



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA



**APLICACIÓN DE BIOSURFACTANTE NATURAL ENZIMÁTICO “PETRA-ZYME”  
PARA LA INMOVILIZACIÓN DE METALES PESADOS POTENCIALMENTE TÓXICOS  
PRESENTES EN LOS SUELOS**

POR

**Alex Christian Riveros Peña**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción  
para optar al título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesor(es) Guía

Roberto Gómez Espina

Pablo Higuera Higuera

Marzo 2024

Concepción (Chile)

© 2024 Alex Christian Riveros Peña

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## **DEDICATORIA**

A mi abuela, Rubí Oviedo Paredes por todo el apoyo que me brindó, hizo que todo lo que he logrado fuera posible y es una de las personas más importantes de mi vida, espero que me pueda estar viendo desde el cielo y esté orgullosa de lo que gracias a ella soy hoy en día.

## AGRADECIMIENTOS

Me gustaría empezar expresando mi gratitud a todas aquellas personas que ayudaron a hacer posible la realización de mi memoria de título. El apoyo y los consejos que otorgaron me fueron de gran ayuda para la culminación de este importante proyecto.

En primer lugar, quiero agradecer a toda mi familia, especialmente a mis padres que me han entregado un apoyo incondicional, gracias por estar siempre conmigo en cada decisión que he tomado, en cada momento difícil de la vida y por sobre todas las cosas en darme las herramientas necesarias para ser una mejor persona cada día. También, no puedo dejar de lado a mi abuelo Emilio, quien ha estado conmigo siempre.

Además, me gustaría reconocer a los representantes de la Universidad de Castilla - La Mancha, Dr. Pablo Higuera, Sandra Viso y José Ignacio Barquero quienes me ayudaron en demasía para poder llevar a cabo con éxito este proyecto, no quiero dejar de lado a todas las personas que componen la residencia universitaria, ya que, me entregaron techo, comida y una excelente estancia en Almadén. Muchas gracias a todos por su buena disposición durante todo este proceso.

Asimismo, agradecer a mi profesor Roberto Gómez quien me ayudó a lograr con éxito mi pasantía internacional en España, además, por guiarme y estar siempre atento durante todo el desarrollo de esta memoria de título.

Hacer mención, además, a lo más grande del fútbol universitario, “Civil de Minas FC” que me regaló uno de los mejores momentos en mi paso por la universidad, ser campeón de la “Copa Udec 100 años”. Gracias a todas esas personas que conforman este gran equipo minero.

Finalmente, un agradecimiento especial va dirigido a mis amigos, Aylin Méndez, Francisco Rivera, Francisco Rojas, Verónica Gatica, Sebastián Molina, Vasco Flores, Esteban Bustos y Víctor San Martín, quienes me enseñaron muchas cosas y fueron parte importante para mí en todo mi proceso universitario, gracias por todo amigos y futuros colegas.

¡Muchas gracias por todo!

## RESUMEN

Una de las principales problemáticas al momento de realizar un proyecto minero, es la contaminación generada por esta industria, es por esta razón que se está en una constante búsqueda a alternativas y soluciones para que este inconveniente sea minimizado, y así no se vea afectada la flora y fauna de las zonas cercanas en las que se encuentran dichos proyectos. Asimismo, este estudio, se enfoca en la utilización de una enmienda natural llamada “Petra-Zyme”, la cual será aplicada a distintos suelos mineros, que poseen un alto contenido de metales pesados.

Esta problemática que afecta al ecosistema se verá reflejada en dos zonas de estudio, las cuales presentan grandes contenidos de metales pesados que en un principio afectarían negativamente a los suelos y al ecosistema que se encuentra cercano a estas zonas de interés. Dichas zonas se localizan en la comunidad autónoma de Castilla - La Mancha, España.

En este estudio se realizaron tres experimentos diferentes, pero con un objetivo en común, que consiste en analizar la efectividad de la enmienda utilizada en distintas muestras de suelo y evaluar que sucede con los distintos metales pesados de interés. Igualmente, en el primer estudio se utiliza solo un 10% de enmienda, puesto que se tiene un bajo contenido de muestra, sin embargo, para los siguientes dos experimentos se utiliza un 10% y 30% de enmienda, esto para determinar y comparar que sucede con distintas proporciones de Biorreparador utilizado.

Para el primer experimento se utilizan dos muestras de suelos contaminados por mercurio, una proveniente de una localidad llamada Almadenejos y otra muestra perteneciente a una localidad llamada Nueva Concepción. Del mismo modo, para los dos experimentos restantes se utilizaron muestras de suelos contaminados por Pb/Zn y metales relacionados pertenecientes a una antigua mina abandonada llamada San Quintín, también, es importante mencionar que, el primer y segundo estudio tendrán una duración de 28 días y el tercer estudio al ser un complemento del segundo solo se extenderá por 14 días.

Luego de obtener los resultados de los diferentes estudios realizados, se cuantificó una disminución en la concentración de los metales en la mayoría de los casos, sin embargo, existen ciertos casos donde los resultados obtenidos no son los esperados, es por este motivo, que se recomienda continuar con distintos estudios, variando la duración, las proporciones o los metales de interés.

## **ABSTRACT**

One of the main issues when implementing a mining project is the pollution generated by this type of industry. For this reason, there is an incessant search for alternatives and solutions so that this inconvenience can be minimized and thus, the flora and fauna of the nearby areas where these projects are located would not be affected. Likewise, this study focuses on the use of a natural solution called “Petra-Zyme”, which will be applied to different mining soils, which have a high content of heavy metals.

The issue that affects the ecosystem will be reflected in two study areas, which have high concentrations of heavy metals that would initially negatively affect the soils and the ecosystem close to these areas of interest. These areas are located in the autonomous community of Castilla - La Mancha, Spain.

In this research, three different experiments were carried out, but all with a common objective, which is to analyze the effectiveness of the natural solution used in different soil samples and, also, to observe what happens with the different heavy metals of interest. Likewise, in the first experiment, only 10% natural solution is used, since there is a low sample content, however, for the next two experiments 10% and 30% solution are used to warn and compare what happens with different proportions of the product used.

For the first experiment, two samples from a location called Almadenejos and another sample belonging to a location called Nueva Concepción are used. Likewise, for the remaining two experiments, samples belonging to an old abandoned mine called San Quintín were used. It is important to mention that the first and second experiments will last 28 days and the third one, being a complement to the second, will only last 14 days.

After obtaining the results of the different experiments carried out, a decrease in the concentration of metals can be seen in most cases, however, there are certain cases where the results obtained are not as expected, which is why it is recommended to continue with different studies, varying the duration, proportions or metals of interest.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Objetivos .....	2
1.1.1	Objetivo General .....	2
1.1.2	Objetivos Específicos .....	2
1.2	Alcances y limitaciones del trabajo .....	3
2.	ANTECEDENTES .....	4
2.1	Condición de los suelos .....	4
2.2	Contaminación de suelos .....	4
2.3	Contaminación por metales pesados .....	5
2.3.1	Mercurio .....	5
2.3.2	Plomo .....	6
2.3.3	Hierro .....	6
2.3.4	Zinc .....	7
2.3.5	Cobre .....	7
2.4	Minas abandonadas .....	8
2.4.1	Yacimiento de Almadén .....	8
2.4.2	Minas abandonadas San Quintín .....	8
3.	METODOLOGIA .....	10
3.1	Muestreo .....	10
3.2	Preparación de muestras .....	12
3.2.1	Secado .....	13
3.2.2	Desagregado .....	14
3.2.3	Tamizado .....	14
3.2.4	Cuarteoado .....	15
3.3	Materiales .....	16

3.4	Proceso experimental .....	17
3.4.1	Primer Estudio: Fijación de Mercurio total por el Biosurfactante en muestras de suelo. ....	17
3.4.1.1	Test de lixiviación con Acetato de Amonio .....	19
3.4.1.2	Análisis de Mercurio total presente en el agua.....	20
3.4.1.3	Procedimiento para la cuantificación de Mercurio total.....	22
3.4.2	Segundo estudio: Retención de metales pesados por el Biosurfactante en muestras de suelo solidas .....	24
3.4.2.1	Selección de muestras de interés .....	25
3.4.2.2	Aplicación del Biorreparador en las muestras seleccionadas.....	27
3.4.2.3	Análisis de metales pesados en muestras de suelo seleccionadas .....	28
3.4.3	Tercer estudio: Análisis de metales posiblemente solubles en agua.....	30
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	32
4.1	Retención de mercurio total en muestras de suelo. ....	32
4.2	Retención de metales pesados en muestras de suelo solidas.....	34
4.2.1	Selección de muestras en base a pH y conductividad eléctrica.....	35
4.2.2	Variación de pH y conductividad eléctrica a lo largo del estudio.....	35
4.2.3	Retención de metales pesados en muestras de suelo solidas.....	39
4.2.4	Análisis de metales posiblemente solubles en agua .....	50
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	58
6.	REFERENCIAS .....	60
7.	ANEXOS.....	63



## NOMENCLATURA

$\text{CH}_3\text{COONH}_4$	:	Acetato de Amonio
cm	:	Centímetros
Cu	:	Cobre
RSD	:	Desviación estándar relativa
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	:	Óxido de Hierro
$^\circ\text{C}$	:	Grados Celsius
gr	:	Gramo
hr	:	Hora
km	:	Kilometro
$\text{km}^2$	:	Kilómetros cuadrados
L	:	Litro
Hg	:	Mercurio
$\mu\text{l}$	:	Microlitro
$\mu\text{m}$	:	micrómetro
$\mu\text{S}$	:	Micro Siemens
mg	:	Miligramo
ml	:	Mililitro
mm	:	Milímetro
min	:	Minuto
M	:	Molaridad
ng	:	Nanogramo
ppm	:	Partes por millón
Pb	:	Plomo
%	:	Porcentaje
rpm	:	Revoluciones por minuto
Zn	:	Zinc

## ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Localización mina San Quintín elaborado por (Rodríguez et al., 2009 ).....	11
Ilustración 2. Fotografías representativas de las zonas de toma de muestra. ....	11
Ilustración 3. A: Barrena de suelo de la marca ejkelKamp; B: GPS portátil GPSmap 62 st. ....	12
Ilustración 4. Pasos para el tratamiento de las muestras. ....	13
Ilustración 5. Muestras depositadas en el almacén del laboratorio para su proceso de secado.....	13
Ilustración 6. Muestra ya depositada en el mantel de laboratorio para su posterior desagregación ..	14
Ilustración 7. A: Tamiz con malla de 2.00 [mm]; B: Tamiz con muestra de interés. ....	14
Ilustración 8. A: Tamiz depositado en el equipo RP 200 N; B1 y B2: Tamizado final con fragmentos superiores a 2.00 [mm] por sobre la malla y fragmentos inferiores por debajo de la malla .....	15
Ilustración 9. A: muestra fraccionada en cuatro partes aproximadamente iguales; B: Dos muestras sobrantes luego de que el 50 [%] de interés ya fuese tomado.....	15
Ilustración 10. Disolución del Biorreparador junto al agua de grifo.....	17
Ilustración 11. Procesos por efectuar para la realización del primer experimento. ....	18
Ilustración 12. Cantidades de muestra y Biorreparador utilizadas en el experimento. ....	19
Ilustración 13. Baño de agitación con sus parámetros a utilizar. ....	20
Ilustración 14. Resultados del test de lixiviación a las 3 muestras de interés. ....	20
Ilustración 15. Equipo LUMEX RA-915+.....	21
Ilustración 16. A: Arena sílicea cuyo nombre técnico es SP7; B: Navecilla con superficie cubierta de SP7. ....	22
Ilustración 17. Navecilla depositada en equipo LUMEX RA-915+. ....	23
Ilustración 18. Resultados de las 3 mediciones de Hg total a una muestra de interés. ....	23
Ilustración 19. Estadísticas de las 3 mediciones tomadas a una muestra de interés. ....	24
Ilustración 20. Procesos por realizar lo largo del estudio. ....	25
Ilustración 21. Equipo de medición HI98199 multiparamétrico pH, CE, OD. ....	25
Ilustración 22. Parámetros utilizados al momento de efectuar el baño de agitación. ....	26
Ilustración 23. Muestras luego de realizar el baño de agitación. ....	27
Ilustración 24. Estufa de secado junto a las muestras de interés.....	28
Ilustración 25. Equipo de medición Malvem Panalytical Epsilon 1. ....	29
Ilustración 26. Disminución de tamaño de la muestra utilizando el mortero.....	30
Ilustración 27. Estándar utilizado para la calibración del equipo LUMEX RA-915+.....	64

