



**Diseño hidráulico del prototipo para retención de arsénico en aguas contaminadas por
minería mediante Tecnosoles y nanopartículas**

Galarza Panimboza, Iván Patricio

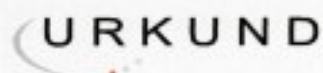
Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Bolaños Guerrón, Darío Roberto Ph.D

4 de agosto del 2020



Urkund Analysis Result

Analysed Document: TESIS GALARZA_final Rev DBG 04-08-2020.docx (D77459891)
Submitted: 8/4/2020 11:29:00 PM
Submitted By: drbolanios@espe.edu.ec
Significance: 6 %

Sources included in the report:

Sanchez-1331-Documento-Tesis-180817.docx (D30180014)
 Tesis Jacque Capa 30-04-2019.docx (D51317293)
 Tesis-Johanna Paz-2018.docx (D38520687)
 16036-Rodríguez Vásquez, Carmen María.pdf (D48958071)
 SEGUNDO AVANCE DE LA TESIS - VIZCARRA ARCE VICTOR.docx (D64799806)
 1595996194_405_Daniel_Cedillo.pdf (D77345903)
https://books.google.com/books/about/Caracterizaci%C3%B3n_de_los_procesos_de_elim.html?id=X2OBMwEACAAJ
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/404/1/Tesis%20Laura%20Gabriela%20C%C3%B3rdova%20Villegas.pdf>
<https://digitum.um.es/digitum/bitstream/10201/47647/1/Tesis%20In%C3%A9s%20Agudo%20Juan.pdf>
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/2613/34487-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Instances where selected sources appear:

24

Ing. Darío Bolaños Guerrón, Ph.D.



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Diseño hidráulico del prototipo para retención de arsénico en aguas contaminadas por minería mediante Tecnosoles y nanopartículas”** fue realizado por el señor **Galarza Panimboza, Iván Patricio**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 4 de agosto del 2020

Bolaños Guerrón, Darío Roberto Ph.D

C.C: 1715206593



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA DE Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Galarza Panimboza, Iván Patricio**, con cédula de identidad N° 1804405932, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño hidráulico del prototipo para retención de arsénico en aguas contaminadas por minería mediante Tecnosoles y nanopartículas”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 4 de agosto del 2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Iván Patricio Galarza Panimboza', is written over a horizontal line.

Galarza Panimboza, Iván Patricio

C.C: 1804405932



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Galarza Panimboza, Iván Patricio**, con cédula de identidad N° 1804405932, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Diseño hidráulico del prototipo para retención de arsénico en aguas contaminadas por minería mediante Tecnosoles y nanopartículas”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 4 de agosto del 2020

Galarza Panimboza, Iván Patricio

C.C: 1804405932

Dedicatoria

A Dios por brindarme fuerza y sabiduría a lo largo de la carrera.

A mis padres y mi hermano por siempre ser un gran ejemplo y guía, por apoyarme y alentarme a cumplir todos mis objetivos.

A mi abuelita Guillermina quien fue una parte importante de mi vida y ahora me cuida desde el cielo.

Iván Galarza

Agradecimiento

A Dios por dame vida y salud, por todas sus bendiciones que me regala día a día y permitirme seguir mis sueños.

A mis padres y hermano por ser mi soporte para culminar con éxito la carrera y demostrarme su amor con sus acciones.

A mis amigos y compañeros que formaron parte de esta etapa, sobre todo a Michelle quien estuvo presente de principio a fin y me demostró el valor de una amistad incondicional.

A mi tutor Darío Bolaños por brindarme la oportunidad de ser parte de este proyecto, por compartir sus conocimientos y ofrecerme su guía a lo largo de este proceso.

A Luis Cumbal por permitirme utilizar su laboratorio.

A Erika Llumiquinga por su paciencia y ayuda invaluable en el laboratorio.

A Nelson Santander por su participación en la construcción del prototipo.

Iván Galarza

Índice

Carátula.....	1
Hoja de resultados de herramienta Urkund	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Índice.....	8
Índice de tablas.....	11
Índice de figuras.....	12
Resumen.....	14
Abstract	15
Capítulo I.....	16
Introducción.....	16
Planteamiento del Problema.....	16
<i>Formulación del Problema</i>	16
Antecedentes	16
Justificación.....	18
Objetivos.....	18
<i>Objetivo General</i>	18

	9
<i>Objetivos Específicos</i>	19
Fundamentación Conceptual	19
<i>Contaminación Minera en el Ecuador</i>	19
<i>Relaves Mineros</i>	20
<i>Metales Pesados</i>	20
<i>Arsénico</i>	21
<i>Efectos del Arsénico en la Salud</i>	21
<i>Técnicas de Tratamiento de Aguas Ácidas</i>	22
<i>Tratamiento Químico Activo de Drenajes Ácidos</i>	22
<i>Tratamiento por Métodos Pasivos de Drenajes Ácidos</i>	23
<i>Tecnologías para Remoción de Arsénico</i>	23
<i>Barreras Reactivas Permeables (PRB)</i>	24
<i>Barreras Reactivas de Hierro</i>	24
<i>Nanopartículas</i>	25
<i>Tecnosoles</i>	25
<i>Ejemplos de Aplicación de Tecnosoles</i>	26
<i>Modelo a Escala</i>	28
Hipótesis.....	28
Capítulo II.....	29
Materiales y métodos.....	29
Modalidad de la investigación.....	29

	10
Toma de muestras	29
Técnicas de análisis de datos.....	32
Síntesis de nanopartículas <i>multicomponente (Fe/FeS)</i>	33
Prototipo	34
Experimentación en prototipo	38
Cálculos hidráulicos	40
Técnicas de comprobación de hipótesis	43
Capítulo III.....	44
Resultados y discusión	44
Análisis y discusión de los resultados	44
<i>Caracterización de suelo</i>	44
<i>Caracterización de relave</i>	48
<i>Caracterización de nanopartículas</i>	50
<i>Construcción del sistema de tratamiento (prototipo)</i>	52
<i>Experimentación en el prototipo</i>	56
Capítulo IV	79
Conclusiones y recomendaciones.....	79
Conclusiones.....	79
Recomendaciones	80
Referencias bibliográficas.....	81
Anexos	85

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Coordenadas de puntos de muestreo</i>	29
Tabla 2 <i>Descripción de parámetros hidráulicos para experimentación</i>	38
Tabla 3 <i>Descripción de barreras para experimentación</i>	39
Tabla 4 <i>Granulometría</i>	44
Tabla 5 <i>Resumen caracterización de suelos</i>	45
Tabla 6 <i>Resumen caracterización de relave minero</i>	48
Tabla 7 <i>Resultados obtenidos mediante EDS</i>	52
Tabla 8 <i>Tiempos promedio en casos P1-P6</i>	58
Tabla 9 <i>Cálculos hidráulicos en casos P1-P6</i>	61
Tabla 10 <i>Lecturas de concentración de As con opciones P1 y P2</i>	63
Tabla 11 <i>Tiempos promedio en casos P7-P10</i>	66
Tabla 12 <i>Cálculos hidráulicos en casos P7 y P9</i>	68
Tabla 13 <i>Cálculos hidráulicos en casos P8 y P10</i>	70
Tabla 14 <i>Lecturas de concentración de As con opciones P7 y P9</i>	73
Tabla 15 <i>Lecturas de concentración de As con opciones P8 y P10</i>	75

Índice de figuras

Figura 1 Tipos de Tecnosol en la corta de Bama a 2004	26
Figura 2 Ubicación de Tecnosol en canal	27
Figura 3 Localización de muestreo.....	30
Figura 4 Muestreo de suelo en punto S1	31
Figura 5 Piscina de relave en planta de beneficio “Santa Mónica”	31
Figura 6 Descripción del proceso de síntesis de nanopartículas.	33
Figura 7 Síntesis de nanopartículas en laboratorio.....	33
Figura 8 Esquema de construcción del prototipo	35
Figura 9 Esquema de ubicación de paneles metálicos.....	36
Figura 10 Ubicación de zona de construcción del prototipo	37
Figura 11 Flujo bajo una compuerta plana.....	40
Figura 12 Concentración de metales en muestras de suelo.....	47
Figura 13 Concentración de Fe en muestras de suelo	47
Figura 14 Concentración de metales en muestras de relave (Cd, Cr, Pb, As, Ni)	49
Figura 15 Concentración de metales en muestras de relave (Cu, Zn, Fe).....	50
Figura 16 Difracción de rayos X de las nanopartículas	51
Figura 17 Nanopartículas analizadas en SEM.....	52
Figura 18 Excavación para implantación del prototipo	53
Figura 19 Fundición del prototipo	54
Figura 20 Anclaje de partes metálicas del prototipo	54
Figura 21 Prototipo finalizado la construcción.....	55
Figura 22 Marco metálico para sostener barreras	55
Figura 23 Funda de geotextil	56

Figura 24 Prototipo con las barreras ubicadas.....	57
Figura 25 Flujo de agua en el prototipo.....	57
Figura 26 Variación de tirantes en el tiempo para el caso P1	58
Figura 27 Variación de tirantes en el tiempo para el caso P2	59
Figura 28 Variación de tirantes en el tiempo para el caso P3	59
Figura 29 Variación de tirantes en el tiempo para el caso P4	60
Figura 30 Variación de tirantes en el tiempo para el caso P5	60
Figura 31 Variación de tirantes en el tiempo para el caso P6	61
Figura 32 Lecturas de muestras de As en laboratorio	63
Figura 33 Variación de retención total de As en casos P1 y P2.....	64
Figura 34 Restricción de flujo en compuerta de salida	65
Figura 35 Variación de tirantes en el tiempo para el caso P7	66
Figura 36 Variación de tirantes en el tiempo para el caso P8	67
Figura 37 Variación de tirantes en el tiempo para el caso P9	67
Figura 38 Variación de tirantes en el tiempo para el caso P10	68
Figura 39 Mezcla de suelo y nanopartículas.....	72
Figura 40 Tecnosol dentro de bolsa de geotextil	72
Figura 41 Variación de retención total de As en casos P7 y P9.....	76
Figura 42 Variación de retención total de As en casos P8 y P10.....	76

Resumen

En el presente estudio se realiza el diseño hidráulico y construcción del prototipo para retención de arsénico, en aguas contaminadas por minería, por medio del uso de Tecnosoles mezclados con nanopartículas. En base a la información obtenida en las fases de laboratorio, en las cuales se estudió el comportamiento en columnas y se obtuvieron las mejores dosificaciones del Tecnosol, se lleva a cabo la experimentación mediante el dimensionamiento y construcción de un modelo a escala donde se evalúa el funcionamiento del tratamiento aplicado en un canal de hormigón con barreras reactivas. Se probaron variaciones de volumen de agua, separación de barreras, y apertura de compuertas, con la finalidad de evaluar el comportamiento del sistema propuesto y obtener el tiempo de retención hidráulico óptimo. Esto fue contrastado con el nivel de retención de arsénico que se propone en un mínimo del 70%. El suelo utilizado posee un elevado nivel de Fe que le confiere capacidad de adsorción de contaminantes y se comparó con el aporte de las nanopartículas multicomponente Fe/FeS que se utilizaron en el Tecnosol con una proporción de 97% suelo + 3% NPs. El mejor tratamiento alcanzó el 70,5% de remoción de As en 10 ciclos con volumen de 44 L, un caudal máximo de ingreso de $0,73 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, caudal de salida de $0,22 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, velocidad de $0,10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y tiempo de retención hidráulico de 3,4 minutos por ciclo.

Palabras clave:

- **PROTOTIPO PARA RETENCIÓN DE ARSÉNICO**
- **DISEÑO DE UN CANAL CON BARRERAS REACTIVAS**
- **TECNOsoles**
- **NANOPARTÍCULAS**

Abstract

In the present study, the hydraulic design and construction of the prototype for the retention of arsenic in waters contaminated by mining is carried out with the use of Technosols mixed with nanoparticles. Based on the information obtained in the laboratory phases, in which the behavior in columns was studied and the best dosages of the Technosol were obtained, experimentation is carried out by dimensioning and building a scale model where performance of the treatment is evaluated in a concrete channel with reactive barriers. Variations in water volume, barrier separation, and gate opening were tested to evaluate the behavior of the proposed system and obtain the optimal hydraulic retention time. This was contrasted with the proposed arsenic retention level of a minimum of 70%. The soil used has a high level of Fe, which gives it the ability to adsorb contaminants and was compared with the contribution of the Fe/FeS multicomponent nanoparticles that were used in Technosol with a proportion of 97% soil + 3% NPs. The best treatment achieved 70.5% of removal in 10 cycles with volume of 44 L, maximum input flow rate of $0.73 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, output flow rate of $0.22 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, speed of $0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and hydraulic retention time of 3.4 min per cycle.

Keywords:

- **ARSENIC RETENTION**
- **PROTOTYPE**
- **HYDRAULIC DESIGN**
- **TECHNOSOLS**
- **NANOPARTÍCLES**

Capítulo I

Introducción

Planteamiento del Problema

Formulación del Problema

Como parte del proyecto “Empleo de Tecnosoles, elaborados con residuos no peligrosos, en combinación con nanopartículas para recuperar suelos y aguas contaminados por actividades de explotación minera”, ejecutado por parte del Centro de Nanociencia y Nanotecnología (CENCINAT), en fases previas se ha estudiado el comportamiento de los Tecnosoles mezclados con nanopartículas únicamente a nivel de laboratorio. Para dar el salto a la aplicación en campo es necesario analizar el comportamiento hidráulico del tratamiento de retención de arsénico a través de un prototipo con sistema de barreras reactivas que se pretende diseñar, construir y afinar para su futura aplicación en zonas mineras.

Antecedentes

La propuesta para el sistema de retención de metales pesados nace del proyecto titulado “Empleo de Tecnosoles, elaborados con residuos no peligrosos, en combinación con nanopartículas para recuperar suelos y aguas contaminados por actividades de explotación minera” que se encuentra en desarrollo por el CENCINAT, bajo la dirección del Ing. Luis Cumbal, Ph.D y el Ing. Darío Bolaños, Ph.D. El objetivo final de la investigación es desarrollar un tratamiento para agua de relave minero que se implementará en el cantón Portovelo, provincia El Oro. Para llevar a cabo este estudio se

han ejecutado varias tesis en la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" en las carreras de Ingeniería en Biotecnología e Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente.

López (2017), realizó la biosíntesis de nanopartículas multicomponente a base de extracto de cáscara de naranja (*Citrus cinensis*). Se probaron diferentes dosis de extracto y condiciones de pH, encontrando el mejor tratamiento con una concentración de 100 µL de extracto de cáscara de naranja y pH 9. Se comprobó la capacidad de las nanopartículas para inmovilizar metales pesados con una eficiencia mayor al 80%, llegando incluso al 99% en el caso del arsénico. Posteriormente, Paz (2018) ejecutó el diseño y elaboración del Tecnosol mezclado con nanopartículas, para lo cual se utilizó una arcilla limosa extraída de la zona minera estudiada. Evaluando el comportamiento del tratamiento propuesto se observó una rápida remoción de los metales dentro de los primeros cinco minutos, además con la mejor dosificación (99.75% suelo + 0.25% nanopartículas) se obtuvieron porcentajes de inmovilización superiores al 90%.

Bolaños-Guerrón et al. (2018) analizaron específicamente la retención del arsénico con el uso de los Tecnosoles preparados con suelo férrico y nanopartículas. Por medio del software Vensim desarrollaron un modelo capaz de escalar y predecir el comportamiento del adsorbente. Los resultados permiten entender el proceso de adsorción y saturación del sistema, aspecto de gran importancia para la correcta aplicación en campo. Finalmente Capa (2019), evaluó el proceso de retención de metales pesados en un prototipo de columnas a escala de laboratorio. Se determinó que el mejor tratamiento es con 3% nanopartículas + 97% suelo, llegando al 70% de remoción medio sin distinguir proceso de desorción.

