

# Retention Time and Substrate Composition in Artificial Wetlands in the Removal of Iron and Copper from Acid Mine Drainage

Gladys S. Licapa-Redolfo, MSc<sup>1</sup>, Gary Christiam Farfán Chilicaus, Ms.<sup>2</sup>, Berardo S. Escalante Zumaeta, Dr<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, Gladys.licapa@upn.edu.pe

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, gfarfanc@unitru.edu.pe

<sup>3</sup>Universidad Nacional de Cajamarca, Perú, bescalente@unc.edu.pe

*Abstract– This research was conducted to determine the influence of retention time and substrate composition in the removal of iron and copper from acid mine drainage in artificial wetlands. The study was conducted in three phases: field, laboratory and cabinet. In the field phase pilot plant scale and batch process, two sets of artificial wetlands with the following characteristics: 1.08m long, 1.72 m wide and 1.00 m deep, were constructed. Gravel of 1 to 1.5 inches in diameter and material support for the roots of the reeds (*Scirpus californicus*), was used. The acid mine drainage was subjected to treatment for 48 hours, taking samples every 12 hours to determine the concentration of iron and copper by atomic absorption method. After treatment, the substrate composed by 80% of cow dung and 20% of moss and sawdust (1: 1) removed 97.66% iron and 90.12% copper in the retention time of 48 hours.*

*Keyword-- Acid mine drainage, retention time, substrate composition, artificial wetland, iron.*

**Digital Object Identifier (DOI):**

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.1.5>

**ISBN:** 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

# Tiempo de Retención y Composición del Sustrato en Humedales Artificiales en la Remoción de Hierro y Cobre del Drenaje Ácido de Mina

Gladys S. Licapa-Redolfo, MSc<sup>1</sup>, Gary Christiam Farfán Chilcaus, Ms.<sup>2</sup>, Berardo S. Escalante Zumaeta, Dr<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, Gladys.licapa@upn.edu.pe

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, gfarfanc@unitru.edu.pe

<sup>3</sup>Universidad Nacional de Cajamarca, Perú, bescalente@unc.edu.pe

**Resumen** - La presente investigación se realizó con el objetivo de determinar la influencia del tiempo de retención y la composición del sustrato en la remoción de hierro y cobre del drenaje ácido de mina en humedales artificiales. El estudio se desarrolló en tres fases: campo, laboratorio y gabinete. En la fase de campo se construyó a escala de planta piloto y en proceso batch dos sistemas de humedales artificiales con las siguientes características: 1.08m de largo, 0.72 m de ancho y 1.00 m de profundidad. Se utilizó grava de 1 a 1.5 pulgadas de diámetro como material de soporte de las raíces de la totora (*Scirpus californicus*). El drenaje ácido de mina fue sometido al tratamiento durante 48 horas, tomando muestras cada 12 horas, para la determinación de la concentración de hierro y cobre por el método de absorción atómica. Después del tratamiento el sustrato compuesto por 80% de estiércol de vaca y 20% de musgo y aserrín (1:1), removió un 97.66% de hierro y 90.12% de cobre para un tiempo de retención de 48 horas.

**Palabras clave** – Drenaje ácido de mina, tiempo de retención, composición del sustrato, humedal artificial, hierro.

## I. INTRODUCCIÓN

Los drenajes ácidos de mina, considerados en un rango de pH de 2 a 4, contienen una gran cantidad de sólidos en suspensión y un alto contenido en sulfatos y metales disueltos (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, etc.); por tanto, son nocivos para la actividad biológica, contaminan los cauces, y pueden llegar a dañar la estructura y la cimentación de construcciones [1]. Por otro lado [2] la generación del drenaje ácido de mina (DAM) es un problema común en los yacimientos polimetálicos peruanos que requiere de especial atención en áreas donde existe mineralización sulfurada no protegida. El principal problema de la calidad del agua por la actividad minera es generalmente debido a los efectos del drenaje ácido de mina no controlado.