Ilustración 28. Recta obtenida al momento de realizar la calibración. ....	65
Ilustración 29. Unidades de medida bajo las cuales se cuantifica el Hg total. ....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Nombres técnicos de cada muestra. ....	11
Tabla 2. Coordenadas GPS de las muestras de interés.....	12
Tabla 3. Parámetros para la realización del test de lixiviación a las muestras sin enmienda. ....	19
Tabla 4. Parámetros para la realización del test de lixiviación a las muestras con enmienda. ....	20
Tabla 5. Parámetros bajo los cuales se utiliza el equipo LUMEX RA-915+.....	21
Tabla 6. Cantidad de muestra utilizada con cada proporción de enmienda aplicada.....	27
Tabla 7. Cantidad de muestra junto a las proporciones de Biorreparador utilizado. ....	31
Tabla 8. Resumen de resultados obtenidos para el experimento 1.....	32
Tabla 9. Resultados preliminares de pH y conductividad eléctrica. ....	35
Tabla 10. Mediciones de pH y conductividad eléctrica con la aplicación del Biorreparador.....	35
Tabla 11. Concentraciones iniciales de los elementos de interés para cada muestra de suelo.....	39
Tabla 12. Resumen de los valores promedios obtenidos para la muestra de suelo CHSQ-3.....	40
Tabla 13. Resumen de los valores promedios obtenidos para la muestra de suelo CHSQ-4.....	45
Tabla 14. Promedio de mediciones cuantificadas al séptimo día.....	50
Tabla 15. Promedio de mediciones cuantificadas al último día.....	51
Tabla 16. Concentraciones obtenidas para el día 0 del estudio.....	66
Tabla 17. Concentraciones obtenidas para el día 7 del estudio.....	66
Tabla 18. Concentraciones obtenidas para el día 14 del estudio.....	67
Tabla 19. Concentraciones obtenidas para el día 21 del estudio.....	67
Tabla 20. Concentraciones obtenidas para el día 28 del estudio.....	68
Tabla 21. pH y conductividad eléctrica para el día 14 del experimento. ....	68
Tabla 22. pH y conductividad eléctrica para el día 21 del experimento. ....	68
Tabla 23. Concentraciones iniciales sin enmienda para los elementos de interés. ....	68
Tabla 24. Concentraciones de los metales de interés para el día 7 del experimento. ....	69
Tabla 25. Resumen de los datos obtenidos para el día 7 del experimento. ....	69
Tabla 26. Concentraciones de los metales de interés para el día 14 del experimento. ....	70
Tabla 27. Resumen de los datos obtenidos para el día 14 del experimento. ....	70
Tabla 28. Concentraciones de los metales de interés para el día 21 del experimento. ....	71
Tabla 29. Resumen de los datos obtenidos para el día 21 del experimento. ....	71
Tabla 30. Concentraciones de los metales de interés para el día 28 del experimento. ....	72

Tabla 31. Resumen de los datos obtenidos para el día 28 del experimento.....	72
Tabla 32. Concentraciones de los metales de interés para el día 7 del experimento. ....	81
Tabla 33. Resumen de los datos obtenidos para el día 7 del experimento.....	81
Tabla 34. Concentraciones de los metales de interés para el día 14 del experimento. ....	82
Tabla 35. Resumen de los datos obtenidos para el día 14 del experimento.....	82

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Comportamiento de la muestra NC1.....	33
Gráfico 2. Comportamiento de la muestra AJ2 Nueva. ....	33
Gráfico 3. Comportamiento de la muestra AJ2 Antiguo.....	34
Gráfico 4. Variación del pH en la muestra CHSQ-3.....	36
Gráfico 5. Variación del pH en la muestra CHSQ-4.....	36
Gráfico 6. Variación de la conductividad eléctrica para la muestra CHSQ-3.....	37
Gráfico 7. Variación de la conductividad eléctrica para la muestra CHSQ-4.....	38
Gráfico 8. Comparativa de Zn en la muestra CHSQ-3. ....	41
Gráfico 9. Comparativa de Pb en la muestra CHSQ-3.....	42
Gráfico 10. Comparativa de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en la muestra CHSQ-3.....	43
Gráfico 11. Comparativa de Cu en la muestra CHSQ-3. ....	44
Gráfico 12. Comparativa de Zn en la muestra CHSQ-4. ....	46
Gráfico 13. Comparativa de Pb en la muestra CHSQ-4.....	47
Gráfico 14. Comparativa de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en la muestra CHSQ-4. ....	48
Gráfico 15. Comparativa de Cu en la muestra CHSQ-4. ....	49
Gráfico 16. Comportamiento de Zn en la muestra CHSQ-3.....	51
Gráfico 17. Comportamiento de Pb en la muestra CHSQ-3.....	52
Gráfico 18. Comportamiento de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en la muestra CHSQ-3.....	53
Gráfico 19. Comportamiento de Cu en la muestra CHSQ-3.....	53
Gráfico 20. Comportamiento de Zn en la muestra CHSQ-4.....	54
Gráfico 21. Comportamiento de Pb en la muestra CHSQ-4.....	55
Gráfico 22. Comportamiento de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en la muestra CHSQ-4.....	56
Gráfico 23. Comportamiento de Cu en la muestra CHSQ-4.....	57
Gráfico 24. Comportamiento de Zn en CHSQ-3 + 10% de BIO.....	73
Gráfico 25. Comportamiento de Pb en CHSQ-3 + 10% de BIO.....	73
Gráfico 26. Comportamiento de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en CHSQ-3 + 10% de BIO.....	74
Gráfico 27. Comportamiento de Cu en CHSQ-3 + 10% de BIO.....	74
Gráfico 28. Comportamiento de Zn en CHSQ-3 + 30% de BIO.....	75
Gráfico 29. Comportamiento de Pb en CHSQ-3 + 30% de BIO.....	75
Gráfico 30. Comportamiento de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en CHSQ-3 + 30% de BIO.....	76

Gráfico 31. Comportamiento de Cu en CHSQ-3 + 30% de BIO. ....	76
Gráfico 32. Comportamiento de Zn en CHSQ-4 + 10% de BIO. ....	77
Gráfico 33. Comportamiento de Pb en CHSQ-4 + 10% de BIO. ....	77
Gráfico 34. Comportamiento de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en CHSQ-4 + 10% de BIO. ....	78
Gráfico 35. Comportamiento de Cu en CHSQ-4 + 10% de BIO. ....	78
Gráfico 36. Comportamiento de Zn en CHSQ-4 + 30% de BIO. ....	79
Gráfico 37. Comportamiento de Pb en CHSQ-4 + 30% de BIO. ....	79
Gráfico 38. Comportamiento de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en CHSQ-4 + 30% de BIO. ....	80
Gráfico 39. Comportamiento de Cu en CHSQ-4 + 30% de BIO. ....	80
Gráfico 40. Comportamiento de Zn en CHSQ-3 + 10% de BIO. ....	83
Gráfico 41. Comportamiento de Pb en CHSQ-3 + 10% de BIO. ....	83
Gráfico 42. Comportamiento de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en CHSQ-3 + 10% de BIO. ....	84
Gráfico 43. Comportamiento de Cu en CHSQ-3 + 10% de BIO. ....	84
Gráfico 44. Comportamiento de Zn en CHSQ-3 + 30% de BIO. ....	85
Gráfico 45. Comportamiento de Pb en CHSQ-3 + 30% de BIO. ....	85
Gráfico 46. Comportamiento de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en CHSQ-3 + 30% de BIO. ....	86
Gráfico 47. Comportamiento de Cu en CHSQ-3 + 30% de BIO. ....	86
Gráfico 48. Comportamiento de Zn en CHSQ-4 + 10% de BIO. ....	87
Gráfico 49. Comportamiento de Pb en CHSQ-4 + 10% de BIO. ....	87
Gráfico 50. Comportamiento de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en CHSQ-4 + 10% de BIO. ....	88
Gráfico 51. Comportamiento de Cu en CHSQ-4 + 10% de BIO. ....	88
Gráfico 52. Comportamiento de Zn en CHSQ-4 + 30% de BIO. ....	89
Gráfico 53. Comportamiento de Pb en CHSQ-4 + 30% de BIO. ....	89
Gráfico 54. Comportamiento de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en CHSQ-4 + 30% de BIO. ....	90
Gráfico 55. Comportamiento de Cu en CHSQ-4 + 30% de BIO. ....	90

## 1. INTRODUCCIÓN

Una parte fundamental dentro de un proyecto minero es todo lo relacionado al impacto medioambiental, por lo que mientras menos impacto al medioambiente se produzca antes, durante y después de la explotación, será más beneficioso, ya sea para la aprobación de un proyecto o para prevenir el posterior efecto adverso que este produzca.

Ahora bien, así como es de importancia mencionar todos los beneficios que conlleva la ejecución de los proyectos mineros, también es relevante hacer reconocimiento a todos los impactos negativos que lleva consigo el realizar este tipo de actividad, puesto que la minería, a lo largo de todo su proyecto, desprende grandes cantidades de desechos y contaminantes que evidentemente no son beneficiosos para el medioambiente. Constantemente hasta la actualidad se ha pretendido solucionar o minimizar estos problemas ambientales, con el fin de causar el menor impacto a los ecosistemas, no obstante, la explotación de recursos metálicos produce contaminación por metales pesados, que afectan directamente tanto a los suelos como a las aguas subterráneas o superficiales que están en las minas o en su entorno.

Si bien, el mundo de la minería está en una incesante búsqueda para lograr que ésta sea más sustentable, existe la problemática de que cada yacimiento tiene sus propiedades particulares, ya sea, por la geología, geografía, topografía o incluso por los diferentes métodos de explotación utilizados para cada caso en particular, en consecuencia, no se logra obtener un método general para solucionar la problemática, sin embargo, en este sentido se busca la solución del problema para mineras que tienen extracción de recursos metálicos.

Por este motivo es que en este trabajo se estudia la posibilidad de disminuir la contaminación proporcionada por la minería metálica utilizando una enmienda natural para la remediación de suelos contaminados por metales pesados en localidades ubicadas en la provincia de Ciudad Real, en la comunidad autónoma de Castilla-La Mancha en España, puesto que, en esta localidad al igual que en Chile se ha explotado la minería metálica.

Para la presente memoria se efectuaron tres estudios diferentes, con un mismo enfoque, donde para un primer estudio se utilizaron muestras ya existentes, pertenecientes a una localidad llamada Almadenejos que se encontraban en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Minera e Industrial de Almadén (EIMIA). En este caso, se estudia el impacto que puede tener el Biorreparador en las concentraciones de Hg presentes en ellas. Por otro lado, para un segundo y



tercer estudio, se utilizan muestras tomadas de una antigua mina abandonada de Pb/Zn que lleva por nombre San Quintín, estos estudios están enfocados a la efectividad del Biorreparador en la presencia de metales pesados presentes en las muestras.