Justificación

“En Ecuador, el incremento de la minería artesanal e ilegal, ha provocado un aumento de la contaminación por metales pesados en la provincia de El Oro, siendo causante de graves daños en los sectores cercanos a ríos o efluentes” (Oviedo et al., 2017).

Como respuesta a los problemas de contaminación se desarrolla el proyecto que plantea el uso de Tecnosol en conjunto con nanopartículas para recuperar suelo y agua afectado por la actividad minera. Se ha llegado a una etapa donde se requiere el diseño hidráulico del sistema de tratamiento para su puesta a punto, previo a la aplicación a gran escala en campo. Por lo cual es fundamental evaluar el comportamiento de retención de arsénico por medio de un modelo a escala que permita obtener los parámetros hidráulicos óptimos.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar los parámetros hidráulicos del prototipo para retención de arsénico en aguas contaminadas por minería mediante el uso de Tecnosoles y nanopartículas, con la finalidad de obtener la información necesaria para pasar de prototipo a campo, a través del dimensionamiento y construcción del sistema de tratamiento a escala, dentro del campus Sangolquí de la Universidad de las Fuerza Armadas ESPE.

Objetivos Específicos

Analizar la información de síntesis de nanopartículas, dosificaciones para elaboración de Tecnosoles, comportamiento de retención de metales pesados a escala de laboratorio y estructuras hidráulicas para tratamiento de agua, mediante revisión bibliográfica.

Dimensionar y construir el prototipo para retención de arsénico en aguas contaminadas por minería, a través de la excavación de un canal con impermeabilización en el cual se adaptarán las barreras compuestas de Tecnosol y nanopartículas, con la finalidad de obtener la información necesaria del comportamiento del sistema de tratamiento de aguas propuesto.

Evaluar el porcentaje de retención de arsénico en el prototipo, comparando sus concentraciones antes y después de las barreras, para poner a punto el sistema de tratamiento previo a su aplicación a gran escala.

Fundamentación Conceptual

Contaminación Minera en el Ecuador

De acuerdo a Oviedo et al. (2017), “la minería artesanal se consolida en la parte más alta de la cuenca del río Puyango (Zaruma y Portovelo)”. Los metales se extraen en una primera etapa en bruto directamente de las minas y luego son procesados en plantas de beneficio a orillas de río. En estos sitios se lleva a cabo el enriquecimiento del mineral desde su paso por molinos hasta ser lixiviado, donde se utiliza el cianuro (CN-) en el proceso de extracción. Los desechos resultantes llenos de metales pesados son vertidos a los ríos ocasionando graves impactos ambientales.

“Los principales problemas de acidificación en la provincia de El Oro, se dan en los ríos y en las aguas subterráneas, debido a: los drenajes de cunetas, corredores subterráneos, relaves, escorias, disolución oxidativa y lixiviación de sulfuros metálicos. Las descargas de los contaminantes resultantes de la actividad minera afectan negativamente a toda forma de vida” (Oviedo et al., 2017).

Relaves Mineros

Según López et al. (2003) “del total de mineral extraído en una mina metálica, sólo el 2% corresponde al metal deseado. El resto es descartado como diferentes desechos: 50% estéril, 44% relaves y 4% escorias”. Los relaves son material residual producto del tratamiento de los minerales, se encuentran constituidos por una suspensión en agua de fragmentos de roca previamente molida. El depósito de relaves conlleva un riesgo hidrológico que puede provocar arrastre de desechos debido a lluvias, crecidas de ríos y avalanchas, acidificación de las aguas, solubilización de metales y contaminación de fuentes subterráneas.

Metales Pesados

Galán & Romero (2008) manifiestan lo siguiente:

La tabla periódica incluye unos 70 elementos metálicos, y de ellos 59 pueden ser considerados “metales pesados”, que son aquellos con peso atómico mayor que el del hierro (55,85 g/mol). Con esta precisión se excluirían metales con pesos atómicos menores que el del Fe y que con frecuencia pueden ser metales contaminantes, como el V (50,95), Mn (54,44), Cr (52,01) y a otros que realmente no son metales como As, F y P. Por ello, resulta mejor hablar de contaminación

por “elementos traza”, si bien hay que reconocer que la mayoría de los contaminantes inorgánicos son “metales pesados”.

Arsénico

De acuerdo a Holl & Litter (2010) “el arsénico (As, número atómico 33, peso atómico 74,922) puede estar presente en distintos estados de oxidación (–III, 0, III, V) y en formas inorgánicas y orgánicas, en un amplio rango de concentraciones en aire, agua, suelos, vegetales y animales”. Francisca & Carro (2014) expusieron que “los niveles de As en el ambiente son variables, ya que es un elemento con muy alta movilidad y capacidad de transformación. Es un elemento natural, presente en la corteza terrestre que puede aparecer en el agua a través de procesos de meteorización química o por disolución de minerales. También puede estar presente por contaminación antrópica debido a actividades como la minería o el uso de plaguicidas”.

Efectos del Arsénico en la Salud

López et al. (2003) explican que:

Los efectos más relevantes son el cáncer pulmonar y el cáncer a la piel por ingestión. El cáncer pulmonar generalmente es una enfermedad ocupacional para trabajadores de fundiciones y en plantas de insecticidas. Las poblaciones cercanas a dichas industrias también pueden registrar índices elevados de contaminación por arsénico. Daños crónicos de menor riesgo son lesiones a la piel y alteraciones cardiovasculares. Formas de intoxicación aguda puede provocar alteraciones gastrointestinales graves con vómitos y diarreas.

Técnicas de Tratamiento de Aguas Ácidas

Zonas afectadas por las actividades mineras abundan a nivel mundial incluso en los países más desarrollados y con alta conciencia ambiental. Debido al elevado número de minas, escombreras y zonas aledañas afectadas, las operaciones de remediación constituyen inmensos esfuerzos que frecuentemente exceden las posibilidades económicas de los responsables (Ruiz-Oriol, 2004).

Aduvire (2006) afirma que:

Generalmente los procesos de tratamientos de drenajes ácidos se basan en la eliminación y el aislamiento de metales y aniones metálicos de las aguas. Algunos de ellos incluyen las técnicas de precipitación que suelen ser bastante efectivas para conseguir la calidad deseada de los efluentes. Otras técnicas son las de oxidación clásica, ozonización y oxidación bacteriana, aunque previamente a realizar cualquier tipo de tratamiento es siempre recomendable determinar cuáles son los metales y su estado químico en los efluentes.

Tratamiento Químico Activo de Drenajes Ácidos

“Se basan en la adición de sustancias alcalinas, generalmente cal, cal hidratada, caliza triturada, sosa cáustica, carbonato sódico o amoníaco, con el fin de conseguir la neutralización del ácido y alcanzar las condiciones adecuadas para la precipitación de los metales pesados. Dependiendo de la clase de metales y su concentración en las aguas ácidas se elegirá el método de tratamiento químico más apropiado” (Aduvire, 2006).

Tratamiento por Métodos Pasivos de Drenajes Ácidos

“La filosofía general de los tratamientos pasivos se basa en procesos físicos, químicos y biológicos que ayudan a cambiar las condiciones de Eh y pH de las aguas ácidas de mina, de forma que se favorezca la formación de especies insolubles que precipiten como oxihidróxidos metálicos. Por lo general, en estos sistemas, se recurre al empleo de bacterias para catalizar las reacciones y acelerar los procesos que forman precipitados, así como al uso de material alcalino para neutralizar la acidez” (Aduvire, 2006).

Tecnologías para Remoción de Arsénico

“Existen varios métodos disponibles para la remoción de arsénico del agua en grandes plantas de tratamiento convencionales. Las tecnologías más usadas incluyen oxidación, coprecipitación y adsorción en flóculos coagulados, tratamiento con carbonato de calcio, adsorción en distintos medios, resinas de intercambio iónico y tecnologías de membrana” (Holl & Litter, 2010).

El aspecto económico es fundamental en la elección del sistema de tratamiento, los métodos convencionales resultan costosos por lo que a menudo no son viables en zonas de bajos recursos. Se han desarrollado tecnologías orientadas a minimizar la inversión y facilitar su implementación, operación y mantenimiento. “Entre ellas, se ha postulado el uso de barreras permeables reactivas y zonas reactivas como tecnologías muy eficientes para la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Materiales conteniendo óxidos de hierro pueden usarse como barreras reactivas pasivas” (Holl & Litter, 2010).

Barreras Reactivas Permeables (PRB)

De acuerdo a Aduvire (2006):

Cuando las aguas ácidas de mina se manifiestan como un flujo subterráneo, el dispositivo de tratamiento se configura como una pantalla permeable y reactiva dispuesta perpendicularmente a la dirección del flujo. Como cualquier otro tratamiento pasivo su objetivo es reducir la cantidad de sólidos disueltos (sulfatos y metales principalmente) e incrementar el pH. Su construcción consiste en hacer una zanja transversal al flujo, la cual se rellena con diversos tipos de materiales reactivos (caliza, materia orgánica, limaduras de Fe, etc.). Así, los procesos depuradores en el interior de la barrera son la reducción bacteriana de los sulfatos, la retención de los metales precipitando como sulfuros, y el incremento del pH principalmente por disolución de la caliza.

Barreras Reactivas de Hierro

“El Fe (0) es eficiente en la remoción de As (III) y As (V) siendo el mecanismo principal la precipitación en la superficie y la adsorción. Otra ventaja del hierro elemental es el hecho de ser barato y no tóxico” (Cortina et al., 2010).

Cortina et al. (2010) explican la reacción:

Cuando el hierro es oxidado, se produce en la superficie FeOOH, que tiene la capacidad de adsorber metales y metaloides como el arsénico. El Fe (0) es un reductor muy eficaz, y puede remover tanto As inorgánico como orgánico. El Fe elemental es especialmente eficiente en la remoción de As a pH bajos y en aguas con concentraciones elevadas de sulfuros. A pesar de que la capacidad de

reducción del Fe elemental disminuye significativamente a pH neutro, las especies hidroxiladas formadas en la superficie del Fe (0) son sitios efectivos de adsorción de As (III) y As (V) a pH neutros y básicos.

Nanopartículas

“Son diversos los desarrollos actuales de la nanotecnología, sin embargo las nanopartículas (NPs) son las más conocidas y estudiadas. Las NPs son estructuras con tamaños inferiores a 100 nanómetros (es decir $1 \cdot 10^{-7}$ metros), que pueden ser sintetizadas a partir de diferentes materiales, incluyendo metales. Para observarlas se requieren microscopios de alta resolución, como son el electrónico de barrido (SEM) o el electrónico de transmisión (TEM)” (Gómez, 2018).

“Debido a su reducido tamaño de partícula y elevada reactividad, las nanopartículas metálicas pueden ser útiles en una gran variedad de aplicaciones medioambientales como el tratamiento del suelo y de sedimentos y la descontaminación de agua subterránea” (Cortina et al., 2010).

Tecnosoles

De acuerdo a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (2007) define a los Tecnosol como: “Suelos dominados o fuertemente influenciados por material hecho por el hombre; del griego *technikos*, hábilmente hecho”. Contienen una cantidad significativa de artefactos (algo en el suelo reconociblemente hecho o extraído de la tierra por el hombre), o están sellados por roca dura técnica (material duro creado por el hombre, que tiene propiedades diferentes a la roca natural). Incluyen suelos de desechos (rellenos, lodos, escorias, escombros o desechos de minería y cenizas), pavimentos con sus

materiales subyacentes no consolidados, suelos con geomembranas y suelos contruidos en materiales hechos por el hombre (IUSS, ISRIC, & FAO, 2007).

Ejemplos de Aplicación de Tecnosoles

Ubicada en España, la mina de Touro, un yacimiento de sulfuros metálicos cerrada en 1988, fue un lugar ideal para experimentar la remediación ambiental con Tecnosoles. Los materiales expuestos fueron afectados por oxidación generando aguas hiperácidas (pH<3.5). El plan de mejora de la calidad de sus aguas se fundamentó en el uso conjunto de Humedales y Tecnosoles con características específicas aplicados a uno de los frentes denominado Bama, como se observa en la figura 1. Este sistema de tratamiento demostró ser capaz de mejorar la calidad de las aguas ácidas recuperando su calidad para prácticamente todos los usos (Bolaños, 2014).

Figura 1

Tipos de Tecnosoles en la corta de Bama a 2004



Nota. Macías-García (2009)

Otra aplicación se llevó a cabo con el objetivo de tratar sistemas eutrofizados en la cuenca hidrográfica de Xinxo da Limia. Se usó un Tecnosol diseñado para la adsorción de fosfatos. Se colocó en bolsas permeables montadas en una estructura metálica de acero ubicada de manera que cubra la mayor área posible del cauce, como se observa en la figura 2. Tras los análisis de concentraciones de fosfatos antes y después de las barreras, se comprobó su capacidad de adsorción logrando reducir su concentración y mitigar los efectos de la eutrofización (Bolaños, 2014) .

Figura 2

Ubicación de Tecnosol en canal



Nota. Bolaños (2014)

Modelo a Escala

“Teniendo en cuenta que la realización de este tipo de proyectos a escala real requiere una gran inversión, la posibilidad de poder evaluar a escala piloto los materiales como los parámetros hidrodinámicos y los tiempos de vida útil, favorecerán la posterior puesta en marcha a escala real” (Ruiz-Oriol, 2004).

Hipótesis

Los parámetros hidráulicos del prototipo permiten alcanzar el 70% de retención de arsénico, definiendo el tiempo de retención hidráulica óptimo.

Capítulo II

Materiales y métodos

Modalidad de la investigación

Para el presente proyecto de investigación se utiliza un enfoque cuantitativo dado que las variables a estudiar, correspondientes a pendiente, velocidad, tiempo de retención hidráulico, caudal y porcentaje de retención de arsénico, son susceptibles a mediciones y análisis estadísticos. Las condiciones del estudio llevan a considerar un tipo de investigación aplicada descriptiva que pretende analizar el comportamiento hidráulico del tratamiento de retención de arsénico aplicado en un prototipo.

Toma de muestras

La toma de muestras se realizó en la provincia de El Oro, entre los cantones Zaruma, Portovelo y Piñas (figura 3). Se tomaron muestras de suelo en dos ubicaciones y de relave minero proveniente de una planta de beneficio. En la tabla 1 se muestran las coordenadas de los puntos de muestreo.

