alümin çamurunun koagülant olarak kullanılması," SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [25] G. E. P. Box, G. Jenkins, *Time series analysis, Forecasting and control*. San Francisco, 1976.
- [26] G. Boyd, D. Na, Z. Li, S. Snowling, Q. Zhang, P. Zhou, "Influent Forecasting for Wastewater Treatment Plants in North America," *Sustainability*, vol. 11, no. 6, p. 1764, 2019, doi: <http://10.3390/su11061764>

- [27] C. Chen, L.-M. Liu, "Joint Estimation of Model Parameters and Outlier Effects in Time Series," *J. Am. Stat. Assoc.*, vol. 88, no. 421, pp. 284–297, 1993, doi: <http://10.1080/01621459.1993.10594321>
- [28] G. E. P. Box, D. R. Cox, "An Analysis of Transformations," *J. R. Stat. Soc. Ser. B*, vol. 26, no. 2, pp. 211–243, 1964, doi: <http://10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x>
- [29] D. A. Dickey, W. A. Fuller, "Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root," *J. Am. Stat. Assoc.*, vol. 74, no. 366a, pp. 427–431, 1979, doi: <http://10.1080/01621459.1979.10482531>
- [30] V. Guerrero, *Análisis estadístico de series de tiempo económicas*, 2nd ed. Thomson, 2003.
- [31] G. E. P. Box, G. Jenkins, G. C. Reinsel, G. M. Ljung, *Time series analysis: Forecasting and control*. New York, 2015.
- [32] T. R. D. C. Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, 2013.
- [33] IDEAM, "Resolución 062 de 2007," Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Fonda Nacional de Vivienda – Fonvivienda, pp. 1–55, 2007.
- [34] L. A. Arango, "Valorización de lodos aluminosos generados en procesos de potabilización en la fabricación de bloques de adobe," Universidad del Valle, 2015.
- [35] A. Amirtharajah, K. M. Mills, "Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation," *J. Am. Water Works Assoc.*, vol. 74, no. 4, pp. 210–216, 1982, doi: <http://10.1002/j.1551-8833.1982.tb04890.x>
- [36] C. Montoya, D. Loaiza, P. Torres, C. H. Cruz, J. C. Escobar, "Efecto Del Incremento En La Turbiedad Del Agua Cruda Sobre La Eficiencia De Procesos Convencionales De Potabilización," *Rev. EIA*, vol. 8, no. 16, pp. 137–148, 2011.
- [37] D. Peña, *Análisis de Series Temporales*. España: Alianza, 2010.
- [38] J. D. Cryer K. S. Chan, *Time series analysis with applications in R*, 2nd ed. 2008.
- [39] M. V. Martínez, "Estudio para el tratamiento, manejo y disposición final de lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable," trabajo fin de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2012.