Todos los estudios realizados permiten apreciar el efecto del Biorreparador en las muestras de suelo utilizadas, si bien, los ensayos realizados son a escala reducida permitirán obtener conclusiones respecto a una escala mayor y así poder considerar estudios más concretos o con más información al respecto.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo General**

Evaluar la aplicación de Biosurfactante Natural Enzimático llamado Petra-Zyme para la remediación de suelos contaminados con metales pesados a través de la modificación de su movilidad ambiental.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Obtener muestras de suelos en una antigua mina abandonada de Pb/Zn que lleva por nombre San Quintín.
- Preparar las muestras de suelos de forma adecuada para su posterior análisis y realización de los ensayos.
- Determinar la presencia de Hg total soluble en agua en las muestras recolectadas mediante un test de lixiviación con  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ .
- Aplicar como enmienda natural el Biosurfactante en las muestras de suelos y con diferentes proporciones para evaluar su efectividad.
- Cuantificar parámetros como la conductividad eléctrica y pH de las muestras de suelo que permitan evaluar el efecto de la enmienda en función del tiempo.

## 1.2 Alcances y limitaciones del trabajo

Los resultados obtenidos en los estudios de laboratorio se hacen bajo circunstancias determinadas y en el contexto de un trabajo meramente académico, por lo que deben ser tomados con cautela. Los alcances y limitaciones del trabajo pueden verse afectadas por:

- La utilización del agua del grifo para la disolución del Biorreparador se lleva a cabo por recomendaciones del fabricante, ya que, este tipo de agua utilizada contiene bacterias que no posee el agua desionizada y que logran una mayor efectividad de la enmienda, es importante mencionar que, no se tiene un estudio previo a esta aseveración.
- La utilización de este Biorreparador como enmienda en la contaminación de suelos no tiene un estudio previo realizado, por lo que estos experimentos incentivan a futuras investigaciones.
- El primer experimento de la medición de Hg total con las muestras WUAJ2 nuevo, WUAJ2 antiguo y NC1 en su estado original, solo se realiza una vez y no tiene una repetición ya que la cantidad de muestras existentes en el laboratorio era limitada.
- Las muestras de los ensayos se emplean con su humedad higroscópica, es decir, el contenido de agua se encuentra en equilibrio con la atmosfera en la que están almacenadas.
- El tiempo de ejecución de cada estudio realizado se encuentra acotado debido a que la duración de la estancia en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Minera e Industrial de Almadén fue de dos meses.

## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1 Condición de los suelos**

Los suelos con una buena calidad poseen propiedades físicas y biológicas adecuadas para sostener la productividad, mantener la calidad del medio ambiente y promover la sanidad de plantas y de animales (PennState Extension, 2023).

El término “calidad del suelo” se comenzó a acotar para las diferentes funciones del suelo, como lo son: (1) Promover la productividad del sistema sin perder las propiedades físicas, químicas y biológicas (Productividad biológica sostenible); (2) Atenuar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental); y (3) Favorecer a la salud de plantas, animales y seres humanos (Doran y Parkin, 1994; Karlen et al., 1997; Cruz et al., 2004).

La degradación en la calidad de los suelos es una inmutable amenaza para el futuro de una sociedad, es por este motivo que, constantemente se tiene como reto salvaguardar y aumentar la calidad de los suelos (Cruz et al., 2004).

### **2.2 Contaminación de suelos**

Aparece cuando la concentración de contaminantes en la superficie es tan alta que daña la biodiversidad del suelo y pone en riesgo nuestra salud a través, sobre todo, de la alimentación. La contaminación del suelo es una amenaza global, especialmente grave en regiones como Europa, Eurasia, Asia y África del Norte, como revela la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (Iberdrola, 2022).

Hoy en día se presta cada vez más atención a la contaminación que se produce por compuestos de tipo inorgánico, y en particular aquella derivada de la adición de metales pesados al suelo. Estudios necesarios hoy en día son los relativos al efecto negativo sobre la calidad de los suelos cuando se incorporan contaminantes como los metales pesados (García et al., 2002).

## 2.3 Contaminación por metales pesados

Una definición práctica de metal pesado, aparte de la más específicamente química, sería la de clasificar como tales aquellos que por sus efectos tóxicos y persistencia son considerados como contaminantes ambientales, y es la actividad humana principalmente lo que va a incrementar las cantidades de estos metales creando problemas medioambientales (García et al., 2002).

Hay varias acciones que podrían influir en la cantidad de metales pesados que se encuentren en los suelos, una de ellas en la actividad minera, donde dentro de ellas se encuentran actividades como la extracción, el transporte y almacenamiento de los residuos mineros. Además, el polvo generado por estas actividades podría producir contaminación por metales incluso a kilómetros de distancia.

La minería es una fuente potencial de contaminación de elementos traza tóxicos. La concentración de los elementos traza tóxicos, como el Pb, Cd y Hg, en el suelo y en el ecosistema depende de la degradación del material parental, condiciones geográficas, características químicas del suelo y actividades abióticas y antropogénicas, (Hussain et al., 2018). La minería, especialmente la del carbón, aumenta significativamente la concentración de elementos traza tóxicos (Martinez, 2021).

### 2.3.1 Mercurio

El mercurio es un metal pesado que está incorporado en la corteza de la Tierra de forma totalmente natural, pudiendo darse concentraciones elevadas en sectores puntuales de ésta. Además, el elemento lo podemos encontrar en termómetros viejos, ampollitas de luz fluorescente o en algunos interruptores eléctricos (Agencia de protección ambiental de Estados Unidos, 2023).

El mercurio es considerado un contaminante a escala mundial, debido a su persistencia en el medio ambiente, su toxicidad, su capacidad de biomagnificación y de acumularse en los organismos y en el medio. Además, el mercurio en el medio ambiente se encuentra en constante flujo entre los distintos compartimentos ambientales: suelo-aire-agua. De los suelos pasa a la atmósfera por volatilización y a las aguas por lavado y arrastre (Caiza, 2018).

Los lugares con altas concentraciones comprobadas de mercurio (zonas mineras críticas), son fuentes importantes de dispersión del mercurio en los sistemas acuáticos y contribuyen a la contaminación por metilmercurio  $[\text{CH}_3\text{Hg}]^+$ , que es mucho más tóxico que el mercurio elemental y

las sales inorgánicas. La contaminación por este complejo químico organometálico alcanza los peces, la fauna y flora silvestres, con los efectos consiguientes en la vida de miles de personas, tanto de las que participan directamente en las actividades mineras como de las que viven en las cercanías (Cano, 2012).

El mercurio se encuentra presente frecuentemente en minas de carbón y oro, es por este motivo que, en países donde se encuentren este tipo de actividades mineras deberían implementarse medios de prevención o de detección para las altas concentraciones de mercurio, ya que estas son muy nocivas para la salud del ser humano y además nocivas para el ecosistema.

### **2.3.2 Plomo**

El plomo es otro de los metales pesados, este reacciona con ácidos formando sales ácidas, pero también con bases formando sales metálicas y óxidos. Asimismo, el Pb forma aleaciones con muchos metales como el arsénico, cobre, estaño, entre otros. Cabe resaltar que este elemento es extremadamente tóxico e incluso ha causado envenenamiento en trabajadores del área industrial por su exposición excesiva y mal manejo.

A valores altos de pH el Pb puede precipitar como hidróxido, fosfato y carbonato; a valores bajos de pH, este elemento se solubiliza muy lentamente (Kabata-Pendías, 1992; Berti y Scott, 1997; Lofts, et ál., 2005). La materia orgánica llega a ser la fase sólida de más influencia en el proceso de adsorción de este elemento (Howard y Sova, 1993). Otros estudios reportan que el Pb se asocia principalmente a minerales de arcilla, óxidos de Fe-Mn, hidróxidos de Fe-Al y a la materia orgánica (Kabata-Pendías, 1992 Nolan, et ál., 2003; Gómez & Barreto, 2011).

### **2.3.3 Hierro**

El hierro es uno de los elementos más frecuentes en las rocas y en los suelos agrícolas, además, los óxidos de hierro son los óxidos metálicos más abundantes en el suelo (Schwertmann y Taylor, 1989). El color del suelo y, en consecuencia, la diferenciación visual de los horizontes del perfil se relaciona, frecuentemente, con la forma y composición de los depósitos de óxidos e hidróxidos de hierro cuyo contenido en el suelo suele expresarse en porcentajes (Acevedo-Sandoval et al., 2004), y que confiere al suelo características tonalidades rojizas y amarillentas.

Los óxidos de hierro en el suelo son importantes, ya que no existe prácticamente un suelo donde no se encuentren, aunque sea en pequeñas cantidades, puesto que, demasiado hierro es tóxico

para el cuerpo humano, causando un envenenamiento e incluso algunas personas sufren de una enfermedad llamada hemocromatosis (Medline Plus, 2021).

La precipitación del hierro a partir de una solución iónica puede lograrse por elevación del pH o por oxidación del hierro ferroso en solución, debido a que el producto de solubilidad del hidróxido férrico es mucho más bajo que el del hidróxido ferroso (Taylor, 1990; Acevedo-Sandoval, 2004).

Los óxidos de hierro se forman rápidamente por disolución en pH bajos y, una vez que las condiciones del suelo se estabilizan, la disolución es extremadamente lenta. La disolución del hierro es originada cuando el Fe (III) es reducido a Fe (II) por la transferencia de electrones, dada por la condición deficiente de oxígeno (Acevedo-Sandoval et al., 2004).

#### **2.3.4 Zinc**

El zinc es uno de los elementos más comunes en la corteza terrestre. En su forma pura elemental (o metálica), el Zn es un metal brillante de color blanco-azulado. El Zn entra al aire, el agua y el suelo como resultado tanto de procesos naturales como actividades humanas. La mayor parte del Zn que entra al ambiente es el resultado de la minería, la refinación de minerales de Zn, plomo y cadmio, la producción de acero, la incineración de carbón y de desperdicios (ATSDR, 2016).

El exceso de zinc en las plantas puede provocar deficiencia de otros nutrientes esenciales que tengan radios iónicos similares (Bankaji et al., 2019). También a concentraciones altas puede llegar a perturbar la fotosíntesis, la transpiración y varios otros procesos fisiológicos esenciales como, por ejemplo, una disminución en el crecimiento de las plantas (Jiménez & Rodríguez, 2022).

#### **2.3.5 Cobre**

El cobre es un metal que en un principio no es un problema en el medio ambiente (suelo, aire y agua) ya que es un micronutriente, parte del metabolismo de los organismos vivos y puede estar fuertemente adherido a la materia orgánica, materia y arcilla del suelo (ATSDR, 2004, Jiménez & Rodríguez, 2022).

En suelos con valores altos de pH, puede precipitar como sulfuro, carbonato e hidróxido, lo que indica que el elemento tiene poca movilidad (Kabata-Pendías, 1992; Lombi et al., 2003; Nolan et al., 2003; Lofts et al., 2005; Karlsson et al., 2006; Tsang and Lo, 2006). Aunque este elemento

tiene gran afinidad por la materia orgánica del suelo, su distribución depende básicamente del pH, de la abundancia y de la composición de la materia orgánica y de la fracción mineral (Lofts et al., 2005) (Gómez & Barreto, 2011).

En los seres vivos el cobre puede causar efectos adversos por inhalación, ingestión y contacto (ATDSR, 2004), así como impactos ambientales como reducción de la biodiversidad y disminución del crecimiento y actividad enzimática de los organismos (Jiménez & Rodríguez, 2022).

## **2.4 Minas abandonadas**

Las minas abandonadas son una problemática a nivel mundial, puesto que, llevan consigo una gran cantidad de contaminantes incluso al momento de finalizar su explotación.