Tabla 1

Coordenadas de puntos de muestreo

Punto	Norte (m)	Este (m)	Zona	Descripción
S1	652014,2	9585786,9	17 S	Punto de muestreo de suelo 1 a filo de vía
S2	644004,8	9594122,1	17 S	Punto de muestreo de suelo 2 a filo de vía
A1	651589,9	9590732,3	17 S	Punto de muestreo de agua en planta de beneficio "Santa Mónica"

Figura 3

Localización de muestreo

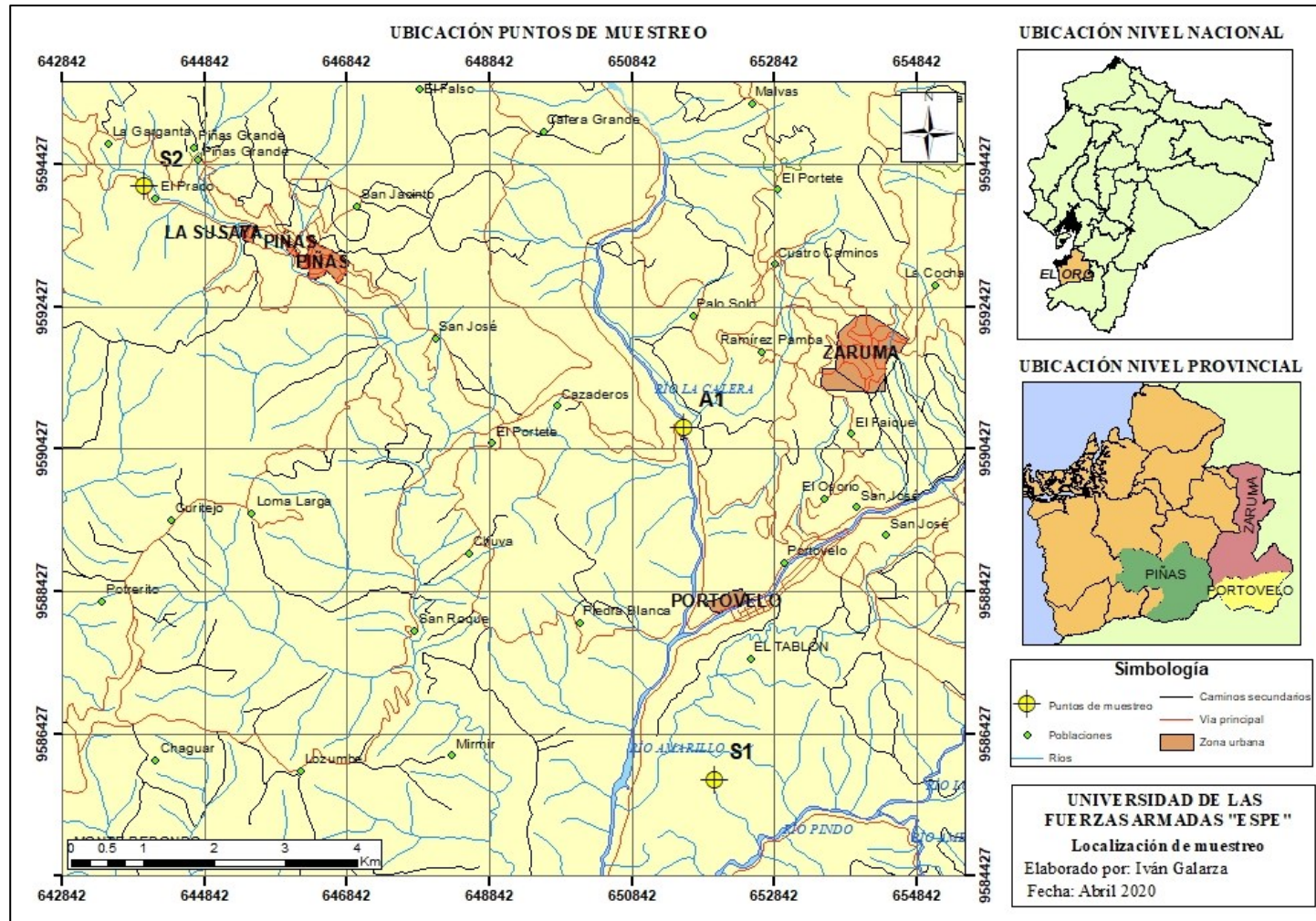


Figura 4

Toma de muestras de suelo en punto S1

**Figura 5**

Piscina de relave en planta de beneficio "Santa Mónica"



Técnicas de análisis de datos

- **Granulometría.-** Ensayo para determinar la granulometría por tamizado usando la norma ASTM D 422.
- **Límite plástico.-** Ensayo para determinar el límite plástico y el índice de plasticidad usando la norma NTE INEN 0692 (ASTM D 4318).
- **Límite líquido.-** Ensayo para determinar el límite líquido usando la norma NTE INEN 0691 (ASTM D 4318).
- **pH.-** Determinado con potenciómetro.
- **Capacidad de intercambio catiónico.-** Determinado usando el método de extracción con acetato de amonio.
- **Concentración de materia orgánica.-** Determinado por el método de calcinación usando la norma del Instituto de Normalización Holandés (NEN, por sus siglas en neerlandés) 5754.
- **Concentración de metales pesados.-** Analizado mediante espectroscopía de absorción atómica (EAA). Para la lectura de Cu, Pb, Cd, Ni, Cr, Ni, Zn y Fe se empleó el método EAA con llama 3111-B, mientras que para As se utilizó EAA con generación de hidruros FIAS (Flow Injection for Atomic Spectroscopy System) 3114-C, establecidos en el Standard Methods.
- **Caracterización de nanopartículas.-** Las técnicas de difracción de rayos X y espectroscopia de energía dispersiva (EDS, por sus siglas en inglés) fueron utilizadas para determinar las propiedades químicas. En cuanto a la morfología y tamaño de las nanopartículas fue determinado por el microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés).

Síntesis de nanopartículas *multicomponente* (Fe/FeS)

Con la necesidad de producir nanomateriales a mayor escala y que a la vez mantengan su tamaño nanométrico y propiedades químicas, se unificaron dos protocolos para su elaboración. Los protocolos usados fueron los establecidos por Stael & Cumbal (2016) y How & Wan (2015) El proceso se resume en la figura 6.

Figura 6

Descripción del proceso de síntesis de nanopartículas.

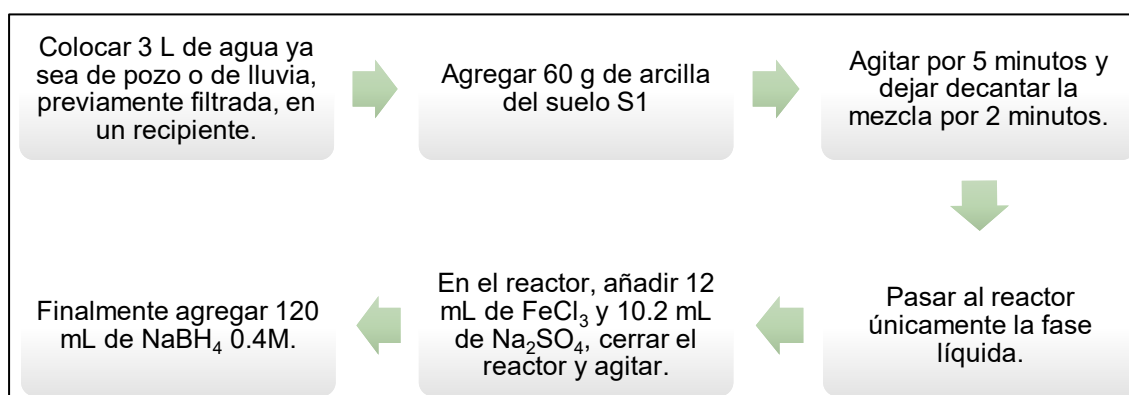


Figura 7

Síntesis de nanopartículas en laboratorio



Prototipo

El prototipo está conformado por una estructura de hormigón que consta de dos tanques cuadrados conectados a través de un canal rectangular en el cual se desarrolla el tratamiento de agua, como se observa en la figura 8. El sistema consiste en una adaptación de barreras reactivas colocadas de manera alternada con la aplicación de Tecnosol y nanopartículas. Dicho material es colocado en bolsas elaboradas con geotextil y amarradas con bridas plásticas a soportes formados por un marco de tubo cuadrado metálico y una malla electrosoldada. Para ubicar los soportes en las ubicaciones deseadas se utilizaron secciones de ángulos soldados en platinas ancladas a las paredes y el piso, que cumplen la función de rieles. Para controlar el caudal se utilizan compuertas metálicas deslizables. Además toda la superficie de hormigón fue tratada con un impermeabilizante tipo pintura. Las especificaciones técnicas, presupuesto y planos se incluyen en los anexos.

El prototipo fue dimensionado en base a la restricción del presupuesto y se inició considerando el tamaño del tanque inicial de 0,8 x 0,8 x 0,7 m con una capacidad máxima de 416 L, dejando 5 cm libres. El tanque final es de 0,8 x 0,8 x 1,0 m. El canal donde se ubican las barreras es de 3 m de largo con ancho de 0,8 m, tirante de 0,4 m y pendiente del 2%. El canal central y los tanques están conectados por canaletas de 0,5 m de largo y 0,2 cm de ancho.

El espacio previsto para implantar el prototipo se encuentra dentro de la Universidad de las Fuerza Armadas "ESPE", en el área verde contigua a la planta de tratamiento de la institución, a la cual se conectará el desagüe del prototipo.

Figura 9

Esquema de ubicación de paneles metálicos

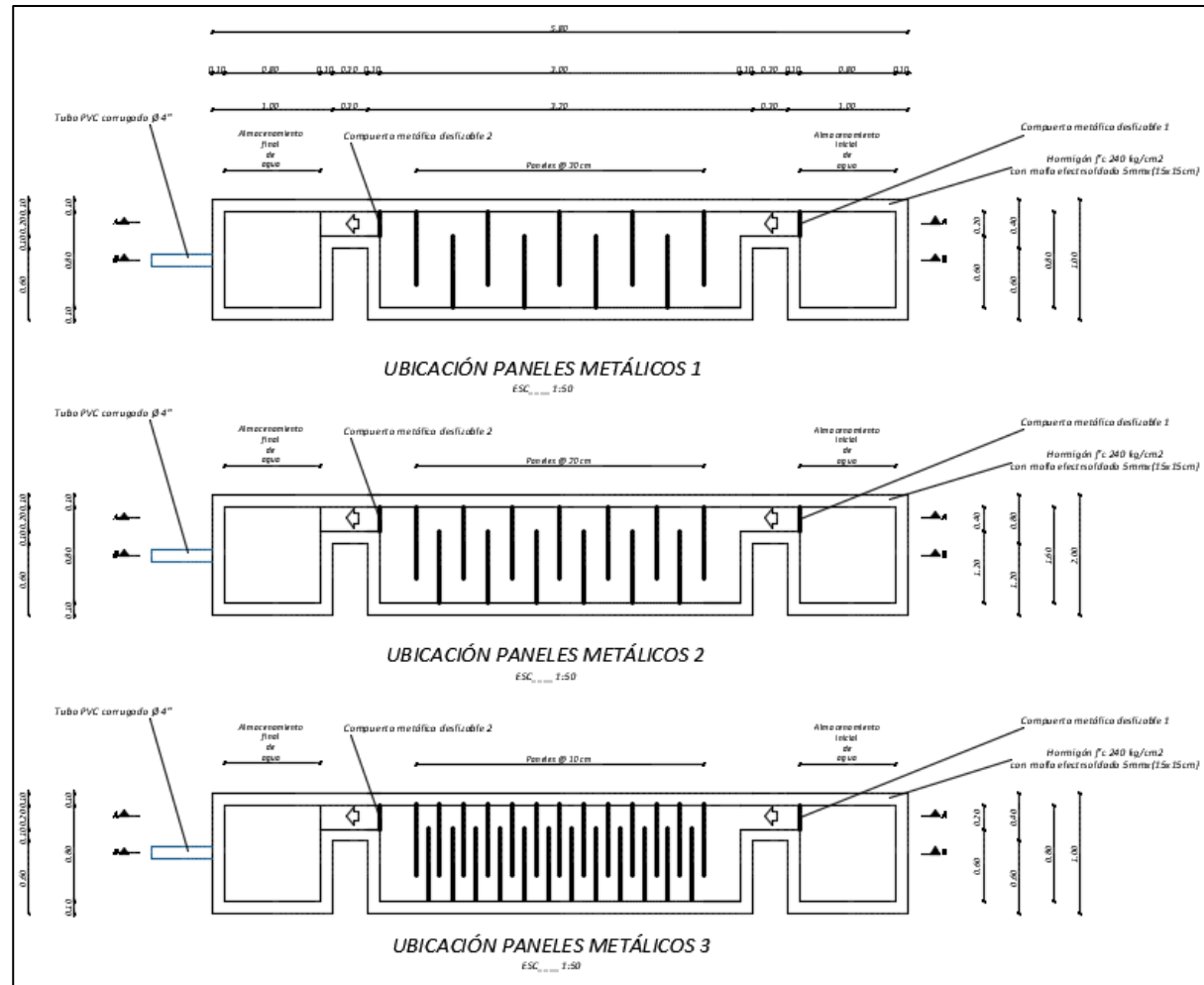
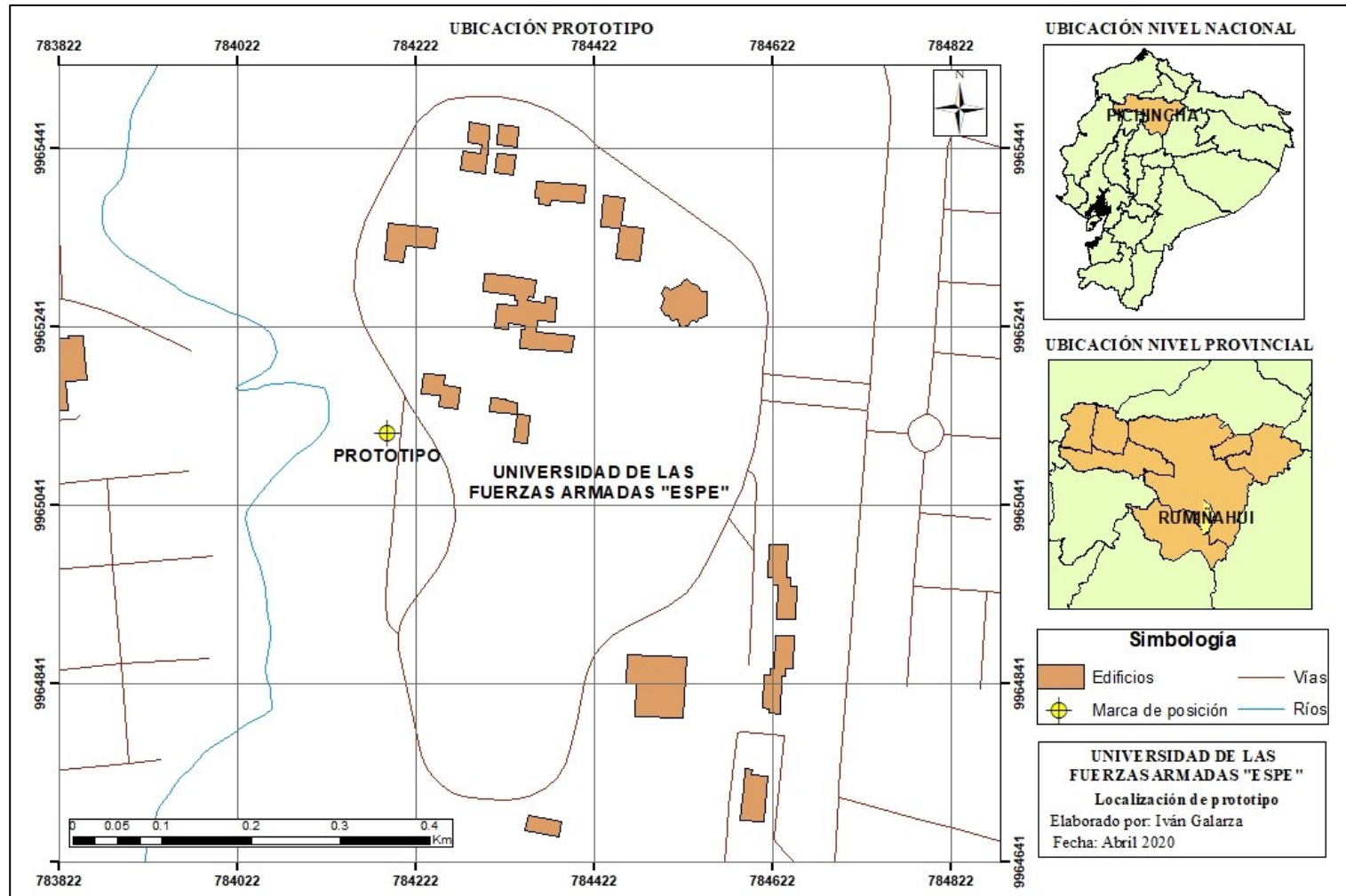


Figura 10

Ubicación de zona de construcción del prototipo



Experimentación en prototipo

Las ensayos consisten en colocar las barreras con la separación deseada, llenar el tanque inicial con un volumen establecido de agua, abrir la compuerta y registrar los tiempos y medidas necesarios para los cálculos hidráulicos hasta finalizar el flujo. Con el fin de evitar el desperdicio de agua se utiliza una bomba para recirculación al final de cada ciclo. Inicialmente se usa líquido de la red de la ESPE y barreras con 100 % suelo para analizar el comportamiento hidráulico del sistema con el objetivo de elegir la mejor opción para avanzar con las pruebas en las que se evaluará las concentraciones de As antes y después del tratamiento usando las muestras de relave. En las tablas 2 y 3 se muestra la matriz de experimentación, con los parámetros previstos para cada prueba.