En todo el país, el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) ha registrado 6 847 pasivos ambientales mineros (PAM). Las regiones con mayor cantidad de PAM en su territorio son Ancash (1115), Cajamarca (1018), Huancavelica (830), Puno (522), Cusco (507), La Libertad (488) y Pasco (429). En el año 2000, un estudio del Banco Mundial estimó que las actividades mineras y metalúrgicas en conjunto descargan anualmente más de 13 billones de metros cúbicos de efluentes en los cuerpos de agua del país [3], lo cual constituye un problema ambiental de

enorme impacto ecológico que amerita encontrar alguna alternativa para prevenir, minimizar y mitigar sus efectos.

Para corregir el impacto ambiental causado por los drenajes ácidos de las minas de nuestro país se han desarrollado programas ambientales en los cuales se invierten grandes cantidades de dinero, pero la mayoría de estos tratamientos son químicos (tratamiento del DAM por precipitación con cal), sin desmerecer el efecto positivo del mismo, sin embargo se puede tener significativos ahorros con la implantación de sistemas biológicos tanto de fitorremediación y biorremediación adaptadas a las situaciones específicas de cada drenaje ácido de mina [4].

Los países industrializados, frente al tratamiento convencional de los drenajes ácidos de minas, utilizan la tecnología de humedales, pues además de eliminar el uso de productos químicos (CaO, Ca(OH)<sub>2</sub>, NaOH, CaCO<sub>3</sub> y Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), tienen bajo costo de construcción, operación y mantenimiento. Además, proporciona un hábitat de calidad para la flora y la fauna en armonía con el paisaje [5].

Existen dos tipos de sistemas de humedales artificiales, el sistema de flujo libre de agua (FWS) y el sistema de flujo subsuperficial (SFS). Ambos se basan en los mismos procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los humedales naturales. En estos procesos se destacan los humedales aerobios, anaerobios o balsas orgánicas y los drenajes anóxicos en caliza (ALD, anoxic limestone drains), y las barreras reactivas permeables en aguas subterráneas (PRB, permeable reactive barriers) [5]. Sin embargo, a pesar de las bondades técnicas antes descritas, en nuestro país no se dispone de información sobre su implementación, y uso en el tratamiento de DAM, y menos existen evaluaciones sobre la remoción de los metales (Fe, Cu), en función al tiempo de retención y composición del sustrato. En la presente investigación se trata de evaluar estas variables, tomando en consideración cuatro periodos de tiempos: 12, 24, 36 y 48 horas.

## II. MATERIALES Y METODOS

### A. Ubicación y Recolección de la Muestra

El material de estudio estuvo constituido por las muestras de drenaje ácido de mina de Hualgayoc, ubicado a 88 km al norte de la ciudad de Cajamarca y a 29 Km al oeste de Bambamarca, a una altitud que varía entre los 3 515 msnm y

3716 msnm, en el distrito Hualgayoc, provincia de Hualgayoc en la región Cajamarca, Perú, procediendo a registrar la ubicación a través de la georreferenciación e identificación del punto de muestreo; asimismo la roca caliza y aserrín se obtuvieron de proveedores comerciales de la región, por otro lado el estiércol de vaca predescompuesto y musgo los que se obtuvieron del Centro Experimental Agrícola “La Victoria” que se encuentran en las instalaciones de la Universidad Nacional de Cajamarca (Fig. 1).

TABLA 1  
PUNTOS DE MUESTREO GEORREFERENCIADO

Parámetro	Punto de Muestreo	Ubicaciones Coordenadas
Concentración de Hierro, mg/L	P1/P2	Longitud Oeste: 78°27'40.95''
Concentración de cobre, mg/L	P1/P2	Latitud Sur: 07°1'27.32''

### B. Diseño de Investigación

El tipo de investigación de acuerdo a la finalidad, es aplicada. De acuerdo a la técnica de contrastación, es experimental y según la temporalidad transversal.