En los últimos años se está despertando un creciente interés acerca de la contaminación derivada del abandono de minas. (Ramos, 2010).

Una faena minera abandonada es un lugar donde alguna vez se trabajó en la extracción de un mineral preciado. Cuando éste se agotó, y la faena simplemente se abandonó ese proceso se puede realizar sin tomar las medidas necesarias, y eso representa un riesgo para la población (Ramos, 2010).

Además, la problemática generada por la minería metálica afecta directamente a diferentes países a nivel mundial, entre ellos se encuentra España, lo que permite advertir que sucede con la contaminación generada por el abandono de los proyectos mineros en localidades de este país y extrapolarlo a los demás países que contienen el mismo tipo de explotación.

### **2.4.1 Yacimiento de Almadén**

El distrito minero de Almadén se extiende a lo largo de un área de unos 300 [km<sup>2</sup>] en Ciudad Real, España. Actualmente se está realizando una muy importante restauración medioambiental en el interior de las antiguas instalaciones mineras y en su entorno.

En la zona de Almadén se encuentran distintos yacimientos de mercurio dentro de los cuales se encuentran: El entredicho, Las Cuevas, La Concepción vieja y la Nueva Concepción. (Altolaquirre et al., s.f)

### **2.4.2 Minas abandonadas San Quintín**

Las antiguas minas de San Quintín constituyen una de las mejores muestras del patrimonio minero e industrial y se ubican en la comarca del Valle de Alcuía en la provincia de Ciudad Real. La importancia que adquirieron las minas de San Quintín fomentó la construcción de un asentamiento humano que contó con más de 1.000 residentes a finales del siglo XIX (Sanz, 2020).

La mina estuvo en actividad entre los años 1888 y 1923, siendo operado por la Sociedad Minero-Metalúrgica de Peñarroya (SMMPE). Se produjeron unas 515.000 t de concentrados de galena, de las cuales el 46,5% correspondieron a la producción de la mina San Froilán, el 23,7% al filón Consecuencia, y el 29,8% restante, a la mina Don Raimundo. Con posterioridad, entre los años 1973 y 1988, la SMMPE llevó a cabo el relavado de las antiguas balsas de lodos (relaves), estimadas en unos 3 millones de toneladas, con altos contenidos en zinc, metal sin apenas interés en la época de la explotación principal.

Los yacimientos poseen una mineralogía compleja, y engloba varias fases mineralizadoras, todas ellas típicamente hidrotermales, de temperaturas intermedias a bajas. Palero (1991) diferencia cinco fases mineralizadoras:

- Fase precoz, con pirita, parcial o totalmente reemplazada por marcasita y calcopirita, cuarzo, pirrotina y siderita.
- Fase argentífera, con cobres grises, bournonita, boulangierita y pirita.
- Fase BPGC o Principal, con galena (que es el mineral principal en el yacimiento), ankerita, calcopirita y pirita.
- Fase tardía inicial, con esfalerita (bastante abundante), pirita, calcopirita, cuarzo, marcasita y ankerita.
- Fase tardía póstuma, con pirita, barita, calcita y cuarzo (Higueras et al., 2010).

Son muchos los factores que evidencian la necesidad de restaurar esta histórica zona minera. Por un lado, las balsas de lodos que han acumulado los restos de la explotación y lavado de mena y escombreras, se evidencia, la necesidad de una restauración de estos depósitos encaminada a conseguir su estabilidad físico-química, para evitar problemas de dispersión de contaminantes químicos por lixiviación, infiltración y escorrentía (Universidad Rey Juan Carlos, 2010).



### **3. METODOLOGIA**

El presente informe tendrá como finalidad la utilización de un Biosurfactante Natural Enzimático (Biorremediador) llamado Petra-Zyme para la remediación o inmovilización de metales pesados en diferentes muestras de suelos, a las cuales se les realizan dos estudios bases diferentes y un tercer estudio complementario para lograr visualizar el efecto de esta enmienda en la reducción de la contaminación que estos metales producen.

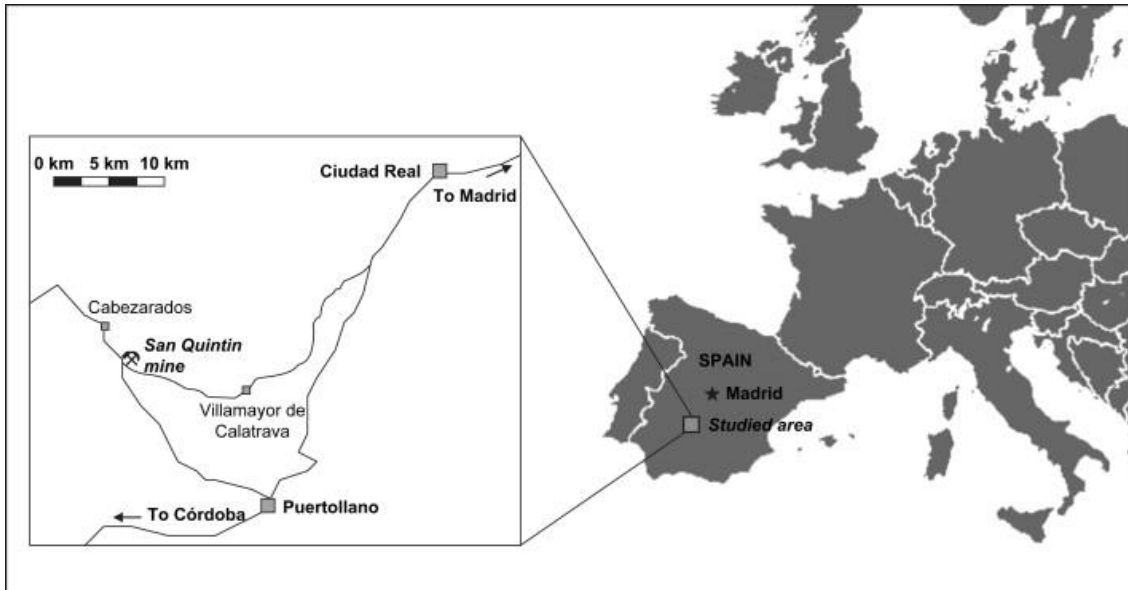
Aun cuando se realizan tres estudios diferentes, estos llevan consigo un mismo procedimiento general, además de mantener un mismo objetivo principal. Para estos estudios, se llevan a cabo diferentes etapas para que los resultados sean acertados y tengan mayor variabilidad, estos procedimientos se detallan a lo largo del informe.

#### **3.1 Muestreo**

En el primer experimento se utilizaron muestras de suelo ya existentes en el laboratorio, procedentes de un pueblo llamado Almadenejos, ubicado en la provincia de Ciudad Real en la comunidad autónoma de Castilla-La Mancha, España, por consiguiente, no es necesario realizar un muestreo para este caso de estudio. Estas muestras mencionadas llevan por nombre técnico WUAJ2 antiguo y WUAJ2 nuevo, ambas pertenecientes al mismo sector, pero presentan diferentes concentraciones de Hg, otra muestra, llamada Nueva Concepción, a la cual se le llama técnicamente NC1, cabe destacar que, se conocía el dato de tener una alta concentración de Hg.

Para el segundo y tercer experimento, se debe conocer la ubicación del caso de estudio, además de preparar los equipos necesarios para la toma de muestras y finalmente trasladarse al sector de interés que, en este caso, es la antigua mina de Pb/Zn llamada San Quintín, situada a unos 50 [km] al Este de Almadén.

Al momento de llegar a este sector se procede a tomar cuatro muestras de suelo de diferentes sectores de esta antigua mina abandonada ubicada a 2 [Km] al sur de Cabezardos, en la provincia de Ciudad Real, España (véase ilustración 1). El muestreo comienza por el sector Oeste de ésta para tomar dos muestras representativas cuyas ubicaciones son en una balsa de acumulación de finos y la otra en un sedimento de fondos en una charca de agua ácida. Posterior a esto, se trasladan todos los equipos al sector Este de la mina, donde se recogen otras dos muestras, una de una galería de drenaje de agua ácida y otra a unos 50 [m] aguas debajo de dicha galería (véase ilustración 2). A estas muestras se les otorga un nombre técnico los cuales se pueden observar en la tabla 1.



**Ilustración 1. Localización mina San Quintín elaborado por (Rodríguez et al., 2009).**

**Tabla 1. Nombres técnicos de cada muestra.**

Nombre de la Muestra	Nombre técnico
Balsa de acumulación de finos	CHSQ-1
Charca de agua ácida	CHSQ-2
Galería de drenaje de agua ácida	CHSQ-3
Aguas debajo de galería de drenaje	CHSQ-4



**Ilustración 2. Fotografías representativas de las zonas de toma de muestra.**

Asimismo, para efectuar este procedimiento se deben considerar una serie de materiales los cuales son fundamentales para llevar a cabo este procedimiento de manera efectiva, estos son:

- Barrena de suelo de la marca Ejkelkamp.

- GPS portátil GPSmap 62 st.
- Bolsas de almacenamiento de muestras.
- Cucharilla.
- Marcadores para identificar la muestra.
- Implementos de limpieza (Etanol, papel de limpieza, agua destilada).

Hay que mencionar también que CHSQ-1 fue extraída con el instrumento barrena de suelo de la marca Ejkelkamp a unos 40 [cm] de la superficie del suelo, mientras que CHSQ-2, CHSQ-3 Y CHSQ-4 fueron extraídas desde la superficie a unos 15 [cm] con una cucharilla, de estas muestras se extrajo aproximadamente 400 [g] y se depositaron en bolsas de plásticos especiales para la recopilación de muestras.

Además, a cada una de las muestras se les toma las coordenadas con un GPS portátil de marca Garmin, modelo GPSmap 62 st, para tener la ubicación exacta de las mismas (véase tabla 2).



**Ilustración 3. A: Barrena de suelo de la marca Ejkelkamp; B: GPS portátil GARMIN GPSmap 62 st.**

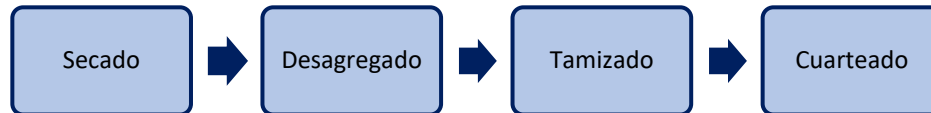
**Tabla 2. Coordenadas GPS de las muestras de interés.**

Nombre de la muestra	Coordenadas GPS	
CHSQ-1	30 S 0388099	UTM 4297298
CHSQ-2	30 S 0388334	UTM 4297045
CHSQ-3	30 S 0389140	UTM 4297744
CHSQ-4	30 S 0389119	UTM 4297701

### 3.2 Preparación de muestras

Una vez en el laboratorio, para la preparación de las muestras de suelo que se utilizan en el segundo y tercer experimento, se deben seguir ciertos pasos, los cuales son fundamentales para posteriormente poder trabajar con estas muestras de una forma más efectiva. Cabe destacar que, para

la manipulación de estas muestras se deben utilizar los equipos de protección personal (EPP) requeridos para esta situación los cuales son: bata de laboratorio, guantes y la mascarilla de polvo. Los pasos por seguir se pueden observar en la siguiente ilustración 4 y posteriormente serán detallados.



**Ilustración 4. Pasos para el tratamiento de las muestras.**

### **3.2.1 Secado**

Para comenzar, las muestras de suelo deben estar lo suficientemente secas, es decir, haber perdido su humedad ambiente, para poder trabajar de manera eficiente con ellas, como las muestras de suelo que se utilizan en el primer estudio ya pertenecían al laboratorio, llevaban una cantidad de tiempo considerable como para asumir que estaban con una humedad higroscópica, es decir, estaban en equilibrio con la atmosfera en la que se encuentran (véase ilustración 5). Asimismo, las muestras utilizadas en el segundo y tercer estudio se depositan en el almacén de muestras del laboratorio del EIMIA para su proceso de secado a temperatura ambiente, este proceso de secado tendrá una duración de alrededor de 4 semanas. Se evita el uso de estufas de secado para limitar la pérdida de mercurio, elemento de reconocida volatilidad.