Tabla 2

Matriz de experimentación

Código	Volumen tanque inicial (L)	Separación barreras (cm)	Ancho útil de canales entre barreras	Abertura compuerta inicial (cm)	Abertura compuerta final (cm)
P1	100	10	5	1	Total
P2	200	10	5	1	Total
P3	100	20	15	1	Total
P4	200	20	15	1	Total
P5	100	30	25	1	Total
P6	200	30	25	1	Total
P7	100	10	5	0,5	0,5 después de 1 hora de estancamiento
P8	100	10	5	1	0,5
P9	44	10	5	0,5	0,2 después de 1 hora de estancamiento
P10	44	10	5	0,5	0,2

Tabla 3

Descripción de barreras para experimentación

Código	N° barreras	Dosificación de barreras	Peso suelo (Kg)	Peso nanopartículas (Kg)	Distribución de material en barreras
P1	25	100% suelo	75	0	Dividido en partes iguales en todas las barreras
P2	25	100% suelo	75	0	Dividido en partes iguales en todas las barreras
P3	13	100% suelo	39	0	Dividido en partes iguales en todas las barreras
P4	13	100% suelo	39	0	Dividido en partes iguales en todas las barreras
P5	9	100% suelo	27	0	Dividido en partes iguales en todas las barreras
P6	9	100% suelo	27	0	Dividido en partes iguales en todas las barreras
P7	25	100% suelo	60	0	Dividido 50% entre 15 barreras iniciales y 50% entre 10 barreras finales
P8	25	100% suelo	60	0	Dividido 50% entre 15 barreras iniciales y 50% entre 10 barreras finales
P9.1	25	100% suelo	13,33	0	Dividido en partes iguales en todas las barreras
P10.1	25	100% suelo	13,33	0	Dividido en partes iguales en todas las barreras

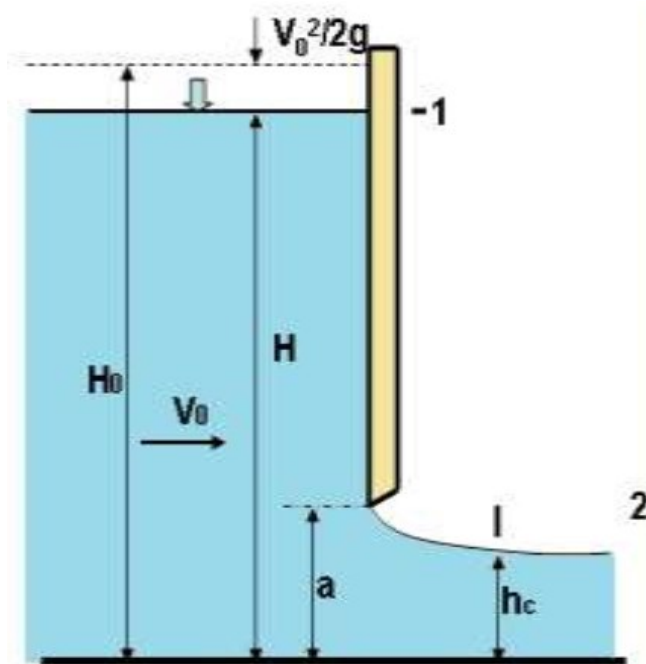
Código	N° barreras	Dosificación de barreras	Peso suelo (Kg)	Peso nanopartículas (Kg)	Distribución de material en barreras
P9.2	25	97% suelo + 3% nanopartículas	12,93	0,40	Dividido en partes iguales en todas las barreras
P10.2	25	97% suelo + 3% nanopartículas	12,93	0,40	Dividido en partes iguales en todas las barreras

Cálculos hidráulicos

Para las pruebas se considera un volumen fijo de agua sin ingreso continuo, por lo cual los cálculos hidráulicos consideran las condiciones máximas. El caudal se obtiene analizando el flujo debajo de una compuerta.

Figura 11

Flujo bajo una compuerta plana



Nota. Sandoval (2013)

Se parte de la ecuación de Bernoulli para una sección anterior a la compuerta y la sección del tirante contraído, como se muestra en la figura 11.

$$H + \alpha \frac{v_o^2}{2g} = hc + \alpha \frac{v_c^2}{2g} + \Sigma \zeta \frac{v_c^2}{2g} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde;

$$2g(H_o - hc) = v_c^2(1 + \Sigma \zeta) \quad \text{Ecuación 2}$$

O,

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{1 + \Sigma \zeta}} \sqrt{2g(H_o - hc)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Además, $hc = \epsilon a$

$$v_c = C_v \sqrt{2g(H_o - \epsilon a)} \quad \text{Ecuación 4}$$

En la sección del orificio la velocidad media es:

$$v = \epsilon v_c = C_v \sqrt{2g(H_o - \epsilon a)} \quad \text{Ecuación 5}$$

Por lo tanto el caudal es:

$$Q = abv = ab \epsilon C_v \sqrt{2g(H_o - \epsilon a)} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

Q = caudal del flujo bajo la compuerta

a = apertura de la compuerta

b = ancho de la compuerta

ϵ = coeficiente de contracción

C_v = coeficiente de velocidad

H_o = carga total antes de la compuerta

“El coeficiente de contracción ϵ depende del grado de abertura a la compuerta y de la carga H . Para pequeñas aberturas el coeficiente de contracción es $\epsilon = 0,615$. El coeficiente de velocidad para compuertas planas en canales es $C_v = 0,96$ ” (Sandoval, 2013).

Para el recorrido a través de las barreras se realizaron consideraciones similares a las de un floculador de flujo horizontal. Se toma en cuenta la longitud total, ancho útil del canal, tirante máximo medido en las pruebas hidráulicas y caudal máximo para obtener la velocidad y tiempo de retención del sistema con fórmulas básicas de hidráulica.

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$A = b * h \quad \text{Ecuación 8}$$

$$Tr = \frac{L}{v} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

Q = caudal máximo obtenido con la ecuación 6

v = velocidad de flujo entre barreras

b = ancho útil de los canales entre barreras

h = tirante máximo medido en experimentación

L = Longitud total de recorrido entre barreras

T_r = tiempo de retención hidráulico

Técnicas de comprobación de hipótesis

La hipótesis se comprobará por medio de la comparación de los datos obtenidos en laboratorio a través de los ensayos de espectroscopía de absorción atómica para la concentración de As antes y después del tratamiento de agua y contrastados con los cálculos hidráulicos respectivos.

Capítulo III

Resultados y discusión

Análisis y discusión de los resultados

Caracterización de suelo

Los resultados obtenidos de los ensayos de granulometría se muestran en la tabla 4, mientras el resto de los parámetros de la caracterización físico-química del suelo se resumen en la tabla 5.

Tabla 4

Granulometría

Tamiz	Retenido (g)	Retenido acumulado (g)	% Retenido Acumulado	% Pasante
SUELO TIPO S1				
4	3,31	3,31	2,2	97,8
10	7,15	10,46	7,0	93,0
40	38,40	48,86	32,5	67,5
200	28,09	76,95	51,2	48,8
Pasante 200	73,31	150,26	100,0	0,0
SUELO TIPO S2				
4	1,11	1,11	0,4	99,6
10	11,89	13	4,2	95,8
40	74,98	87,98	28,7	71,3
200	103,45	191,43	62,5	37,5
Pasante 200	73,31	150,26	100,0	0,0

Tabla 5*Resumen caracterización de suelos*

	S1	S2
Materia Orgánica (MO)	1,68 %	2,64 %
pH	5,61	5,52
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	10,22 meq/100 g suelo	18,4 meq/100 g suelo
Límite líquido	37%	40%
Límite plástico	20%	30%
Índice de plasticidad	17%	10%
Granulometría	Grava	2,2 %
	Arena	49,0 %
	Finos	48,8 %
		95,5 %

La materia orgánica está compuesta por una amplia variedad de sustancias y su naturaleza específica está determinada por las plantas y los residuos animales que se descomponen en un sitio de forma continua (Lizcano et al., 2017). Los valores obtenidos de 1,68% y 2,64% reflejan un contenido bajo ($MO < 2\%$) para el suelo S1 y medio ($2\% < MO < 5\%$) para S2.

El pH mide el grado de acidez de un suelo, es decir, la concentración de hidrogeniones (H^+) que existen en el suelo (Garrido, 1994). Es un indicador de la disponibilidad de nutrientes esenciales y la toxicidad de otros elementos puede ser estimada debido a su relación conocida con el pH (Lizcano et al., 2017). Ambos suelos se consideran ácidos al ser menores a 7.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) refleja la suma total de los cationes intercambiables de un suelo, cuanto mayor es la CIC mayor es la cantidad de cationes que este puede retener. Depende sobre todo de la cantidad y el tipo de arcillas y del contenido de materia orgánica presentes en el suelo (Lizcano et al., 2017). Los resultados de 10,22 y 18,4 meq/100g suelo son congruentes con el contenido de materia orgánica y se clasifican como bajos al estar entre 10 - 20 meq/100 g suelo.

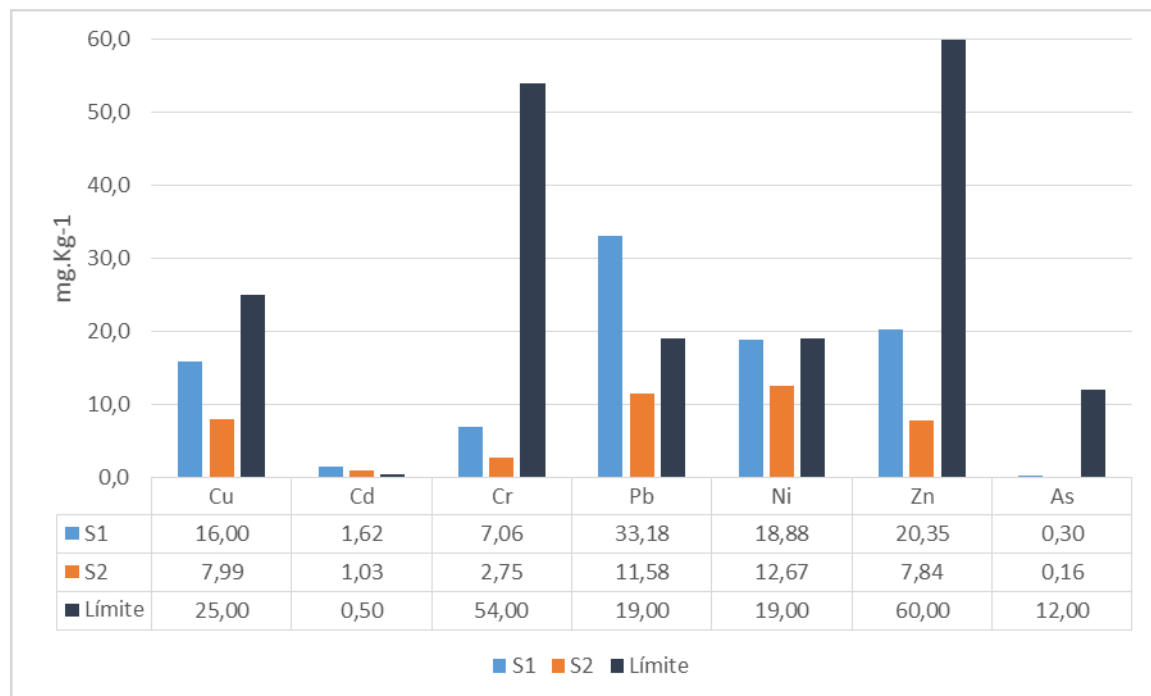
El tipo de textura del suelo tiene bastante relación con las propiedades hídricas. Los suelos más arenosos son muy permeables, los más arcillosos poseen mayor capacidad de retención de agua y los más limosos son más impermeables, pero dependiendo del grado y tipo de estructura las características hídricas pueden variar (Garrido, 1994). Para el suelo S1 se obtuvo un pasante al tamiz 200 menor al 50%, límite líquido de 37%, límite plástico de 20% y un índice plástico de 17 %, mediante el criterio del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) el tipo de suelo es SC (Arena arcillosa). En el caso del suelo S2 se obtuvo un pasante al tamiz 200 mayor al 50%, límite líquido de 40%, límite plástico de 30% y un índice plástico de 10 %, mediante la clasificación SUCS el tipo de suelo es CL (Arcilla ligera).

En las figuras 12 y 13 se muestran las concentraciones de metales obtenidas de los ensayos en el espectrofotómetro de absorción atómica y los límites establecidos en el Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA) respecto a criterios de calidad de suelo.

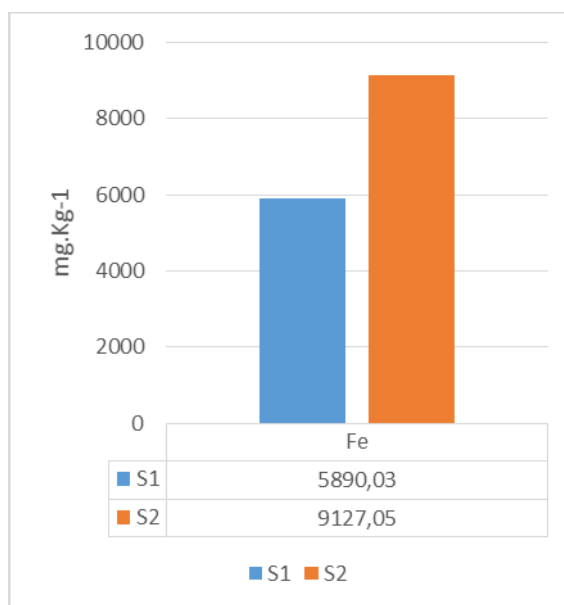
Los dos suelos cumplen la normativa de Cu, Cr, Ni, Zn y As. En S1 se excede el límite 3,2 veces para Cd y 1,74 veces para Pb. En S2 se sobrepasa el límite 2.1 veces para Cd. Con respecto a Fe se obtuvieron 5890 y 9127 mg.Kg⁻¹ reflejando un contenido elevado de óxidos de hierro.

Figura 12

Concentración de metales en muestras de suelo

**Figura 13**

Concentración de Fe en muestras de suelo



Se seleccionó S1 para formar parte de las barreras al tener características similares a las utilizadas en estudios anteriores, con un porcentaje de finos cercano al 50%, además niveles de materia orgánica y CIC inferiores a 5% y 20 meq/100 g suelo, respectivamente. El suelo S2 fue elegido para formar parte de la síntesis de nanopartículas debido a su mayor contenido de Fe y arcilla.

Caracterización de relave

En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización del relave minero.

Tabla 6

Resumen caracterización de relave minero

Relave minero	
pH	6,49
Conductividad (ms.cm⁻¹)	1336
Potencial Rédox (mV)	117,38
Temperatura (°C)	29 (in situ)

Se observa un pH ligeramente ácido con un valor de 6.49 que cumple con el límite establecido en el TULSMA comprendido entre 6 y 9.

La conductividad es la propiedad que presentan las soluciones para conducir el flujo de la corriente eléctrica y depende de la presencia de iones, su concentración y la temperatura de medición (Giraldo, 1995). El valor obtenido de 1336 ms.cm⁻¹ es típico de aguas residuales.