### C. Caracterización de la muestra antes del tratamiento

Se aplicó el protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), teniendo en cuenta los parámetros de campo como temperatura y pH, posteriormente se realizó el análisis de la muestra en el laboratorio de Minería y Medio Ambiente de la Universidad privada del Norte mediante espectrofotometría de absorción atómica.

### D. Procedimiento Experimental

Para el diseño del experimento se consideró la caracterización de los componentes de tal manera que los resultados finales del DAM a tratar en el humedal construido durante tiempos definidos cumplieron con los estándares de calidad ambiental que fija el sector como son:

- Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividad minero-metalúrgicas D.S N° 010-2010-MINAM.
- Estándares nacionales de calidad ambiental para Agua. D.S N° 002-2008-MINAM (Se considerará la categoría III).

Las pruebas experimentales fueron desarrolladas según la secuencia mostrada (fig. 1).

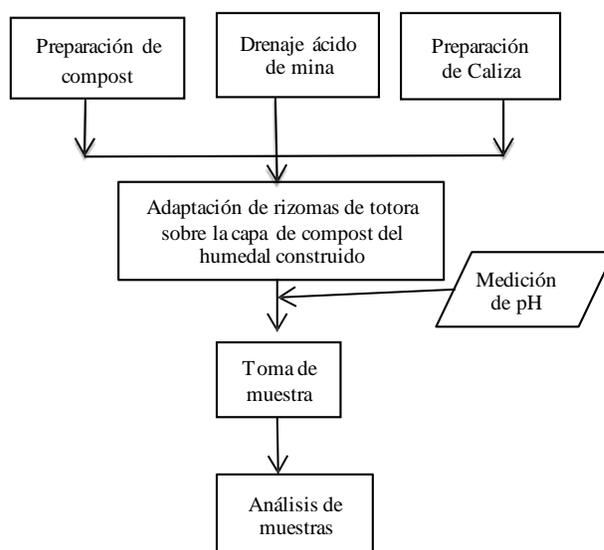


Fig. 1. Diagrama de flujo del procedimiento experimental general.

### E. Diseño de humedal artificial anaerobio tipo Batch

El humedal construido tiene la función principal de recrear los procesos que ocurren en los humedales naturales removiendo la carga contaminante que tienen los DAM de la vegetación que se implantó (Fig. 2).

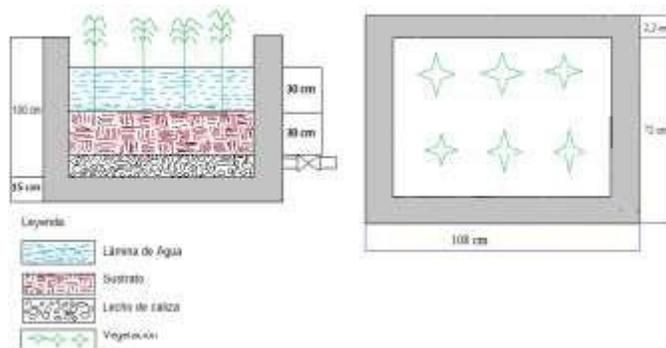


Fig. 2. Diseño técnico del humedal construido anaerobio tipo batch, en vista frontal y planta.

#### a) Construcción del humedal artificial anaerobio tipo batch

La construcción del humedal artificial a escala de laboratorio se realizó haciendo excavaciones bajo condiciones de campo abierto en el Centro Experimental Agrícola “La Victoria”, de las siguientes dimensiones: 1.08 m de longitud, 0.72 m de ancho, 1.00 m de profundidad. Las paredes internas y la base fueron cubiertas con geomembrana para evitar filtraciones.

#### b) Sustrato

Como medio se usó grava cuyo tamaño oscila entre 1 y 1.5 pulgadas de diámetro, se colocó una superficie de 15 cm de

caliza con una pureza mayor a 90%. El sustrato fue colocado hasta una altura de 30 cm y fue preparado a base de 20 % estiércol de vaca predescompuesto y 80% de musgo y aserrín (1:1) para el humedal artificial 1; y de 80% estiércol de vaca predescompuesto y 20% musgo y aserrín (1:1) para el humedal artificial 2 (fig. 3).