**Ilustración 5. Muestras depositadas en el almacén del laboratorio para su proceso de secado.**

### 3.2.2 Desagregado

Teniendo las muestras ya secas, se procede a pasar un rodillo por encima para así deshacer los trozos que estén más compactos. Una vez realizado este proceso podremos observar e identificar los residuos y fragmentos orgánicos (raíces, hojas) y los fragmentos de roca más grandes, que proceden a retirarse al no ser de interés en este estudio (véase ilustración 6).



**Ilustración 6. Muestra ya depositada en el mantel de laboratorio para su posterior desagregación.**

### 3.2.3 Tamizado

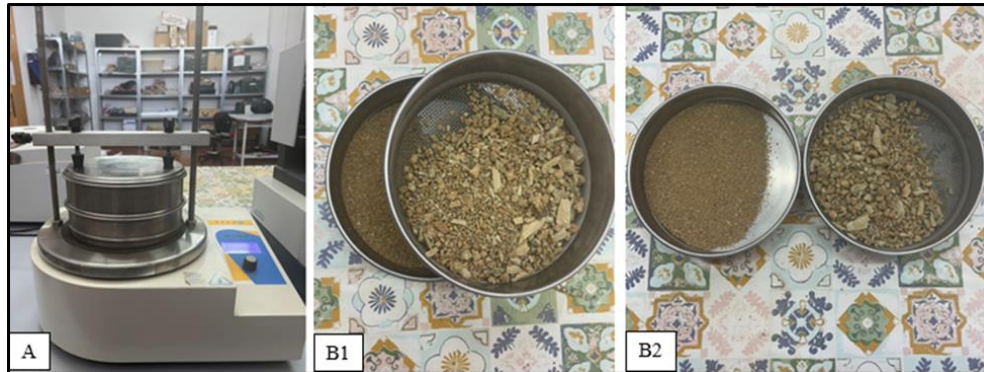
En este procedimiento se utiliza un tamiz con malla de 2.00 [mm] en el cual se deposita la muestra resultante del paso anterior (véase ilustración 7).



**Ilustración 7. A: Tamiz con malla de 2.00 [mm]; B: Tamiz con muestra de interés.**

Luego de tener la muestra depositada en el tamiz, esta se lleva al equipo de vibración RP 200 N, el cual tiene como objetivo agitar la muestra por un tiempo de 1 [min] y una amplitud de 1 [mm], esto permite que por encima de la malla queden los fragmentos superiores a 2 [mm] y por debajo de

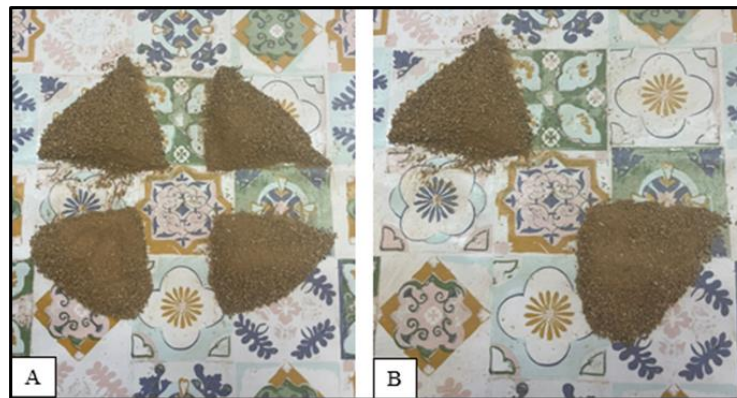
esta los fragmentos inferiores a 2 [mm], este último es de principal interés y se utiliza en el siguiente paso (véase ilustración 8). La fracción mayor se descarta.



**Ilustración 8. A: Tamiz depositado en el equipo RP 200 N; B1 y B2: Tamizado final con fragmentos superiores a 2.00 [mm] por sobre la malla y fragmentos inferiores por debajo de la malla.**

### 3.2.4 Cuarteado

Ya cumplido el paso anterior se depositan los fragmentos inferiores a 2 [mm] en el mantel de laboratorio y se fracciona en cuatro partes iguales, de estas cuatro partes será tomado el 50 [%] de la muestra, es decir, se toman dos partes de dos extremos opuestos, para así lograr obtener una muestra representativa más homogénea (véase ilustración 9).



**Ilustración 9. A: muestra fraccionada en cuatro partes aproximadamente iguales; B: Dos muestras sobrantes luego de que el 50 [%] de interés ya fuese tomado.**

Luego de realizar el cuarteado se obtiene el 50 [%] de la muestra original y si se percibe que la cantidad de muestra es pequeña se repite el paso obteniendo un 25 [%] más de la muestra inicial y con esto se conseguirá una mayor cantidad de muestra deseada.

Es importante mencionar que, cada vez que se realice una preparación de muestras, se deben limpiar cada uno de los implementos utilizados con etanol, así se logrará evitar la contaminación entre las propias muestras o al menos se minimizaría este riesgo.

Asimismo, es importante tener en consideración que, a diferencia del primer estudio, en el segundo y tercer experimento las muestras son tomadas cercanas al momento de realizar el ensayo, es decir, contienen un gran contenido de humedad.

### **3.3 Materiales**

Para la realización de estos tres experimentos se debe tener en cuenta la enmienda utilizada, la cual en este caso es el Biosurfactante Natural Enzimático llamado Petra-Zyme, este producto se utiliza como inmovilizador de metales potencialmente tóxicos al medioambiente.

Este Biorreparador es un agente enmendante que limpia y remueve residuos de petróleo, aceites, productos aceitosos y recupera suelos contaminados por metales (Substrata, 2022), si bien no se tiene mucha información respecto a su composición se sabe que este producto es 100 [%] natural, no es toxico, no es inflamable, no es explosivo, no es corrosivo y además no afecta a la salud humana, animal o vegetal.

Como información adicional, el producto mencionado en el apartado anterior no tiene consigo bacterias que puedan intervenir en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, por lo cual, para que ataque correctamente a suelos potencialmente contaminados el fabricante recomienda que se utilice en una disolución de 1:10 junto al agua de grifo, esto ya que esta contiene las bacterias necesarias que el agua destilada no posee y además hará que el Biosurfactante actúe de manera adecuada frente a los elementos contaminantes (véase ilustración 10).



**Ilustración 10. Disolución del Biorreparador junto al agua de grifo.**

Una vez obtenida esta disolución se procede a mezclar con las muestras de suelo, las cuales tendrán distintas proporciones para cada estudio, como en el primer experimento se tiene una escasa cantidad de muestra es que se utiliza solo un 10 [%] de disolución respecto al peso de la muestra, por otra parte, se utilizó un 10 y 30 [%] para el segundo y tercer experimento, ya que, en este caso se tiene una cantidad de muestra suficiente.

### **3.4 Proceso experimental**

En este apartado se explica que procesos se llevan a cabo para poder efectuar los tres experimentos con éxito, ya que, para cada experimento se utilizan distintos métodos y se obtienen distintos resultados.

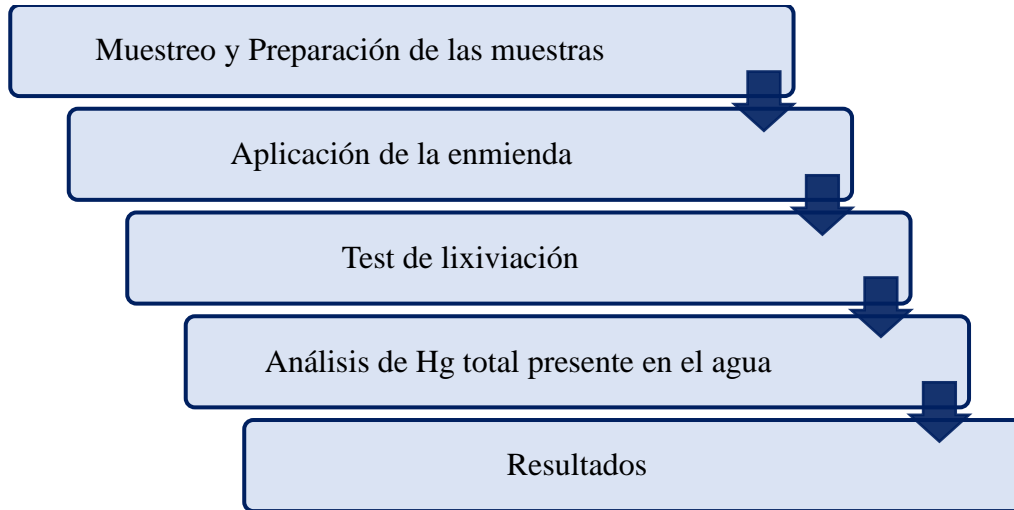
#### **3.4.1 Primer Estudio: Fijación de Mercurio total por el Biosurfactante en muestras de suelo.**

En este primer estudio se utilizan muestras contaminadas con mercurio, pertenecientes a las localidades de Almadenejos y Nueva Concepción, ubicadas en la provincia de Ciudad Real en España.

A las muestras de la localidad de Almadenejos se les otorgó un nombre técnico de WUAJ2 antiguo y WUAJ2 nuevo y NC1 para las muestras de Nueva Concepción, es importante mencionar que, las muestras de Almadenejos pertenecen al mismo sector, pero poseen concentraciones de Hg totalmente diferentes, es por esta razón que, se consideran como dos muestras aparte.



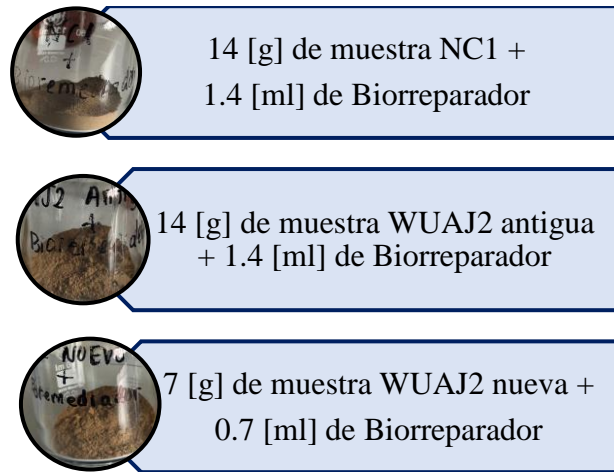
Para la realización de este primer estudio se efectuaron ciertos procesos indicados a continuación a las muestras de suelo anteriormente mencionadas ya existentes en el laboratorio del EIMIA (véase ilustración 11).



**Ilustración 11. Procesos por efectuar para la realización del primer experimento.**

Para comenzar de lleno con los objetivos de este experimento, se debe aplicar el Biosurfactante Natural Enzimático (Biorremediador) llamado Petra-Zyme como enmienda natural en las muestras de suelo potencialmente contaminados con metales pesados.

Ya teniendo la disolución de la enmienda natural (véase apartado de dispositivos experimentales), se aplica esta enmienda a la muestra de suelo en un 10 [%]. Es importante mencionar en este caso que, debido a la escasa muestra de suelo que se tiene, en cada ensayo se utilizan distintos gramajes, pero considerando una misma proporción (véase ilustración 12). También, para efectos del experimento, es adecuado monitorear y agitar la muestra todos los días para mejorar el contacto entre la muestra y el producto, como alternativa al empleo de tiempos de contacto más prolongados. Además, se debe considerar que, se realiza una cuantificación a la muestra sin la aplicación de la enmienda e inmediatamente posterior a esto se realiza una medición a la muestra con la aplicación del Biosurfactante, esto para comprobar si la enmienda natural tiene consigo un efecto inmediato en la disminución de la concentración móvil de Hg, posterior a esto, se realizan las cuantificaciones cada 7 días con un periodo total del estudio de 28 días.