El potencial rédox es la valoración de la capacidad oxidante o reductora del medio, se mide en milivoltios o voltios. Un valor positivo y de alta magnitud es indicativo de un ambiente que favorece las reacciones de oxidación. Del otro lado, un valor negativo y de baja magnitud es indicativo de un ambiente altamente reductor. El resultado medido de 117 mV generalmente es asociado a aguas residuales recientes.

En las figuras 14 y 15 se muestran las concentraciones de metales obtenidas de los ensayos en el espectrofotómetro de absorción atómica y los límites establecidos en el TULSMA para niveles admisibles de descarga a un cuerpo de agua dulce.

Figura 14

Concentración de metales en muestras de relave (Cd, Cr, Pb, As, Ni)

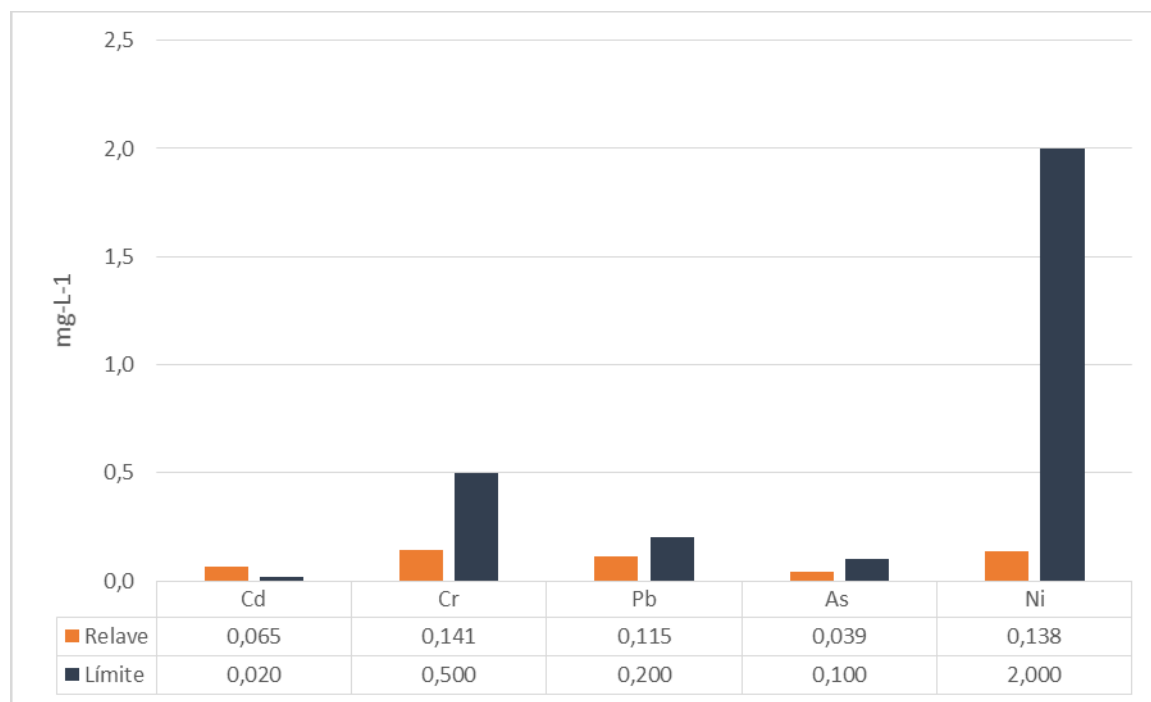
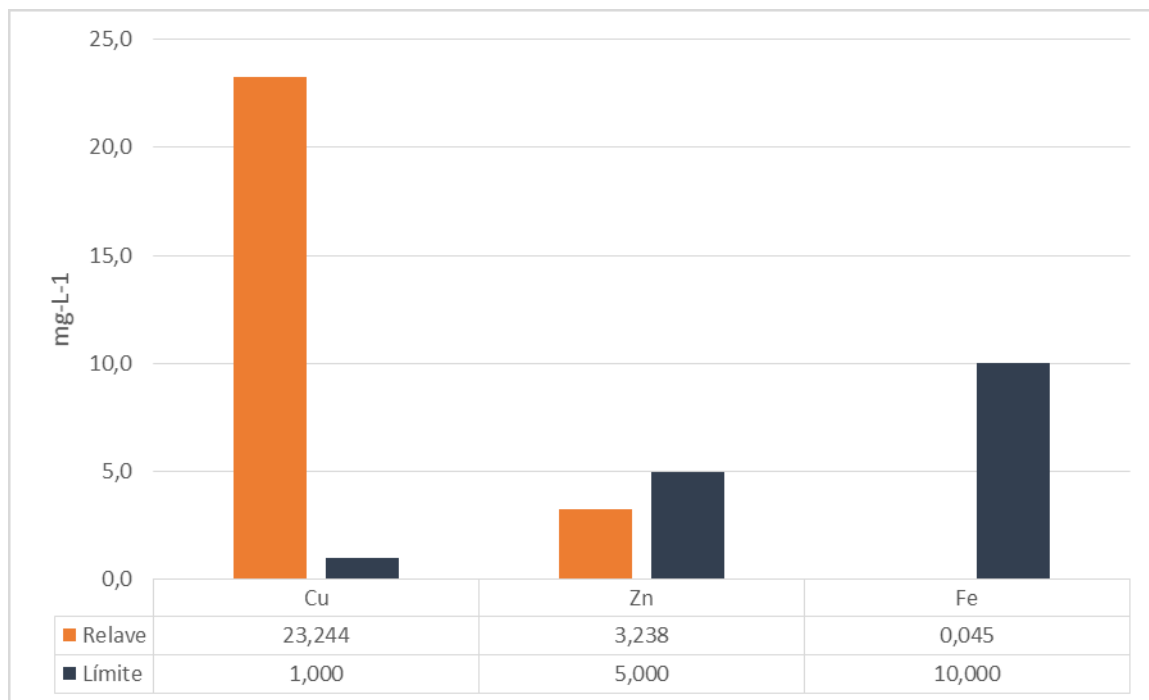


Figura 15

Concentración de metales en muestras de relave (Cu, Zn, Fe)



El relave cumple la normativa de Cr, Pb, Ni, Zn, Fe y As. Respecto a Cu se excede el límite 23,2 veces y 3,3 veces para Pb. La investigación se centra en el As y considerando la baja concentración de 0,04 mg·L⁻¹ se optó por dopar las muestras con una concentración aproximada de 5 mg·L⁻¹ para analizar el comportamiento del tratamiento en condiciones de contaminación elevada.

Caracterización de nanopartículas

Como se observa en la figura 16, los resultados obtenidos mediante difracción de rayos X presentan picos en 44,7955° (2 θ) correspondiente a hierro elemental (α -Fe) y los picos 44,7955° y 35.6349° (2 θ) indican la presencia de sulfuro de hierro.

Los análisis realizados con SEM indican que las NPs preparadas en esta investigación son esféricas y con rugosidad en la superficie, como se muestra en la figura 17. Estos resultados confirman la forma esférica observada para nanopartículas de hierro elemental y aquellas recubiertas con sulfuro de hierro. El tamaño promedio de las nanopartículas determinado en este estudio fue de $67,8 \pm 12,4$ nm, encontrándose dentro del rango nanométrico.

En cuanto a los resultados de EDS, en la tabla 7 se observa que las nanopartículas poseen mayor porcentaje de hierro (41,05 % de Fe) comparado únicamente con suelo (3,85% de Fe).

Figura 16

Difracción de rayos X de las nanopartículas

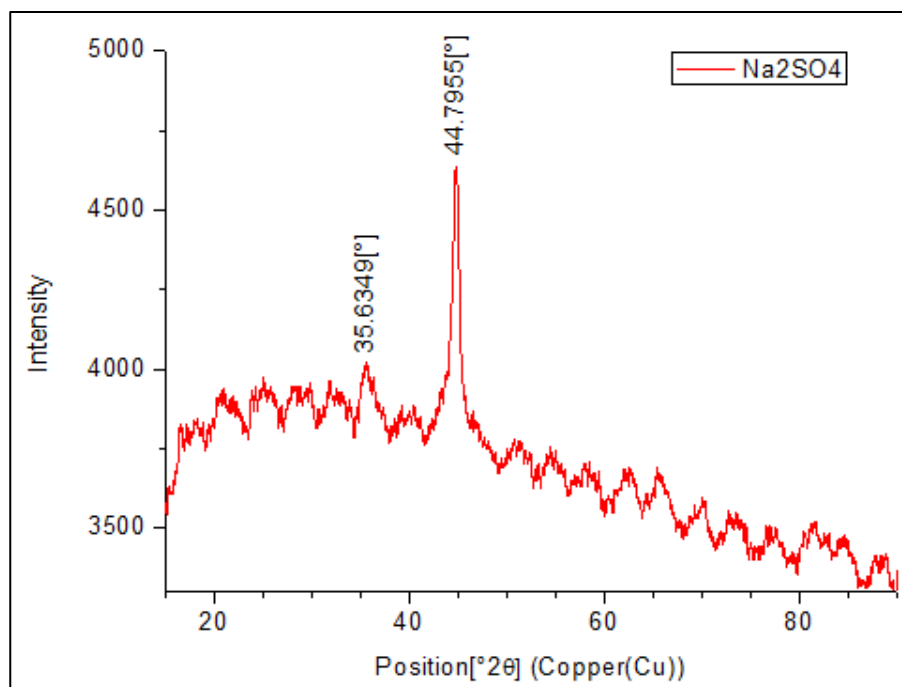
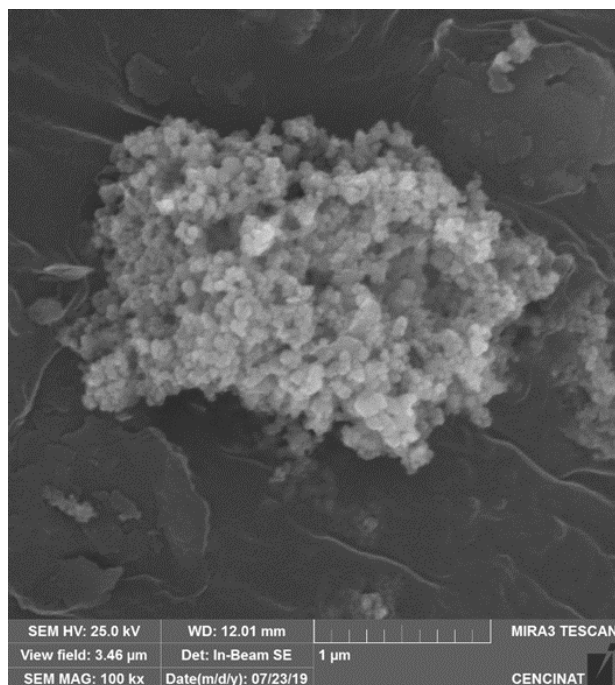


Figura 17*Nanopartículas analizadas en SEM***Tabla 7***Resultados obtenidos mediante EDS*

	Porcentaje de masa normalizada					
	C	O	Al	Si	S	Fe
Suelo S2	12,95	50,38	14,16	17,06	-	3,85
Nanopartículas	13,51	28,16	7,85	6,76	1,28	41,05

Construcción del sistema de tratamiento (prototipo)

La construcción del prototipo se inició con la limpieza y replanteo de la zona designada para la implantación del prototipo dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, seguido de la excavación con el uso de una retroexcavadora y la aplicación de una capa de mejoramiento con subbase clase 3. Sobre esta superficie se

fundió el replantillo de 5 cm con hormigón $f'c=140 \text{ Kg.cm}^2$, luego se encofró y se colocó la malla electrosoldada 5mm x (15x15cm), para dar paso a la fundición del piso y paredes de hormigón de espesor 10 cm con una resistencia $f'c=240 \text{ Kg.cm}^2$. La fundición se realizó en dos etapas, iniciando por el tanque final que se encuentra a mayor profundidad y después el canal y el tanque inicial. Tras el período de secado y curado se procedió al tratamiento de impermeabilización en toda la superficie. Finalmente se realizaron los trabajos relacionados con partes metálicas, con la colocación de las platinas, compuertas y tapas. En la figura 21 se muestra el prototipo finalizada la construcción.

En la figura 22 se observa uno de los paneles metálicos de 40 x 60 cm que sirve como soporte para la barrera de Tecnosol contenido en una bolsa de 40 x 30 cm elaborada en geotextil mostrada en la figura 23.

Figura 18

Excavación para implantación del sistema de tratamiento (prototipo)



Figura 19

Fundición del sistema de tratamiento (prototipo)



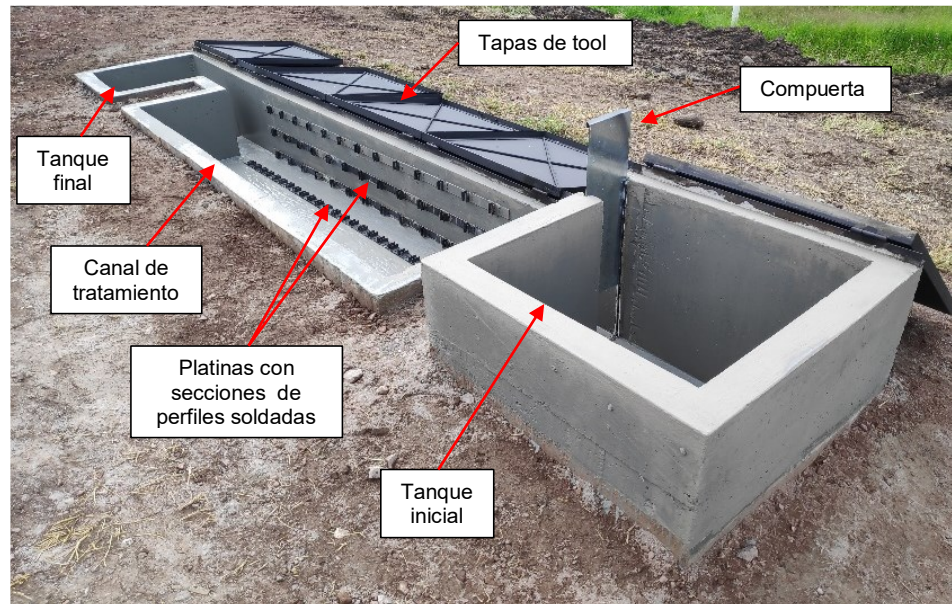
Figura 20

Anclaje de partes metálicas del prototipo



Figura 21

Prototipo finalizado la construcción

**Figura 22**

Marco metálico para sostener barreras



Figura 23

Funda de geotextil



Experimentación en el prototipo

Siguiendo el protocolo descrito en el capítulo 2, en una primera etapa se probaron seis opciones sin restricción en la compuerta 2, variando las separaciones de barreras entre 10, 20 y 30 cm y con un volumen de agua en el tanque inicial de 100 y 200 L, bajo las condiciones descritas en las tabla 2 y 3. Los tiempos y la variación de tirantes medidos se muestran en la tabla 8 y las figuras 26-31.