Fig. 3. Colocando grava, cal y la materia orgánica a los sistemas de tratamiento

#### c) Vegetación

Se usó planta emergente nativa conocida comúnmente como totora (*Scirpus californicus*), por su tolerancia a un amplio rango de pH y temperatura; y por ser una planta nativa adaptada a nuestro medio [6], [5]. El trasplante se inició a partir de los rizomas de totora a una separación de 20 cm entre rizomas.

#### d) Drenaje ácido de mina

El humedal construido se inundó con aproximadamente 400 litros por batch de drenaje ácido de mina proveniente de Hualgayoc, ocupando un espesor de 30 cm.

#### F. Toma de muestras en los sistemas de tratamiento

El muestreo aplicado fue en toda el área fijada de manera manual con hipodérmicas de 100 mL, ya que el humedal construido es a nivel piloto a campo abierto a condiciones controladas, teniendo en cuenta las normas técnicas peruanas:

- NTP ISO 5667 -14:2009. Calidad del Agua. Muestreo. Parte 14: Guía para el aseguramiento de la calidad del muestreo del ambiente y su manipulación.
- NTP ISO 5667 -3:2001. Calidad de Agua. Muestra Parte 3. Guía para la preservación y manejo de muestras.

Las muestras se tomaron por triplicado con intervalos de 12 horas cada una.

#### G. Envasado de las Muestras

Las muestras fueron envasadas en frascos esterilizados de vidrio de 500mL de capacidad debidamente codificados y rotulados. Para la preservación de las muestras, se realizó mediante la nivelación por alícuotas, las muestras de cada frasco fueron preservadas con una solución al 1% de ácido nítrico; es decir se agregó alícuotas de la solución ácido nítrico al 1% hasta llegar a un  $pH \leq 2$ .

#### H. Análisis de Hierro y Cobre

Las determinaciones de los metales hierro y cobre se realizaron en el Laboratorio de Minería y Medio Ambiente de la Universidad Privada del Norte, por el método de absorción atómica, siguiendo los protocolos establecidos para metales (fig. 4).



Fig. 4. Análisis de hierro y cobre en el drenaje ácido de mina

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados presentados del análisis de hierro a diferentes tiempos de retención (0, 12, 24, 36 y 48), demuestran que la capacidad de remoción es de 107.46 mg/L a 2.87 y 2.51 mg/l respectivamente, lo que difiere de otras investigaciones en la cual la máxima capacidad de remoción en época fría es de 6.67 mg/L a 4.58 mg/L y en épocas calurosas es mayor con una remoción de 6.67mg/L a 1.48 mg/L, esto puede deberse a que el hidróxido de hierro es insoluble a pH básico y empieza a precipitar, por la tanto la tasa de capacidad de remoción aumenta [6], [7], lo cual se confirma que los objetivos de control del proceso de tratamiento de boca mina nivel 250 al río San José fue con un pH entre 8.2-8.6, demostrando eficiencia para precipitar todos los metales auditables [8].

La influencia del tiempo de retención y la composición del sustrato en la remoción de hierro del DAM en humedales artificiales, utilizando los sustratos en la presente investigación (S1: 20% de estiércol de vaca predescompuesto y 80% de musgo y aserrín (1:1) y S2: 80% de estiércol de vaca predescompuesto y 20% de musgo y aserrín (1:1)), mostraron alta efectividad en la remoción de hierro del drenaje ácido de mina.

S1, S2: Tipo de sustrato; E.V.= estiércol de vaca predescompuesto; M.A.= musgo y aserrín (1:1).