**Ilustración 12. Cantidades de muestra y Biorreparador utilizadas en el experimento.**

### 3.4.1.1 Test de lixiviación con Acetato de Amonio

El siguiente paso es realizar un test de lixiviación con  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ , el cual permite una mejor extracción del Hg con mayor movilidad, tanto para las muestras en su estado original como para las tratadas con el Biosurfactante. Esta disolución de acetato de amonio debe estar a un pH de 7 (Véase Anexo A) y una concentración 1 [M], luego se debe de poner en contacto una cantidad de 5 [g] de suelo (<2[mm]) con 100 [ml] de dicha solución. Para las muestras mezcladas con el 10 [%] de Biorreparador se utilizan medidas diferentes, pero siempre con las mismas proporciones, esto por la escasez de muestra que se tiene, las medidas utilizadas para las muestras sin enmiendas se pueden observar en la tabla 3 y para las muestras con la aplicación del Biosurfactante en un 10 [%] se pueden observar en la tabla 4.

Una vez aplicado el acetato de amonio al suelo, se agita a 50 [rpm] a temperatura ambiente durante 2 [hrs] en un baño de agitación (véase ilustración 13).

**Tabla 3. Parámetros para la realización del test de lixiviación a las muestras sin enmienda.**

Nombre de la muestra	Cantidad de muestra [g]	Cantidad de $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ [g]	Cantidad de $\text{H}_2\text{O}$ [ml]
WUAJ2 Antiguo	5,00	7,71	100
WUAJ2 Nuevo	5,00	7,71	100
NC1	5,00	7,71	100

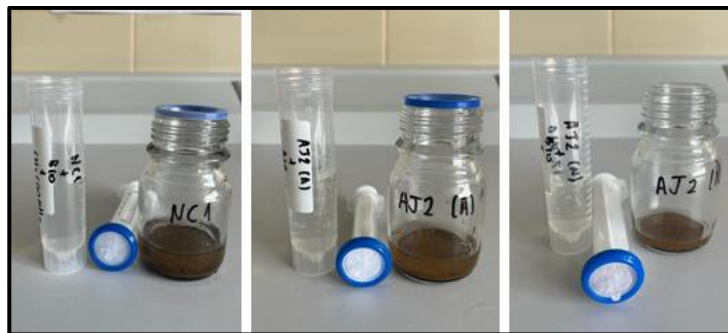
**Tabla 4. Parámetros para la realización del test de lixiviación a las muestras con enmienda.**

Nombre de la muestra	Cantidad de muestra [g]	Cantidad de CH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub> [g]	Cantidad de H <sub>2</sub> O [ml]
WUAJ2 Antiguo	2,00	3,08	40
WUAJ2 Nuevo	1,00	1,54	20
NC1	2,00	3,08	40



**Ilustración 13. Baño de agitación con sus parámetros a utilizar.**

Ya finalizado este procedimiento, el sobrenadante se filtra a través de filtros de 0,45 [µm] con la ayuda de jeringuillas y con este líquido resultante final se mide la concentración de Hg total. Este procedimiento se aplica para las 3 muestras en cuestión (véase ilustración 14).



**Ilustración 14. Resultados del test de lixiviación a las 3 muestras de interés.**

### 3.4.1.2 Análisis de Mercurio total presente en el agua

Para lograr cuantificar la cantidad de Hg disuelto presente en el agua, se utiliza un equipo analítico que consiste en un espectrómetro de absorción atómica con efecto Zeeman de marca LUMEX RA-915+ combinado con un pirolizador PYRO-915+, que eleva la temperatura a más de 800 [°C], evaporando la muestra y liberando el Hg en su forma elemental (véase ilustración 15), que finalmente será cuantificado por el equipo citado anteriormente. Además, el resultado obtenido será

trasladado a un *software* específico llamado RAPID (véase pasos para la utilización del equipo en Anexo B). Los parámetros bajo los cuales se cuantificó el Hg se pueden advertir en la tabla 4. Además, el equipo LUMEX RA-915+ resalta por poseer un análisis rápido, directo y con medidas bastantes exactas de las concentraciones de Hg en este tipo de muestras.

**Tabla 5. Parámetros bajo los cuales se utiliza el equipo LUMEX RA-915+.**

Parámetros	Cantidad
Temperatura	800 [°C]
Volumen de la muestra	100 [μL]
Flujo de aire en el pirolizador	3 (L/min)
Masa de arena sílicea (SP7)	80-90 [mg]



**Ilustración 15. Equipo LUMEX RA-915+.**

Para efectuar el procedimiento anterior es importante mencionar todos los elementos a utilizar, estos son:

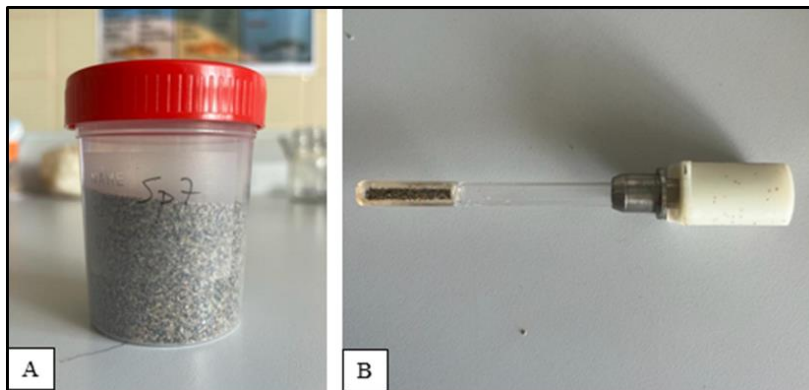
- LUMEX RA- 915+ combinado con una pirolizador PYRO-915+.
- Computador para utilización de *software* RAPID.
- Navecillas para las muestras.
- Muestras de referencia para la calibración del equipo (NIST 2710a).
- Muestras líquidas del filtrado resultante del test de lixiviación.
- Arenas síliceas (SP7).
- Báscula de precisión OHAUS (*Adventurer pro AV264C*).
- Cucharilla.

- Micropipeta transferpette.
- Etanol, guantes y en general equipos de limpieza.

### 3.4.1.3 Procedimiento para la cuantificación de Mercurio total.

Luego de hacer efectiva la calibración del Lumex (véase Anexo C), se utiliza el filtrado del test de lixiviación, el cual se deposita en tubos graduados fabricados en polipropileno de 50 [ml] y se procede a cuantificar el Hg total presente en el agua. Cabe destacar que se cuantifican las concentraciones de Hg móvil sin la aplicación de la enmienda para cada una de las muestras de suelo y luego cada 7 días se obtienen los resultados para las muestras con la aplicación del 10 [%] de Biorreparador, esto nos permite observar el comportamiento de la enmienda y como afecta en comparación con el estado inicial de esta.

Para llevar a cabo este procedimiento se utiliza una arena silíceica que lleva por nombre técnico SP7, esta es una arena de playa proveniente de la ciudad de Málaga, situada en la comunidad autónoma de Andalucía, España. Asimismo, esta arena contiene bajas concentraciones de Hg que incluso logran ser cantidades insignificantes, esto permite que no alteren los resultados de las mediciones obtenidas y, además, que la extracción que realiza el equipo sea más efectiva. El peso de SP7 en la navecilla será entre 80-90 [mg] aproximadamente, cubriéndose de forma homogénea toda la superficie de la navecilla con anterioridad a aplicar los 100 [ $\mu$ l] de la muestra de interés (véase Ilustración 16).



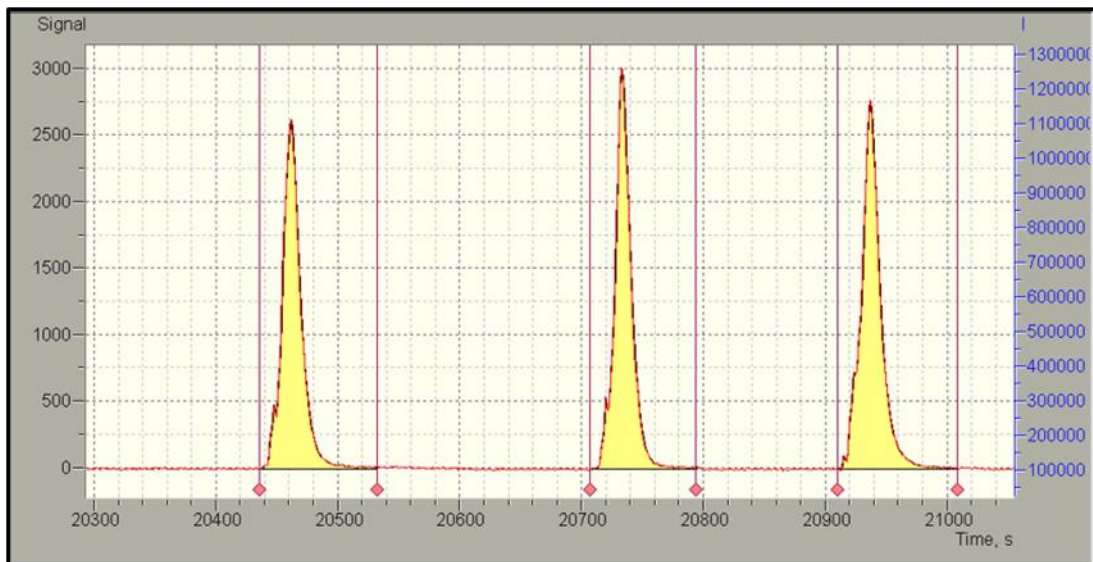
**Ilustración 16. A: Arena silíceica cuyo nombre técnico es SP7; B: Navecilla con superficie cubierta de SP7.**

Luego de tener la navecilla cubierta con la arena silíceica se depositan los 100 [ $\mu$ l] del filtrado obtenido con la ayuda de la micropipeta Trasferpette y se introduce la navecilla en la casilla de medición del LUMEX para su posterior cuantificación (véase Ilustración 17).

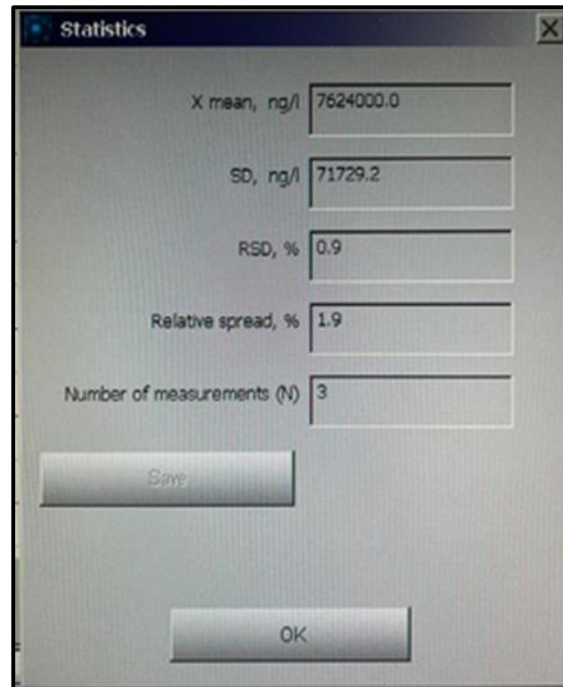


**Ilustración 17. Navecilla introducida en equipo LUMEX RA-915+.**

Este procedimiento se repetirá las veces que sea necesario hasta que se obtengan tres mediciones con una Desviación Estándar Relativa (RSD) inferior al 10 [%], esto ayuda a que la obtención de los resultados tenga un error mínimo. Además, con los resultados de estas tres mediciones logradas se obtendrá un promedio el cual será el resultado representativo de este experimento (véase Ilustraciones 18 y 19).