Figura 24

Ubicación de las barreras tipo laberinto cada 10 cm

**Figura 25**

Ingreso del flujo al canal de tratamiento



Tabla 8

Tiempos promedio en casos P1-P6

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Primer flujo	00'45"	00'31"	00'28"	00'22"	00'21"	00'16"
Vaciado tanque	05'42"	08'04"	03'02"	03'23"	02'12"	02'51"
Total	08'04"	10'33"	04'15"	05'04"	03'58"	04'24"
Total - Vaciado	02'20"	02'30"	01'13"	01'41"	01'46"	01'33"

Figura 26

Variación de tirantes en el tiempo para el caso P1

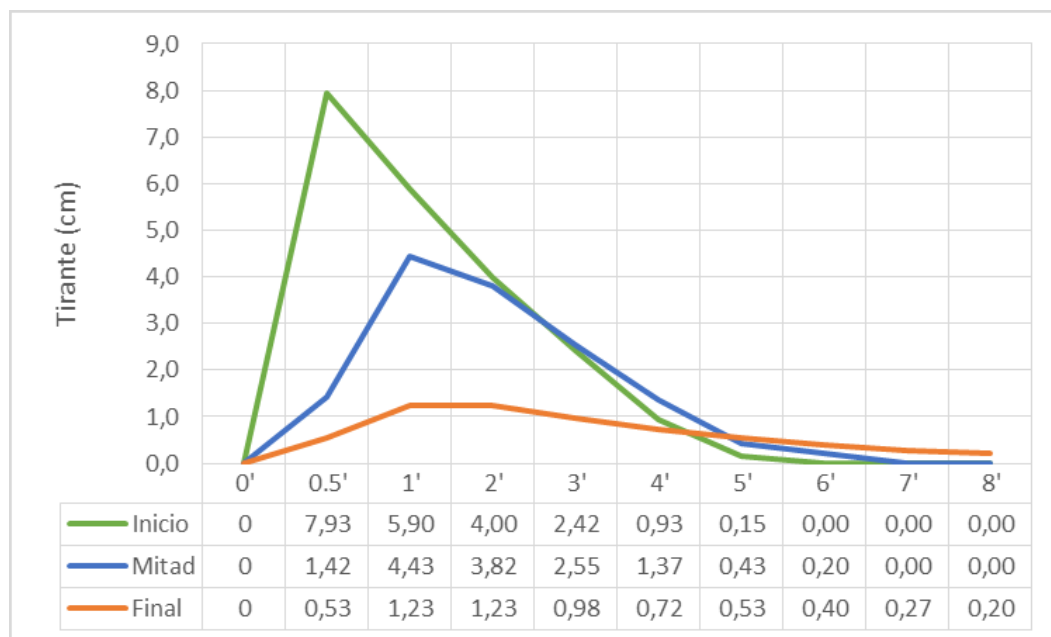
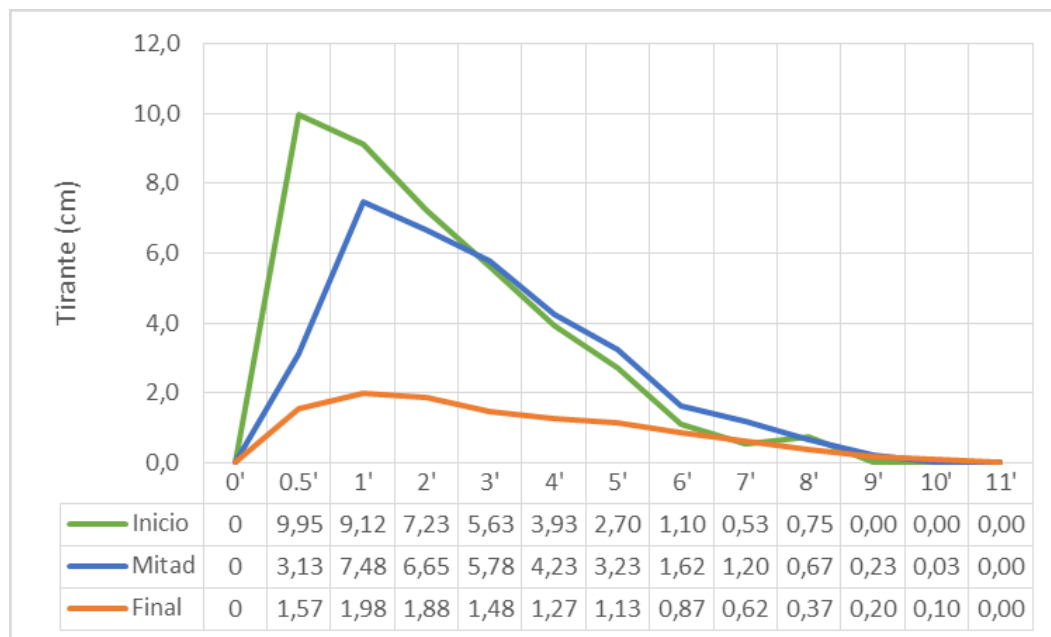


Figura 27

Variación de tirantes en el tiempo para el caso P2

**Figura 28**

Variación de tirantes en el tiempo para el caso P3

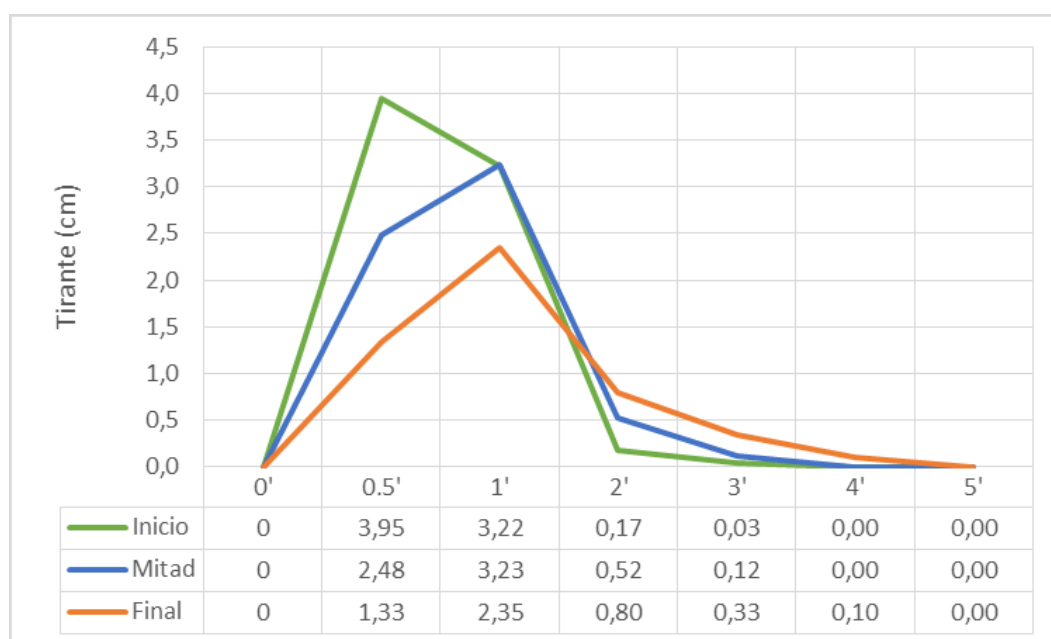
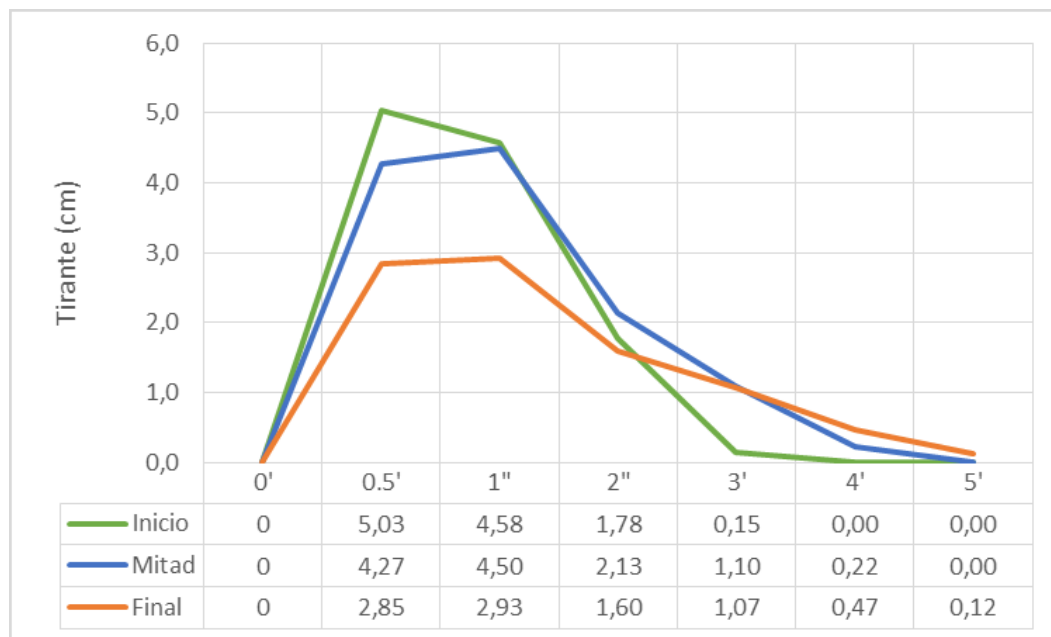
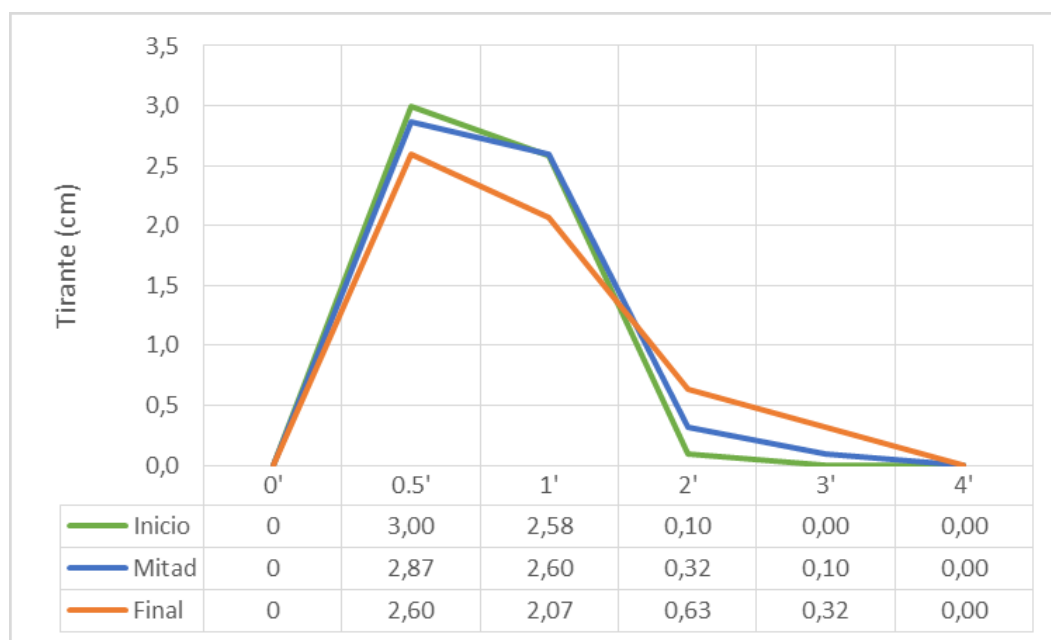


Figura 29

Variación de tirantes en el tiempo para el caso P4

**Figura 30**

Variación de tirantes en el tiempo para el caso P5



	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Q (L.s⁻¹)	2,11	2,94	2,11	2,94	2,11	2,94
Recorrido por barreras						
L (m)	20,80	20,80	11,20	11,20	8,00	8,00
h (cm)	7,93	9,95	3,95	5,03	3,00	4,03
b (cm)	5,00	5,00	15,00	15,00	25,00	25,00
A (cm²)	39,67	49,75	59,25	75,50	75,00	100,83
v (m.s⁻¹)	0,53	0,59	0,36	0,39	0,28	0,29
Tr (s)	39,1	35,2	31,4	28,8	28,4	27,5

En el caso P1 con separación de barreras de 10 cm y volumen de agua de 100 L se obtuvo el mayor tiempo de retención de 39,1 s. En el caso P2 que difiere en el volumen pasando a 200 L se observa una disminución del tiempo a 35,2 s. En las pruebas P3 y P4 con separaciones de 20 cm sus tiempos llegaron a 31,4 s y 28,8 s, respectivamente. Los casos P5 y P6 con separaciones de 30 cm sus tiempos fueron 28,4 s y 27,5 s, respectivamente. Se observa un comportamiento en el cual disminuye el tiempo al aumentar la separación de barreras y el volumen de agua a tratar, resultado de la disminución de la longitud de recorrido entre barreras y el incremento de caudal, respectivamente.

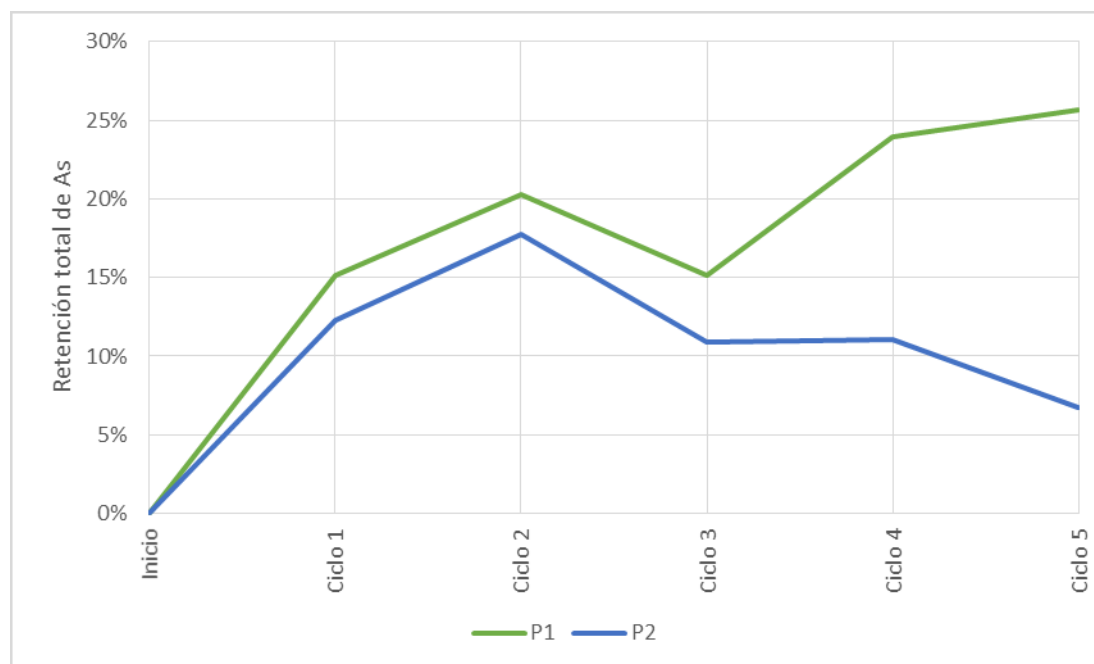
Considerando los resultados de los cálculos hidráulicos, para experimentar la retención de As se eligieron los casos P1 y P2, correspondientes a la menor separación de barreras, por tener los mayores tiempos de retención. Para cada opción se llevaron a cabo 5 ciclos con recirculación del relave.

Figura 32*Lecturas de muestras de As en laboratorio***Tabla 10***Lecturas de concentración de As con opciones P1 y P2*

	P1			P2		
	As (mg.L ⁻¹)	% Variación	% Total retención	As (mg.L ⁻¹)	% Variación	% Total retención
Inicial	5,95			6,42		
Ciclo 1	5,05	-15,1%	-15,1%	5,63	-12,3%	-12,3%
Ciclo 2	4,75	-6,0%	-20,3%	5,28	-6,2%	-17,8%
Ciclo 3	5,05	6,4%	-15,1%	5,72	8,3%	-10,9%
Ciclo 4	4,53	-10,4%	-23,9%	5,71	-0,2%	-11,1%
Ciclo 5	4,43	-2,2%	-25,6%	5,99	4,9%	-6,7%

Figura 33

Variación de retención total de As en casos P1 y P2



En el caso P1 en el primer ciclo se obtuvo un 15,1 % de retención, en los ciclos siguientes existieron variaciones entre 2,2%, 6,4% y 10% y se produjo un incremento del 6,0% en el segundo ciclo. Al final de los 5 tratamientos se alcanzó una remoción total del 25,6%. Para P2 en el primer ciclo muestra un 12,3 % de retención, en los ciclos siguientes existieron disminuciones del 6,2% y 0,2% y aumentos del 8,3% y 4,9%. En el quinto tratamiento se llegó al 6,7% de retención total. La desorción observada en varios ciclos puede deberse a tiempos muy cortos entre recirculaciones, estos fueron aproximadamente de 5 minutos, lo cual evita que se establezca la adsorción del contaminante. Además este efecto es mayor en el caso P2 que puede relacionarse al incremento de caudal y velocidad.