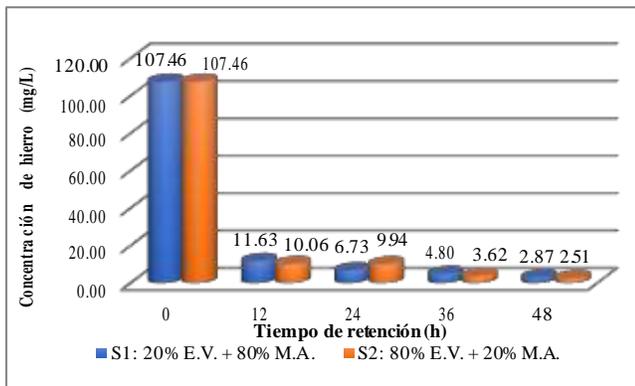


Figura 5. Concentraciones promedio de hierro (mg/L) en el drenaje ácido de mina a diferentes tiempos de retención y los distintos tipos de sustrato.

Los porcentajes de remoción de hierro guardan relación directa con el tiempo de retención del DAM en cada uno de los sustratos, tal es así que al término de 48 horas de exposición del DAM a los sustratos S1 y S2 se ha logrado remover el 97.33% y 97.66% de hierro respectivamente. Entre las 0 y 12 horas se registró la máxima capacidad de remoción de hierro en ambos sustratos, para S1 de 89.18% y S2 de 90.64%. Posteriormente entre las 12 y 48 horas de exposición la tasa de remoción de hierro es menor, pero continúa a un ritmo relativamente constante (fig.6). Finalmente, a las 48 horas de exposición se constató que en el drenaje ácido de mina tan solo 2.872 mg/L y 2.513 mg/L de hierro en solución según que haya tomado contacto con el sustrato S1 y S2 respectivamente (Fig. 5).

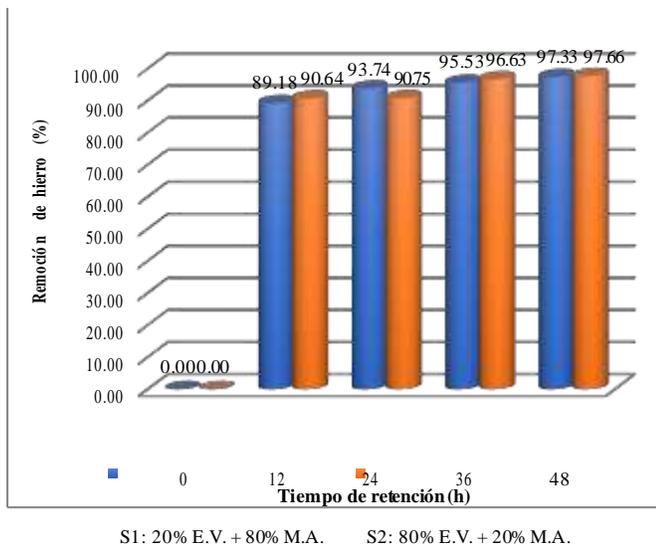
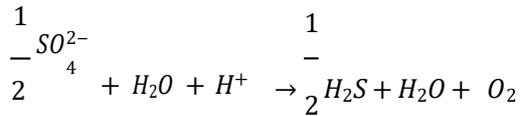
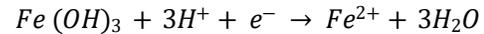


Figura 6. Remoción de hierro (%) del drenaje ácido de mina a diferentes tiempos de retención y diferentes tipos de sustrato.

Este fenómeno natural es un proceso biológico de reducción, debido a la ausencia de oxígeno existen otros agentes oxidantes como es el sulfato ( $SO_4$ ), en la cual el proceso biológico dirigido por este oxidante genera una reducción bacteriana a  $H_2S$  a partir  $H^+$ , proceso acompañado por una descomposición de la materia orgánica [11]:



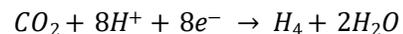
Otra de las reacciones que intervienen en este proceso biológico es la reducción del  $Fe^{+3}$  a  $Fe^{2+}$ :



Debido a que este es un tratamiento anaeróbico, los cationes ferrosos precipitan como sulfuros, catalizadas por las bacterias sulfuroductoras. Para la precipitación de los iones de  $Fe^{2+}$  en forma de sulfuros se desarrolla según la siguiente ecuación:

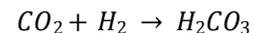
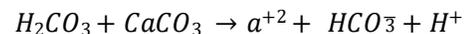
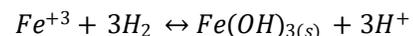
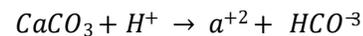


Una vez que se forma el  $FeS$  una parte precipita por gravedad al sedimento y otra se adhiere a las hojas y tallos de la vegetación minimizando de esta manera la concentración de hierro total en el DAM tratado. Finalmente, la conversión de materia orgánica a  $CO_2$  consume oxidante, el potencial de reducción disminuye generando la formación de  $CH_4$ , establecida en la siguiente ecuación:



Los resultados obtenidos en esta investigación difieren con los de Farfán en la que se logra remover hasta un 98.49% de hierro, mientras que nuestro tratamiento llega hasta 97.33% para el sustrato tipo S1 y 97.66% para el sustrato tipo S2 [12].

La cal aporta en las formaciones de precipitados insolubles de los metales, en la capa de caliza las posibles reacciones son [13]:



Por otro lado de acuerdo a las propiedades de los cationes el ión  $Ca^{+2}$  es más electropositivo que el ión cúprico y férrico por lo tanto se hidroliza con facilidad y forma el hidróxido cálcico que es poco soluble generando los lodos y disminuyendo la eficiencia de precipitación de los metales, por lo que se puede indicar que la precipitación de metales es generada en conjunto con las reacciones en la capa de agua, en la capa de materia orgánica y en la capa de caliza [13].

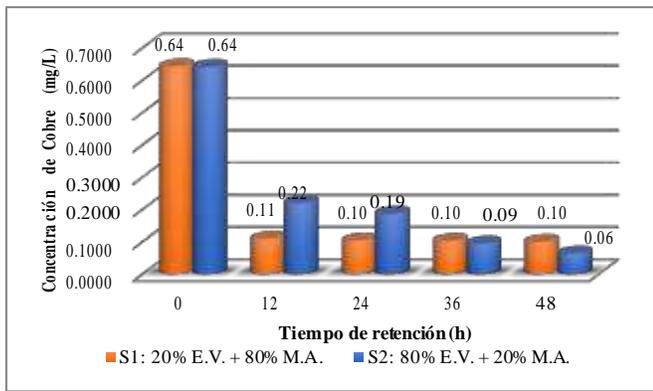


Fig. 7. Concentraciones promedio de cobre (mg/L) del drenaje ácido de mina a diferentes tiempos de retención y distintos tipos de sustrato.

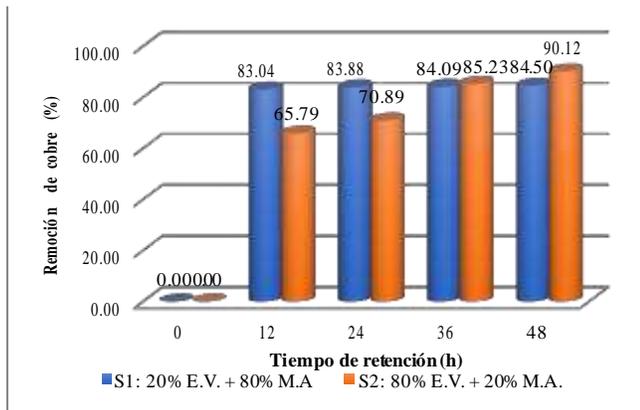


Fig. 8. Remoción de cobre (%) del drenaje ácido de mina a diferentes tiempos de retención y diferentes tipos de sustrato.