**Ilustración 18. Resultados de las 3 mediciones de Hg total a una muestra de interés.**



**Ilustración 19.** Estadísticas de las 3 mediciones tomadas a una muestra de interés.

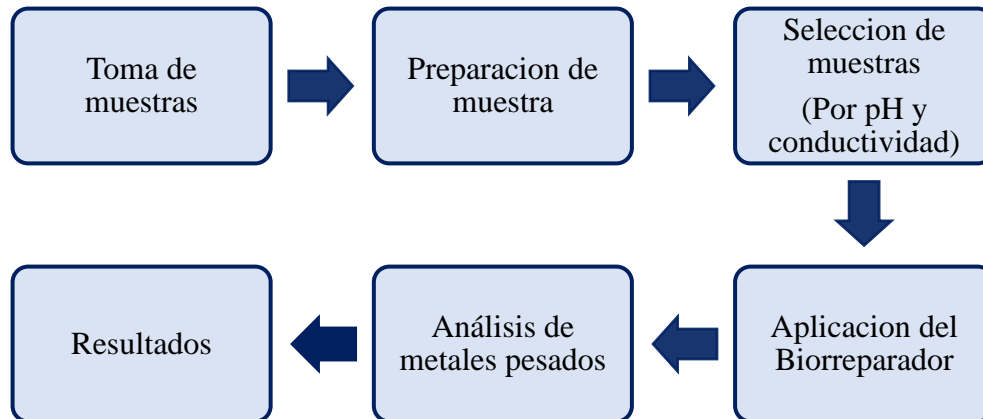
### **3.4.2 Segundo estudio: Retención de metales pesados por el Biosurfactante en muestras de suelo solidas**

En este segundo estudio se utilizan muestras de suelo pertenecientes a una antigua mina abandonada de Pb/Zn llamada San Quintín, ubicada a 2 [Km] al sur de Cabezardos, en la provincia de Ciudad Real, España.

Como se pudo observar, en el experimento anterior se cuantifica el Hg móvil total presente en el suelo o bien lo que es soluble en este, pero también existen otros tipos de metales pesados como lo son el Pb, Zn, Cu y Fe, que pueden estar presentes dadas las características del yacimiento explotado, y que sumados con el Hg son altamente contaminantes.

Adicionado a lo anterior, en este estudio se cuantifican este grupo de metales pesados en las muestras de suelo en su estado sólido, para posteriormente evaluar el aporte a la descontaminación de la misma enmienda natural utilizada en el experimento anterior en distintos porcentajes.

Para la realización de este estudio se deben seguir ciertos pasos, algunos ya explicados y otros explicados más adelante para tener una finalización exitosa de los resultados (véase ilustración 20).



**Ilustración 20. Procesos por realizar lo largo del estudio.**

### 3.4.2.1 Selección de muestras de interés

Luego de que se efectúan todos los pasos que conlleva la preparación de muestras, se utilizan alrededor de 120 [g] de cada muestra de interés y a estas se les realiza un test para la medición de pH y conductividad eléctrica con el equipo HI98199 multiparamétrico pH, CE, OD (véase Ilustración 21).



**Ilustración 21. Equipo de medición HI98199 multiparamétrico pH, CE, OD.**

Con los resultados de estas mediciones se pueden seleccionar dos muestras para que los cambios de estos parámetros al momento de aplicar la enmienda natural sean más representativos en un futuro.

Para seleccionar las dos muestras que finalmente serán utilizadas en el estudio, se les realiza un test que permite medir el pH y la conductividad eléctrica a todas las muestras.



Para efectuar este test se deben seguir ciertos pasos los cuales se presentan a continuación:

1. Se enciende el equipo multiparamétrico y se utiliza los patrones de referencia para calibrar el equipo, en este caso será un pH de 4,01 y 7,00.
2. Se prueban los patrones en los equipos y se comprueba si estos proporcionan las medidas correctas de los patrones de referencia.
3. Una vez que el equipo esté calibrado, se procede a preparar la muestra para su posterior medición.
4. Para poder medir el pH y la conductividad eléctrica a la vez se pesan 20 [g] de muestra y se les añade directamente 100 [ml] de agua destilada.
5. Se agita un poco la disolución para homogeneizarla de manera manual y que se disperse el suelo con el agua, posterior a esto, se deposita en el baño de agitación a temperatura ambiente, durante 30 [min] y a una frecuencia de 60 [rpm] (véase Ilustración 22).
6. Una vez finalizado el baño de agitación se dejan reposar las muestras por 5 [min] y ya se puede medir el pH y la conductividad eléctrica de cada muestra (Véase muestras luego de realizar el test en la Ilustración 23).
7. Es importante la limpieza de estos equipos después de cada medición para así evitar la posible contaminación entre las muestras.



**Ilustración 22. Parámetros utilizados al momento de efectuar el baño de agitación.**



**Ilustración 23. Muestras luego de realizar el baño de agitación.**

A las muestras seleccionadas se les mide el pH y la conductividad eléctrica en tres periodos de tiempo diferente con la aplicación del Biorreparador, la primera será en el día 0, la segunda en el día 14 y la tercera en el día final del experimento, es decir, al día 28.

### **3.4.2.2 Aplicación del Biorreparador en las muestras seleccionadas**

Una vez que ya se tienen seleccionadas las muestras de interés para este estudio (véase apartado 4.2.1 perteneciente a Resultados), se utiliza la misma enmienda natural que en el experimento anterior, por lo tanto, se realiza nuevamente la disolución de este Biorreparador para su correcto uso (Véase punto 3.3.1).

Se utilizan 50 [g] de cada muestra de interés y se les aplica un 10 y 30 [%] de la disolución del Biorreparador en [ml] (véase tabla 6) a cada una de ellas con el objetivo de que se pueda observar el comportamiento de esta enmienda en diferentes proporciones, además, al igual que en el primer estudio, estas muestras deben ser monitoreadas y agitadas todos los días para mejorar el contacto entre muestra y producto, y al igual que el estudio anterior, este experimento tendrá una duración de 28 días.

**Tabla 6. Cantidad de muestra utilizada con cada proporción de enmienda aplicada.**

<b>Muestra</b>	<b>Porcentaje de Enmienda [%]</b>	<b>Cantidad de Muestra [g]</b>	<b>Cantidad de Biorreparador [ml]</b>
CHSQ-3	10	50,0	5,00
CHSQ-3	30	50,0	15,0
CHSQ-4	10	50,0	5,00
CHSQ-4	30	50,0	15,0

Al momento de aplicar la disolución de la enmienda natural a la muestra, esta queda con un porcentaje de humedad considerable, es por esta razón que para poder minimizar este problema se opta por depositar las muestras en una estufa de secado a 50 [°C] por un periodo de 48 [hrs] (Véase Ilustración 24).



**Ilustración 24. Estufa de secado junto a las muestras de interés.**

Finalizando este tratamiento, las muestras se dejan secar por 5 días a temperatura ambiente en el laboratorio del EIMIA, para lograr así su completo secado y poder realizar las mediciones sin ningún problema.

### **3.4.2.3 Análisis de metales pesados en muestras de suelo seleccionadas**

Para cuantificar la cantidad de metales pesados de interés que existen dentro de las muestras seleccionadas se utiliza un equipo de la marca Malvem Panalytical modelo Epsilon 1 (véase Ilustración 25), cuyo fundamento consiste en la fluorescencia de rayos X (FRX). Esta es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X (Universidad de Burgos, 2020).



**Ilustración 25. Equipo de medición Malvern Panalytical Epsilon 1.**

Este equipo tiene consigo un espectrómetro, una computadora integrada y un *software* de análisis, además, tiene la gran ventaja de arrojar resultados rápidos y precisos ya que solo tiene un tiempo de demora de 21 [min] por muestra aproximadamente. Asimismo, la calibración en este instrumento de medición no es necesaria, ya que el equipo se calibra automáticamente antes de ser utilizado.

Ahora bien, antes de utilizar el equipo se debe cerciorar que las muestras estén completamente secas como se comenta anteriormente. Además, hay que eliminar los sobretamaños que se pueden haber generado al momento de la aplicación de la enmienda o al momento de secarla a través de la estufa. Este procedimiento se ejecuta con un mortero de forma manual (véase Ilustración 26), de esta forma, también se disminuirá de tamaño a la muestra original, ya que, también se analiza esta para efectos de comparación al momento de aplicar el Biorreparador.

Una vez ejecutada la disminución de tamaño con el mortero, la muestra resultante se deposita en un toma muestra perteneciente al equipo de medición, a esta se le agrega un papel film transparente de Mylar para que el equipo pueda medir correctamente los metales de interés, teniendo todo esto preparado, se deposita él toma muestras en el equipo FRX y se procede a ejecutar la medición a través del ordenador, cabe mencionar que, la cuantificación en este estudio a diferencia del anterior será para muestras en estado sólido, ya que, el equipo utilizado así lo requiere.

Además, al igual que en el experimento anterior se realizan las cuantificaciones en duplicado para tener un error menor al momento de obtener los resultados.



**Ilustración 26. Disminución de tamaño de la muestra utilizando el mortero.**

### **3.4.3 Tercer estudio: Análisis de metales posiblemente solubles en agua**

Este último experimento se realiza como extensión del experimento anterior, esto porque el equipo (FRX) utilizado mide la disponibilidad de los elementos presentes en la muestra de suelo, esto quiere decir que, aunque el Biorremediador actúe sobre los metales presentes en las muestras, solubilizándolos, inmovilizándolos o cualquiera sea su efecto en ellos, el equipo continuará midiendo la totalidad de ellos, ya que estos metales no desaparecen y así no se logran los objetivos finales del experimento.

Es por este motivo que se utilizan las mismas muestras de interés que en el experimento anterior, es decir, CHSQ-3 y CHSQ4 y se realiza un procedimiento diferente. Primero que todo se debe tener en consideración la cantidad de muestra sobrante para así lograr obtener las proporciones de enmienda que se utilizará. Después, se cuantifica en el equipo la cantidad de metales de interés que contiene cada muestra sin la aplicación del Biorremediador, luego de realizar la primera cuantificación sin la aplicación de la enmienda. A estas muestras se les ejecuta un proceso de lavado y se dejan secar por 48 [hrs] en una estufa a 50 [°C]. Posteriormente, trascurrido este tiempo, se les asigna un 10 y 30 [%] de biorremediador a cada muestra dependiendo de sus pesos, estas proporciones de enmienda utilizada se pueden observar en la tabla 7.

**Tabla 7. Cantidad de muestra junto a las proporciones de Biorreparador utilizado.**

<b>Muestra</b>	<b>Cantidad de muestra [g]</b>	<b>Cantidad de Biorreparador [ml]</b>
CHSQ-3 + 10% BIO	19,3	1,93
CHSQ-3 + 30% BIO	19,3	5,78
CHSQ-4 + 10% BIO	25,0	2,50
CHSQ-4 + 30% BIO	25,0	7,50

Cabe destacar que estas muestras se medirán al día 7 y 14 desde el inicio del experimento y luego de cada cuantificación las muestras se lavan para que tengan 7 días de secado a temperatura ambiente (entre 25 y 28 [°C]), excepto en el primer día de cuantificación, donde se le aplica el secado en estufa mencionado anteriormente.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Si bien, se acaban de desarrollar tres estudios diferentes, el objetivo principal siempre ha sido observar el comportamiento del Biorreparador en diferentes muestras de suelo utilizando diferentes métodos analíticos, de manera que se observan diversos resultados al momento de realizar cada experimento y estos se irán analizando uno a uno de los experimentos realizados.