Debido a los bajos porcentajes de retención obtenidos se decidió variar los parámetros manteniendo la separación de 10 cm y usar la compuerta final para restringir la salida con el objetivo de aumentar el tiempo de residencia en el sistema. En las opciones P7 y P9 se optó por cerrar la compuerta final durante 1 hora para analizar el comportamiento a largo plazo del contacto entre el agua y las barreras. En los casos P8 y P10 se abrió la compuerta durante toda la prueba 5 mm y 2 mm, respectivamente. En P7 y P8 se trataron 100 L y en P9 y P10 se utilizaron 44 L, esta variación se realizó considerando la cantidad total de nanopartículas que se sintetizaron al momento de realizar las pruebas, por lo cual el volumen de agua se disminuyó en función de la cantidad de suelo a utilizar para mantener una proporción igual a 97% suelo + 3% NPs. Los tiempos y la variación de tirantes medidos se muestran en la tabla 11 y las figuras 35-38.

Figura 34

Restricción de flujo en compuerta de salida



Tabla 11

Tiempos promedio en casos P7-P10

	P7	P8	P9	P10
Primer flujo	00'54"	00'50"	01'15"	01'13"
Vaciado tanque		07'00"		02'59"
Total		20'54"		11'07"
Total - Vaciado		13'54"		08'08"
Flujo de entrada	03'57"		03'52"	
Estancamiento	60'00"		60'00"	
Flujo de salida	09'32"		09'52"	

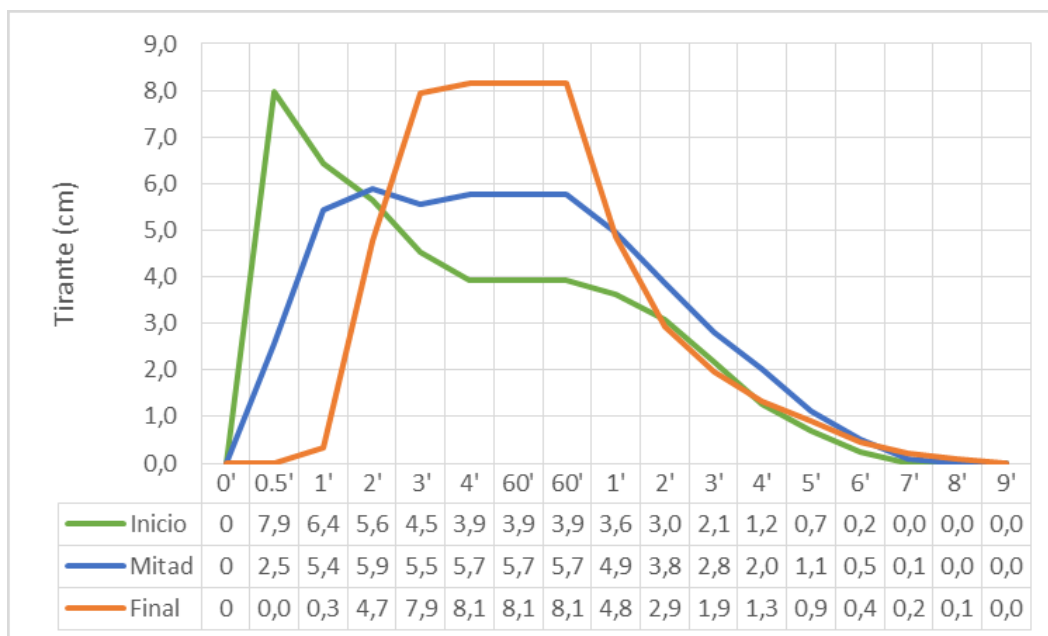
Figura 35*Variación de tirantes en el tiempo para el caso P7*

Figura 36

Variación de tirantes en el tiempo para el caso P8



Figura 37

Variación de tirantes en el tiempo para el caso P9

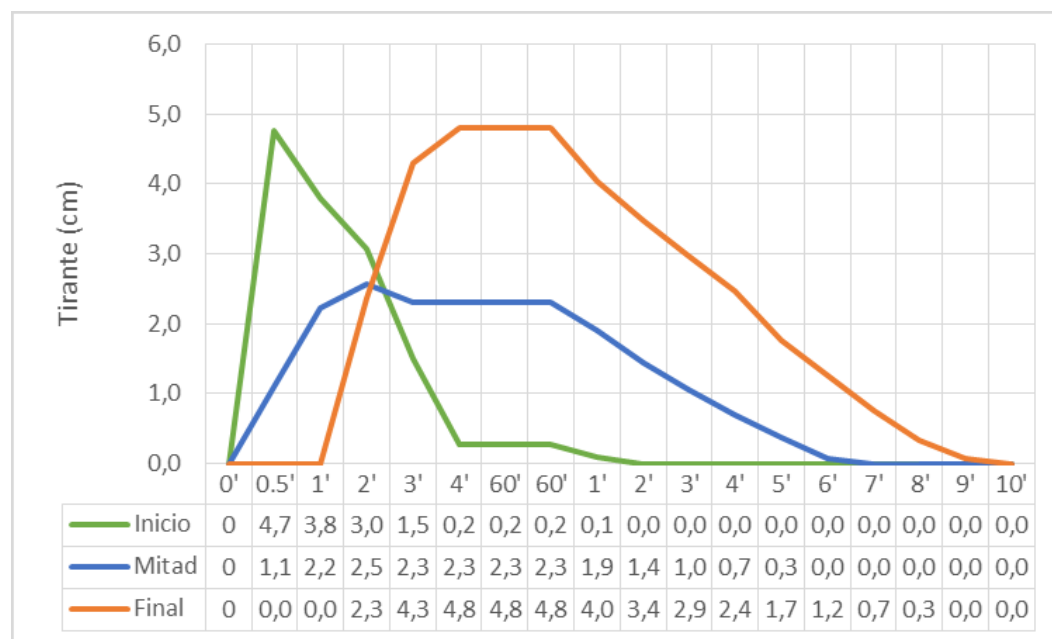
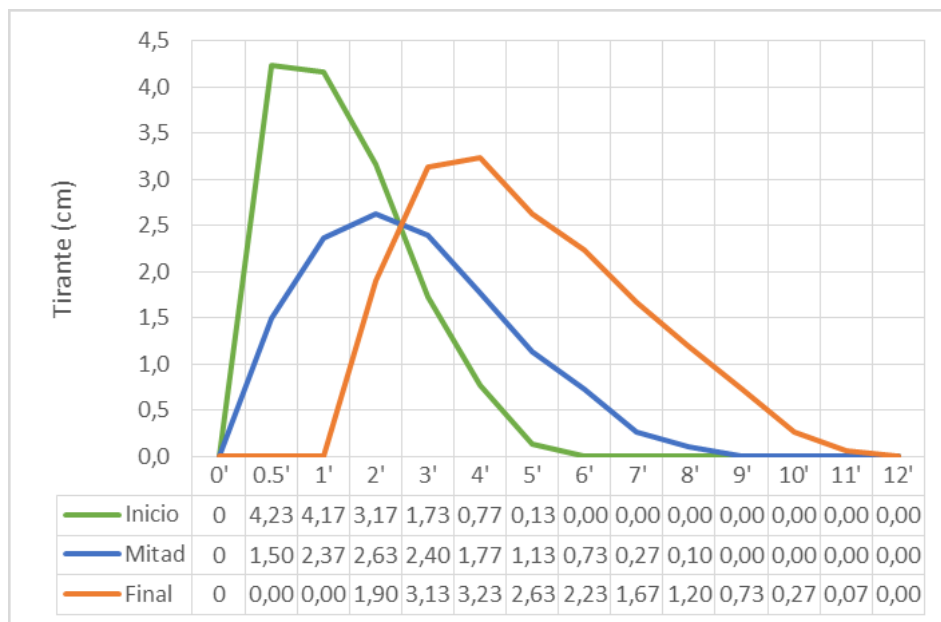


Figura 38

Variación de tirantes en el tiempo para el caso P10



Con los datos obtenidos se realizaron los cálculos descritos en el capítulo 2, para obtener el caudal máximo, velocidad y tiempo de retención que se muestran en las tablas 12 y 13.

Tabla 12

Cálculos hidráulicos en casos P7 y P9

	P7	P9
Caudal máximo salida por compuerta 1		
a (cm)	1,00	0,50
b (cm)	20,00	20,00
H (cm)	16,30	7,70
Cc	0,615	0,615
Cv	0,96	0,96
Q (L.s⁻¹)	2,11	0,73

P7 P9

Caudal máximo salida por compuerta 2

a (cm)	0,50	0,20
b (cm)	20,00	20,00
H (cm)	7,97	4,77
Cc	0,615	0,615
Cv	0,96	0,96
Q (L.s⁻¹)	0,74	0,23

Recorrido por barreras entrada

L (m)	20,80	20,80
h (cm)	7,97	4,77
b (cm)	5,00	5,00
A (cm²)	39,83	23,83
v (m.s⁻¹)	0,53	0,30
T (s)	39,3	68,3

Recorrido por barreras salida

L (m)	20,80	20,80
h (cm)	8,17	4,80
b (cm)	5,00	5,00
A (cm²)	40,83	24,00
v (m.s⁻¹)	0,18	0,10
T (s)	115,1	218,7

Tabla 13

Cálculos hidráulicos en casos P8 y P10

	P8	P10
Caudal máximo salida por compuerta 1		
a (cm)	0,50	0,50
b (cm)	20,00	20,00
H (cm)	16,30	7,70
Cc	0,615	0,615
Cv	0,96	0,96
Q (L.s ⁻¹)	1,06	0,73
Caudal máximo salida por compuerta 2		
a (cm)	0,50	0,20
b (cm)	20,00	20,00
H (cm)	5,90	4,23
Cc	0,615	0,615
Cv	0,96	0,96
Q (L.s ⁻¹)	0,63	0,22
Recorrido por barreras		
L (m)	20,80	20,80
h (cm)	5,90	4,23
b (cm)	5,00	5,00
A (cm ²)	29,50	21,17
v (m.s ⁻¹)	0,22	0,10
Tr (s)	96,6	204,7

En el caso P7 con un volumen de agua de 100 L el relave permaneció estancado 1 hora, además se calcularon los tiempos de retención para la entrada y salida obteniendo 39,3 s y 115,1 s, respectivamente. En P9 con 44 L de relave se mantuvo el período de estancamiento y los tiempos de entrada y salida fueron 68,3 s y 218,7 s.

Para P8 con un volumen de agua de 100 L el tiempo de retención calculado es de 96,6 s. En P10 con la misma separación de barreras y 44 L de relave el tiempo se elevó a 204,7 s.

En los cuatro casos se evidenciaron aumento de los tiempos de retención hidráulica con la restricción de la compuerta final, por lo cual se avanzaron a las pruebas de retención de As. Adicional se incluyó una variación de los casos P9 y P10 en relación a la composición de las barreras para analizar el aporte de las nanopartículas en comparación con el uso de únicamente suelo. En los casos P7, P9.1 y P9.2 se realizaron 5 ciclos, mientras que en P8, P10.1, P10.2 se ejecutaron 10 ciclos. En la figura 39 se muestra el contenido del Tecnosol utilizado con una composición de 97% suelo + 3% NPs.

Figura 39

Mezcla de suelo y nanopartículas

**Figura 40**

Tecnosol dentro de bolsa de geotextil



Tabla 14*Lecturas de concentración de As con opciones P7 y P9*

	P7			P9.1			P9.2			
	As (mg.L-1)	% Variación	% Total retención	As (mg.L-1)	% Variación	% Total retención	As (mg.L-1)	% Variación	% Total retención	
Inicio	5,80			5,00			4,97			
CICLO 1	1.1 (15 min)	3,92	-32,4%	-32,4%	4,40	-12,0%	-12,0%	3,95	-20,4%	-20,4%
	1.2 (30 min)	4,01	2,3%	-30,9%	4,29	-2,6%	-14,3%	4,18	5,7%	-15,9%
	1.3 (45 min)	4,31	7,5%	-25,7%	4,32	0,7%	-13,7%	4,20	0,5%	-15,4%
	1.4 (60 min)	4,01	-7,1%	-30,9%	4,10	-5,0%	-18,0%	4,14	-1,4%	-16,6%
	1.5 (circulación terminada)	4,75	18,5%	-18,2%	3,76	-8,3%	-24,8%	3,85	-7,1%	-22,5%
CICLO 2	2.1 (15 min)	4,29	-9,7%	-26,1%	3,27	-13,1%	-34,7%	3,36	-12,7%	-32,3%
	2.2 (30 min)	4,43	3,3%	-23,7%	3,22	-1,5%	-35,6%	3,41	1,3%	-31,4%
	2.3 (45 min)	3,94	-11,1%	-32,2%	3,18	-1,3%	-36,5%	3,33	-2,2%	-32,9%
	2.4 (60 min)	4,33	10,0%	-25,3%	3,19	0,2%	-36,3%	3,23	-2,9%	-34,9%
	2.5 (circulación terminada)	4,28	-1,2%	-26,2%	2,90	-8,9%	-42,0%	3,23	0,0%	-34,9%
CICLO 3	3.1 (15 min)	3,91	-8,6%	-32,6%	2,60	-10,5%	-48,1%	2,77	-14,4%	-44,3%
	3.2 (30 min)	4,01	2,6%	-30,9%	2,62	0,7%	-47,7%	2,84	2,7%	-42,7%
	3.3 (45 min)	4,00	-0,4%	-31,1%	2,56	-2,1%	-48,8%	2,72	-4,2%	-45,2%
	3.4 (60 min)	3,96	-1,0%	-31,8%	2,60	1,4%	-48,1%	2,70	-0,8%	-45,6%
	3.5 (circulación terminada)	3,89	-1,8%	-33,0%	2,44	-6,2%	-51,3%	2,58	-4,4%	-48,0%

		As (mg.L-1)	P7 % Variación	% Total retención	As (mg.L-1)	P9.1 % Variación	% Total retención	As (mg.L-1)	P9.2 % Variación	% Total retención
CICLO 4	4.1 (15 min)	3,71	-4,5%	-36,0%	2,05	-15,8%	-59,0%	2,29	-11,3%	-53,9%
	4.2 (30 min)	3,11	-16,2%	-46,4%	2,18	6,4%	-56,4%	2,20	-3,9%	-55,7%
	4.3 (45 min)	3,75	20,6%	-35,3%	2,21	1,4%	-55,8%	2,10	-4,4%	-57,7%
	4.4 (60 min)	3,68	-1,9%	-36,6%	2,35	6,0%	-53,1%	2,15	2,5%	-56,6%
	4.5 (circulación terminada)	3,36	-8,8%	-42,2%	2,24	-4,6%	-55,3%	2,03	-5,6%	-59,1%
CICLO 5	5.1 (15 min)	2,57	-23,5%	-55,8%	1,94	-13,1%	-61,2%	1,73	-15,1%	-65,3%
	5.2 (30 min)	2,53	-1,4%	-56,4%	1,90	-2,5%	-62,1%	1,76	1,7%	-64,7%
	5.3 (45 min)	2,50	-1,2%	-56,9%	1,91	0,6%	-61,9%	1,79	1,7%	-64,0%
	5.4 (60 min)	2,64	5,4%	-54,6%	1,87	-2,2%	-62,7%	1,68	-5,9%	-66,2%
	5.5 (circulación terminada)	2,00	-24,1%	-65,5%	1,51	-19,0%	-69,8%	1,58	-6,3%	-68,3%