Los porcentajes de remoción de cobre guardan relación directa con el tiempo de retención del DAM en cada uno de los sustratos, tal es así que al término de 48 horas de exposición del DAM a los sustratos S1 y S2 se ha logrado remover el 84.50% y 90.12% de cobre respectivamente. Entre las 0 y 12 horas se registró la máxima capacidad de remoción de cobre en ambos sustratos, para S1 de 83.04% y S2 de 65.79%. Posteriormente entre las 12 y 48 horas de exposición la tasa de remoción de cobre es menor, pero continúa a un ritmo relativamente constante (fig. 8). Finalmente, a las 48 horas de exposición se constató que en el drenaje ácido de mina tan solo de 0.0997 mg/L y 0.0633 mg/L de cobre en solución según que haya tomado contacto con el sustrato S1 y S2 respectivamente (fig. 7).

TABLA 2

RESUMEN DEL ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA REMOCIÓN DE HIERRO

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F <sub>0</sub>	Probabilidad $\alpha = 0.05$	Valor crítico para F <sub>c</sub>
Composición del sustrato	0.0011	1	0.0011	0.1651	0.6899	4.4140
Tiempo de Retención	217.5025	3	72.5008	10930.8475	0.0000	3.1600
Interacción	18.7699	3	6.2566	943.3018	0.0000	3.1600
Error	0.1061	16	0.0066			
Total	236.379	23				

De acuerdo al análisis estadístico de ANOVA según la tabla 2 y 3, se concluye que el tiempo de retención influye significativamente sobre la remoción de hierro y cobre, sin embargo, la composición del sustrato no influye sobre la remoción de hierro. Además, se puede concluir que la mejor combinación de tiempo por la composición del sustrato de acuerdo a la estadística es de 48 horas y el 80% de estiércol de vaca predescompuesto y 20% de musgo y aserrín (1:1).

TABLA 3

RESUMEN DEL ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA REMOCIÓN DE COBRE

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F <sub>0</sub>	Probabilidad $\alpha = 0.05$	Valor crítico para F <sub>c</sub>
Composición del sustrato	206.665	1	206.665	55.270	0.000	4.494
Tiempo de retención	657.698	3	219.233	58.63	0.000	3.239
Interacción	542.222	3	180.741	48.337	0.000	3.239
Error	59.827	16	3.739			
Total	1466.413	23				

#### IV. CONCLUSIONES

Se concluye que el mejor tiempo de retención del drenaje ácido de mina proveniente de un pasivo ambiental en humedal artificial para la remoción de hierro y cobre es 48 horas, obteniéndose una remoción para hierro de 97.33% y 97.66% para ambos tipos de sustratos; en cambio la remoción para cobre en ambos tipos de sustratos fue de 84.50% y 90.12%; y la mejor composición del sustrato para la remoción de hierro y cobre en humedales artificiales es el 80% de estiércol de vaca predescompuesto con 20% de musgo y aserrín (1:1) con el que se obtiene una remoción de 97.66% de hierro, en el que disminuye la concentración de 107.46 mg/L a 2.51 mg/L; y la remoción de cobre de 90.12%, en el que disminuye la concentración de 0.64 mg/L a 0.063 mg/L [15]. Estadísticamente, la mejor interacción que influye en la

remoción de hierro y cobre son tiempo y composición del sustrato (48 horas y 80% de estiércol de vaca predescompuesto y 20% de musgo y aserrín (1:1), respectivamente).

#### AGRADECIMIENTO

Se agradece particularmente a la Universidad Nacional de Cajamarca por brindar las instalaciones del centro experimental “la Victoria” para conducir el experimento a nivel piloto y a la Universidad Privada del Norte Sede Cajamarca, por brindar el laboratorio para el desarrollo de la presente investigación.

#### REFERENCIA

- [1] E. Lopez, O. Aduvire, y D. Baretino, «Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro», p. 19, 2002.
- [2] M. Nina Chambe, «Evaluación de los métodos químico y biogénico para el tratamiento de drenaje ácido de mina a escala de laboratorio. Caso: Mina Cerro de Pasco», *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 2008, Accedido: 20 de diciembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/802>
- [3] J. M. Balta, «Pasivos Ambientales Mineros en Perú: bombas de tiempo de las que nadie se hace responsable», *CIPER Chile*, 17 de noviembre de 2011. <https://www.ciperchile.cl/2011/11/17/pasivos-ambientales-mineros-en-peru-bombas-de-tiempo-de-las-que-nadie-se-hace-responsable/> (accedido 20 de diciembre de 2021).
- [4] J. E. Denegri-Muñoz y J. A. Iannacone, «Tratamiento de Drenaje Ácido de Minas Mediante Humedales Artificiales», *Biotempo*, vol. 17, n.º 2, Art. n.º 2, oct. 2020, doi: 10.31381/biotempo.v17i2.3349.
- [5] A. Sotomayor y G. Power, *Tecnologías limpias y medio ambiente en el sector industrial peruano*. Universidad de Lima, 2019. Accedido: 20 de diciembre de 2021. [En línea]. Disponible en: [https://scholar.google.com.pe/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=es&user=yIAHhwcAAAAJ&citation\\_for\\_view=yIAHhwcAAAAJ:UebtZR9Y70C](https://scholar.google.com.pe/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=yIAHhwcAAAAJ&citation_for_view=yIAHhwcAAAAJ:UebtZR9Y70C)
- [6] Perú Ecológico, «TOTORA (*Scirpus californicus*) Uso Sostenible de un Recurso Natural». [https://www.peruecologico.com.pe/flo\\_totora\\_2.htm](https://www.peruecologico.com.pe/flo_totora_2.htm) (accedido 22 de diciembre de 2021).
- [7] W. J. Cuadrado Campo, C. E. Vicuña Orihuela, y E. R. Torres Gutiérrez, «Evaluación de la planta *Scirpus californicus* (Totora) en la eficiencia de remoción de fierro en un prototipo de humedal construido de flujo superficial», *Horizonte de la Ciencia*, vol. 11, n.º 1, Art. n.º 1, 2014, doi: 10.26490/uncp.prospectivauniversitaria.2014.11.6.
- [8] S. M. Poma Vásquez, «Estimación de la remoción de cromo, hierro y manganeso mediante un humedal artificial utilizando *Eichhornia crassipes*», 2015.
- [9] W. Cieza Zamora y M. Á. Guevara Terrones, «Influencia del Tiempo y Espesor de Capa de Caliza sobre la Remoción de Hierro Total y Sulfatos Mediante un Humedal Artificial de un Drenaje Ácido de Minas del Distrito de Hualgayoc, Cajamarca.», Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo, 2020.
- [10] A. E. Puente Rodríguez, «Optimización del sistema de tratamiento y disposición sanitaria de aguas residuales industriales para vertimiento clase III, provenientes de la boca mina del nivel 250 (EF 03) al río San José», 2019.
- [11] B. Colin, *Química Ambiental*, 2 Ed. España: Editorial Reverté, 2011. Accedido: 22 de diciembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.cienciasambientales.com/es/noticias-ambientales/nueva-edicion-del-libro-de-colin-baird-quimica-ambiental-8531>
- [12] G. C. Farfán Chilcaus, «Influencia del tiempo de retención del drenaje ácido de mina sobre la concentración de hierro total y sólidos suspendidos», Tesis Posgrado, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, 2012.
- [13] C. Vargas, «Manual de Tratamientos de Efluentes Minero – Metalúrgicos», 2015.
- [14] P. Rimarachín - Varas y F. Huaranga - Moreno, «Tratamiento de aguas de efluentes minero – metalúrgicos utilizando, métodos pasivos y activos en sistemas experimentales», *SCIENDO*, vol. 18, n.º 2, Art. n.º 2, 2015, Accedido: 21 de diciembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/SCIENDO/articulo/view/1352>
- [15] J. M. Taza Malpartida y N. Y. Diaz Cordova, «Remoción de Cu (II) de soluciones acuosas utilizando estiércol de ganado vacuno como adsorbente», Universidad Nacional del Centro del Perú, 2018. Accedido: 21 de diciembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/4932>