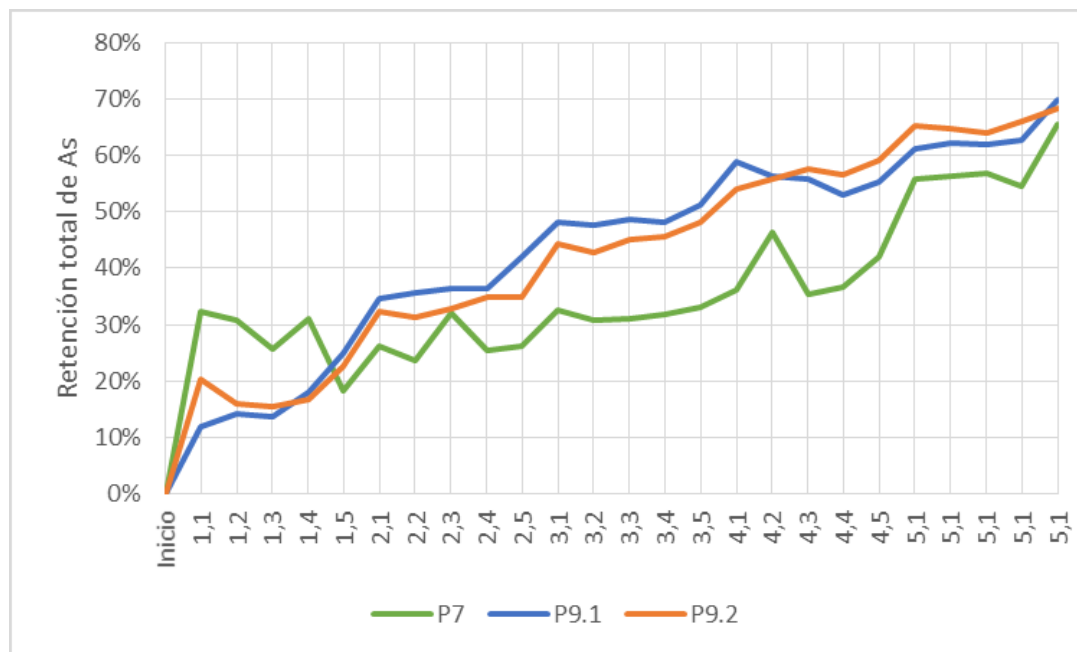
Tabla 15

Lecturas de concentración de As con opciones P8 y P10

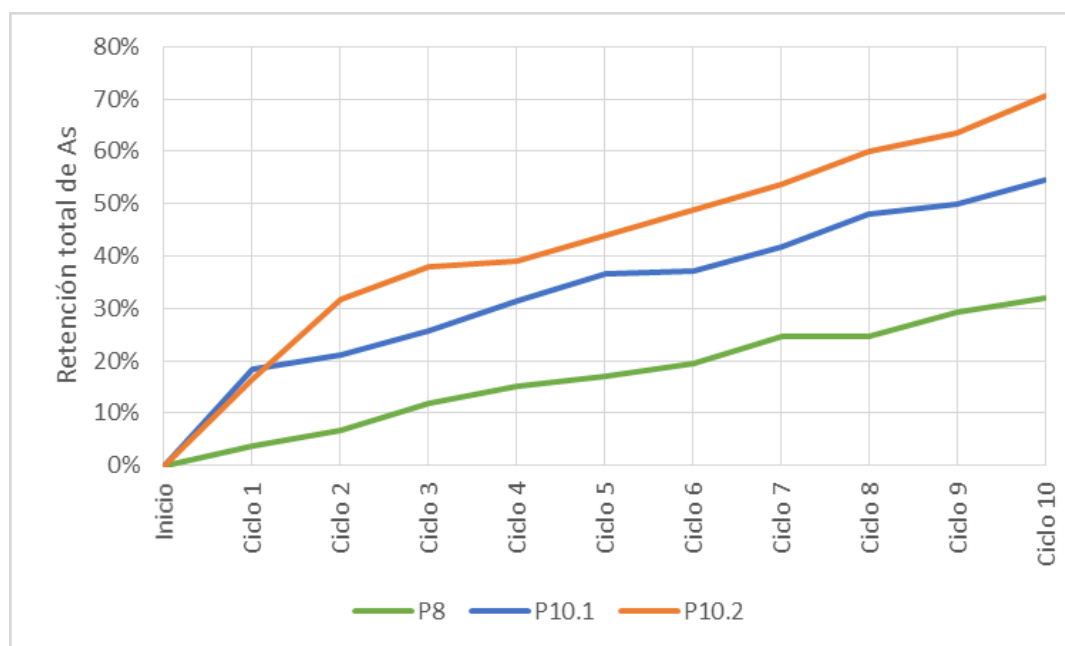
	P8			P10.1			P10.2		
	As (mg.L-1)	% Variación	% Total retención	As (mg.L-1)	% Variación	% Total retención	As (mg.L-1)	% Variación	% Total retención
Inicio	4,29			4,77			4,81		
Ciclo 1	4,12	-3,9%	-3,9%	3,90	-18,3%	-18,3%	4,01	-16,6%	-16,6%
Ciclo 2	4,00	-3,0%	-6,8%	3,77	-3,4%	-21,1%	3,28	-18,2%	-31,7%
Ciclo 3	3,78	-5,4%	-11,8%	3,54	-5,9%	-25,8%	2,98	-9,2%	-38,0%
Ciclo 4	3,64	-3,7%	-15,1%	3,28	-7,5%	-31,4%	2,93	-1,6%	-39,0%
Ciclo 5	3,56	-2,2%	-16,9%	3,03	-7,5%	-36,5%	2,70	-8,1%	-44,0%
Ciclo 6	3,45	-3,2%	-19,6%	3,00	-0,9%	-37,1%	2,46	-8,6%	-48,8%
Ciclo 7	3,23	-6,2%	-24,6%	2,78	-7,5%	-41,8%	2,22	-9,9%	-53,9%
Ciclo 8	3,23	0,0%	-24,6%	2,49	-10,6%	-47,9%	1,92	-13,6%	-60,1%
Ciclo 9	3,03	-6,2%	-29,3%	2,39	-3,9%	-50,0%	1,75	-8,8%	-63,6%
Ciclo 10	2,92	-3,6%	-31,9%	2,17	-9,1%	-54,5%	1,42	-18,8%	-70,5%

Figura 41

Variación de retención total de As en casos P7 y P9

**Figura 42**

Variación de retención total de As en casos P8 y P10



En P7 se alcanzó un 65,5% de retención de As al final de los 5 ciclos. Se observa un comportamiento en el cual la mayor absorción se produce en los primeros 15 minutos de cada tratamiento, estabilizándose a lo largo de la hora con ligeras variaciones. Además se incrementa la adsorción luego del flujo de salida de todo el líquido, lo que indica que las reacciones de retención son más efectivas con el líquido en movimiento en comparación con el estancamiento en el cual solo un pequeño volumen permanece en contacto con el material de las barreras. En los ciclos 2 y 4 se evidenciaron los incrementos más altos del contenido de As con 18,5% y 20,6%, respectivamente. Estas anomalías pueden deberse a variaciones en las condiciones ambientales que desencadenaron la desorción del contaminante.

Las opciones P9.1 y P9.2 alcanzaron una retención de 69,8% y 68,3%, respectivamente. Con la variación del volumen a 44 L y su consecuente disminución de caudal y velocidad, e incremento del tiempo de retención, presentaron un comportamiento similar a P7, pero con mayor estabilidad al no presentarse niveles significativos de desorción. En P9.2 el aporte de las nanopartículas fue insignificante, incluso la opción en la que se utilizó 100% suelo tuvo una ligera mayor adsorción.

Los porcentajes de retención de As al finalizar los 10 ciclos en los casos P8, P10.1 y P10.2 fueron iguales a 31,9%. 54,5% y 70,5%, respectivamente. Las 3 opciones tuvieron un comportamiento estable sin presencia de desorción en ningún ciclo. Las opciones P10.1 y P10.2 muestran una mayor retención relacionada a sus parámetros hidráulicos con los cuales alcanzaron un tiempo de retención 2.1 veces mayor a P8. Las condiciones de P10.2 la posicionan como el mejor tratamiento al ser el único que superó el 70% de retención. El uso del Tecnosol con nanopartículas muestra una mayor capacidad de adsorción del contaminante.

El arsénico puede ser fuertemente atraído a los sitios de sorción sobre la superficie de varios materiales sólidos. Se ha encontrado una muy buena eficiencia con el empleo de materiales de base de óxido e hidróxido de hierro (Holl & Litter, 2010). La reactividad está limitada por las características del medio, del contaminante y del material. Una manera de mejorar la reactividad consiste en aumentar el área superficial específica del material, ya que así se aumenta la relación área/volumen (Cortina et al., 2010). Este parámetro es una de las variables más significativas relacionadas a la velocidad de remoción de contaminantes por lo cual el uso de nanopartículas es una forma eficiente de aumentar la capacidad de retención.

Capítulo IV

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

El sistema de remoción de metales pesados se construyó dentro de la Universidad de las Fuerza Armadas “ESPE”, en el área verde contigua a la planta de tratamiento de la institución. Está conformado por una estructura de hormigón que consta de dos tanques cuadrados y un canal rectangular en el cual se desarrolla el tratamiento de agua con el uso de barreras de Tecnosol colocadas de manera alternada. El tanque inicial es de 0,8 x 0,8 x 0,7 m. El tanque final es de 0,8 x 0,8 x 1,0 m. El canal donde se ubican las barreras es de 3 m de largo con ancho de 0,8 m, tirante de 0,4 m y pendiente del 2%. El canal central y los tanques están conectados por canaletas de 0,5 m de largo y 0,2 m de ancho.

El tratamiento P10.2, con separación de barreras cada 10 cm y volumen de 44 L, alcanzó el 70,5% de remoción de As en 10 ciclos, con un caudal máximo de ingreso de 0,73 L.s⁻¹, caudal de salida de 0,22 L.s⁻¹, velocidad de 0,10 m.s⁻¹ y tiempo de retención hidráulico de 204,7 s (3,4 min) por ciclo.

En fases previas de investigación en laboratorio a través de pruebas en columnas se determinó que la mejor dosificación del Tecnosol es de 97% suelo + 3% NPs, alcanzando una retención media del 70 % para los siguientes metales pesados: Cu, Cd, Zn, Pb, Cr y As. En la presente investigación se comprobó la validez de dicha proporción del Tecnosol al presentar un incremento de la remoción del As del 29% en comparación con el uso de 100% suelo.

Tiempos menores a 5 minutos entre tratamientos mostraron un efecto de desorción, al no permitir que se establezcan las reacciones de adsorción.

El estancamiento del líquido no influye en la retención a partir de los 15 minutos. Se observó un mejor comportamiento en los casos en los que se mantuvo en flujo de salida constante al aportar mayor contacto con las barreras.

Recomendaciones

Realizar pruebas con ingreso continuo de líquido para mantener el caudal constante durante todo el tratamiento.

Investigar la capacidad de retención con otras formas de ubicación de las barreras en el canal.

Analizar el comportamiento del tratamiento a largo plazo, para obtener la concentración de saturación del suelo y estimar el tiempo de vida útil de las barreras.

Referencias bibliográficas

- Aduvire, O. (2006). *Drenaje ácido de mina. Generación y tratamiento*. Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente.
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, & Water Environment Federation. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*.
- American Society for Testing and Materials. (2007). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (ASTM D422)*.
- Bolaños, D. (2014). *Aplicación de Tecnosoles para la recuperación de suelos y aguas afectados por actividades de obras civiles, urbanas y minería*. Universidad de Santiago de Compostela.
- Bolaños-Guerrón, D., Sánchez-Gómez, V., Paz, J., Izquierdo, A., Stael, C., & Balseiro-Romero, M. (2018). Arsenic Retention on Technosols Prepared with Nanoparticles and Ferric Soil from Mine Drainage Water. *Journal of Nanotechnology*. <https://www.hindawi.com/journals/jnt/2018/6840856/cta/>
- Capa, C. (2019). *Aplicación de Tecnosoles para la recuperación de suelos y aguas afectados por actividades de obras civiles, urbanas y minería*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Cortina, J., Fiúza, A., Silva, A., & Litter, M. (2010). Tecnologías de tratamiento in-situ de aguas subterráneas. En *Tecnologías económicas para el abatimiento de*

arsénico en aguas (pp. 111–143). Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.

Cumbal, L., & Bolaños, D. (2015). *Empleo de Tecnosoles, elaborados con residuos no peligrosos, en combinación con nanopartículas para recuperar suelos y aguas contaminados por actividades de explotación minera (Nota conceptual de proyecto de investigación)*.

Francisca, F., & Carro, M. (2014). Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(2), 177–190.

Galán, E., & Romero, A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *Revista de la sociedad española de mineralogía*, 10, 48–60.

Garrido, S. (1994). *Interpretación de análisis de suelos*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Giraldo, I. (1995). *Manual de análisis de aguas*.

Gómez, M. (2018). Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*, 27(2), 75–80.

<https://doi.org/https://doi.org/10.31260/RepertMedCir.v27.n2.2018.191>

Holl, W., & Litter, M. (2010). Ocurrencia y química del arsénico en aguas. Sumario de tecnologías de remoción de arsénico de aguas. En *Tecnologías económicas para el abatimiento de arsénico en aguas* (pp. 17–27). Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.

- How, H. K., & Yaacob, W. Z. W. (2015). Synthesis and characterization of marine clay-supported nano zero valent iron. *American Journal of Environmental Sciences*, 11(2), 115–124.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1982). *Mecánica de suelos. Determinación del límite líquido. Método de Casa Grande (NTE INEN 691)*.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1982). *Mecánica de suelos. Determinación del límite plástico (NTE INEN 692)*.
- IUSS, ISRIC, & FAO. (2007). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB). Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103*.
- Lizcano, R., Olivera, D., Saavedra, D., Machado, L., Rolando, E., Moreno, M., & Fidel, M. (2017). *Muestreo de suelos, técnicas de laboratorio e interpretación de análisis de suelos*. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA).
- López, P., Ainzúa, S., Zolezzi, C., & Vasconi, P. (2003). La Minería y su Pasivo Ambiental. *Análisis de Políticas Públicas*, 24.
- Macías-García, F. (2009). Recuperación de aguas ácidas de la mina Touro mediante sistemas integrados de barreras reactivas con diferentes Tecnosoles y humedales. *Minería sostenible. Cámara Oficial Mineira de Galicia*, 963–974.
- Oviedo, R., Moina, E., Naranjo, J., & Barcos, M. (2017). Contaminación por metales pesados en el sur del Ecuador asociada a la actividad minera. *Bionatura*, 2(4), 437–440.

- Paz, J. (2018). *Estudio de la inmovilización de metales pesados presentes en relave líquido de minería empleando tecnosoles, a nivel de laboratorio*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Ruiz-Oriol, C. (2004). *Caracterización de los procesos de eliminación de metales de aguas ácidas utilizando magnesia caústica. Aplicación al tratamiento in situ*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Sánchez, V. (2017). *Modelamiento de la retención de arsénico por medio de la aplicación de tecnosoles en conjunto con nanopartículas en aguas provenientes de minería*. Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE.
- Sandoval, W. (2013). *Principios de Hidráulica 2*. EDIESPE.
- Stael, C., & Cumbal, L. (2016). Optimized synthesis of multicomponent nanoparticles for removing heavy metals from artificial mine tailings. *Biology and Medicine*, 8(3).
- The Royal Netherlands Standardization Institute. (2014). *Soil - Calculation of organic matter content on a mass basis as loss-on-ignition (NEN 5754)*.