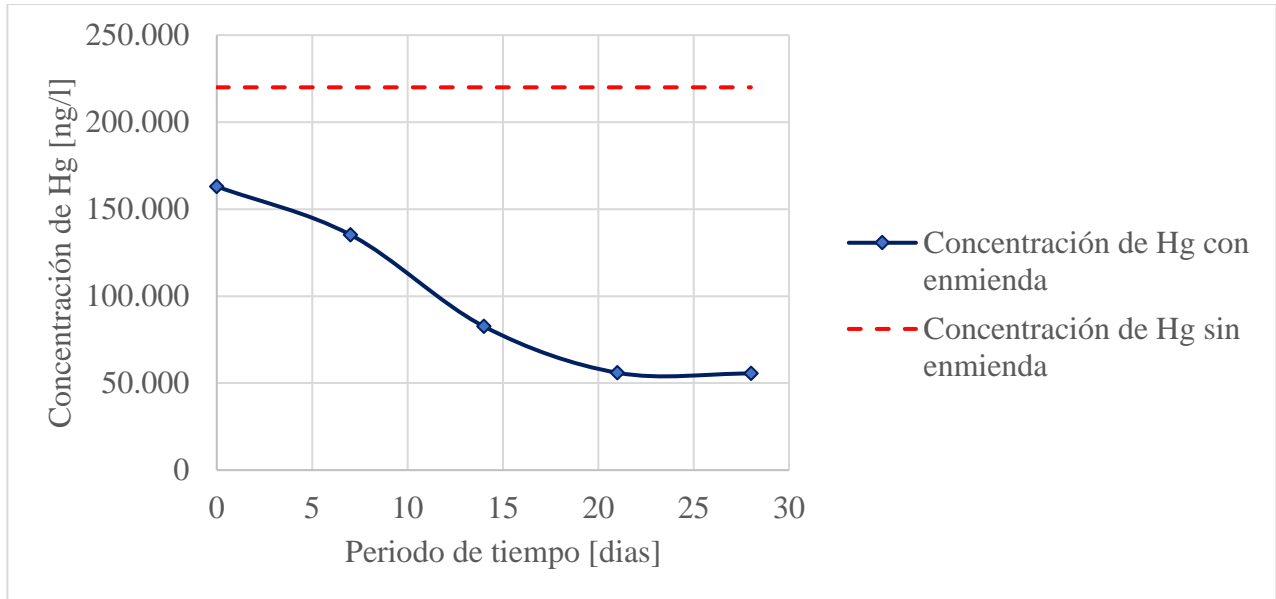
### 4.1 Retención de mercurio total en muestras de suelo.

Cada una de las cuantificaciones realizadas para este estudio se pueden observar en las tablas del Anexo D, y el resumen de cada uno de estos resultados se pueden observar en la tabla 8, además, es relevante mencionar que este estudio tuvo una duración máxima de 28 días.

**Tabla 8. Resumen de resultados obtenidos para el experimento 1.**

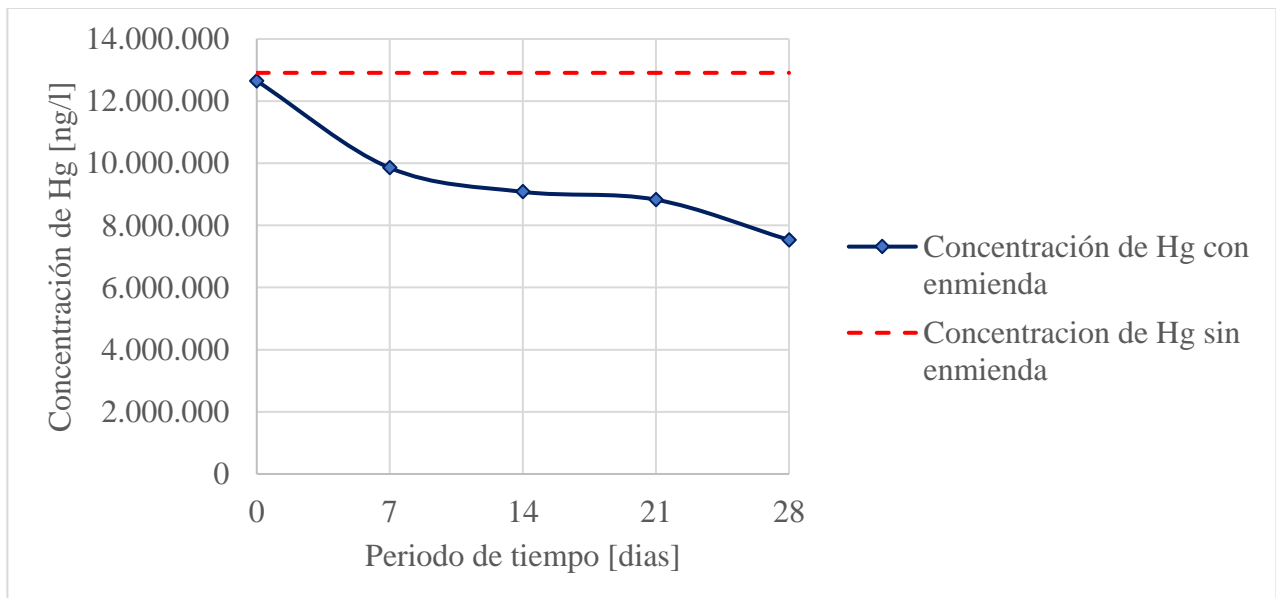
Muestra	Concentración de Hg sin enmienda [ng/l]	Promedio de concentración de Hg con enmienda [ng/l]				
		Día 0	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28
NC1	220.000	163.000	135.300	82.620	55.980	55.530
WUAJ2 Nuevo	12.910.000	12.650.000	9.852.000	9.080.000	8.827.000	7.533.000
WUAJ2 Antigo	4.626.000	9.118.000	4.515.000	4.109.000	4.008.000	3.142.000

A partir de estos valores se puede observar las distintas concentraciones obtenidas de cada muestra de suelo por cada día del experimento y para poder analizar los resultados de una manera más sencilla se construyen tres gráficos diferentes (gráficos 1, 2 y 3) por cada muestra, estos nos ayudan a examinar cada uno de estos valores y las tendencias que estos resultados pudiesen tener.



**Gráfico 1. Comportamiento de la muestra NC1.**

Dentro del gráfico 1, se puede observar que, al día final del experimento el porcentaje retenido es de un 74,9 %, esto puede inducir a una tendencia de disminución de concentración de Hg presente en la muestra NC1, además, se advierte una estabilización de la tendencia al momento de observar el grafico, a partir del día 20.

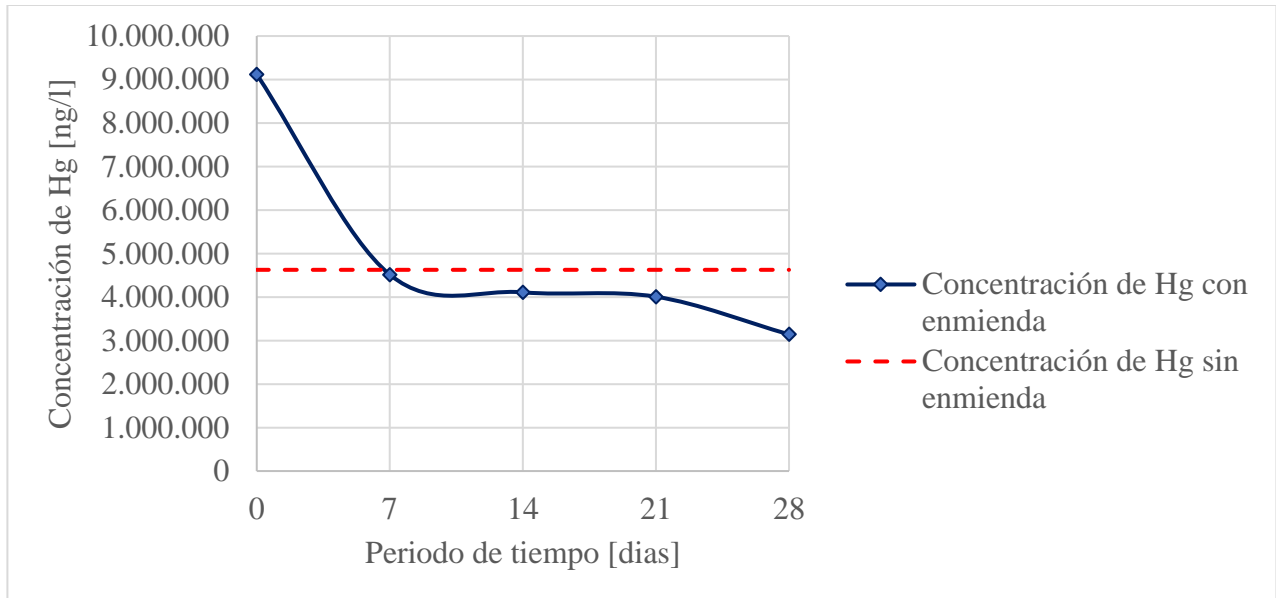


**Gráfico 2. Comportamiento de la muestra WUAJ2 Nueva.**

En el presente grafico 2 se puede divisar, al igual que en el gráfico de NC1, una tendencia a la disminución de la concentración de Hg presente en la muestra WUAJ2 nuevo, ya que, el



porcentaje de retención es de un 41,7 % al momento de la última cuantificación, sin embargo, no es posible determinar si se estabiliza la tendencia, puesto que, al día final del experimento se observa una nueva disminución de la concentración de Hg.



**Gráfico 3. Comportamiento de la muestra WUAJ2 Antiguo.**

En el gráfico 3, perteneciente a la muestra de suelo WUAJ2 antiguo, se percibe una diferencia en relación a las otras dos muestras, puesto que, la concentración inicial con la aplicación del Biorreparador es de 9.118.000 [ng/l] y esta es mayor a la concentración inicial sin la aplicación de ninguna enmienda, la cual es de 4.626.000 [ng/l], sin embargo, la tendencia sigue siendo exactamente la misma que en los otros dos casos anteriores, ya que, el porcentaje de retención es de un 32,1% y al igual que el caso anterior, no es posible advertir si la tendencia se estabiliza al momento de la última cuantificación.

#### **4.2 Retención de metales pesados en muestras de suelo solidas**

Para este segundo estudio se obtienen diferentes resultados, los primeros tienen relación al pH y la conductividad y posteriormente a esto se adquieren resultados en relación con la efectividad del Biorreparador en metales pesados de diferentes muestras de suelo.

Este estudio tiene una primera etapa de selección de muestra y además es importante considerar que la duración de este es de 28 días, al igual que el experimento anterior.

#### 4.2.1 Selección de muestras en base a pH y conductividad eléctrica

Luego de realizar todo el procedimiento visto en el apartado 3.4.2.1, los resultados obtenidos de la medición de pH y conductividad eléctrica se pueden visualizar en la tabla 9.

**Tabla 9. Resultados preliminares de pH y conductividad eléctrica.**

Muestra	pH	Conductividad eléctrica [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
CHSQ-1	3,04	1.142
CHSQ-2	3,70	2.573
CHSQ-3	3,08	5.796
CHSQ-4	3,57	3.923

En base a los resultados de la tabla anterior se puede observar que las muestras poseen un pH bastante parecido, pero se diferencian lo suficiente en la conductividad eléctrica, lo que implica también diferencias significativas en sus contenidos en compuestos en forma iónica. Las muestras que poseen una cuantificación mayor de esta son CHSQ-3 Y CHSQ-4 con 5.796 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] y 3.923 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] respectivamente y es por este motivo que fueron las muestras seleccionadas para realizar este estudio.

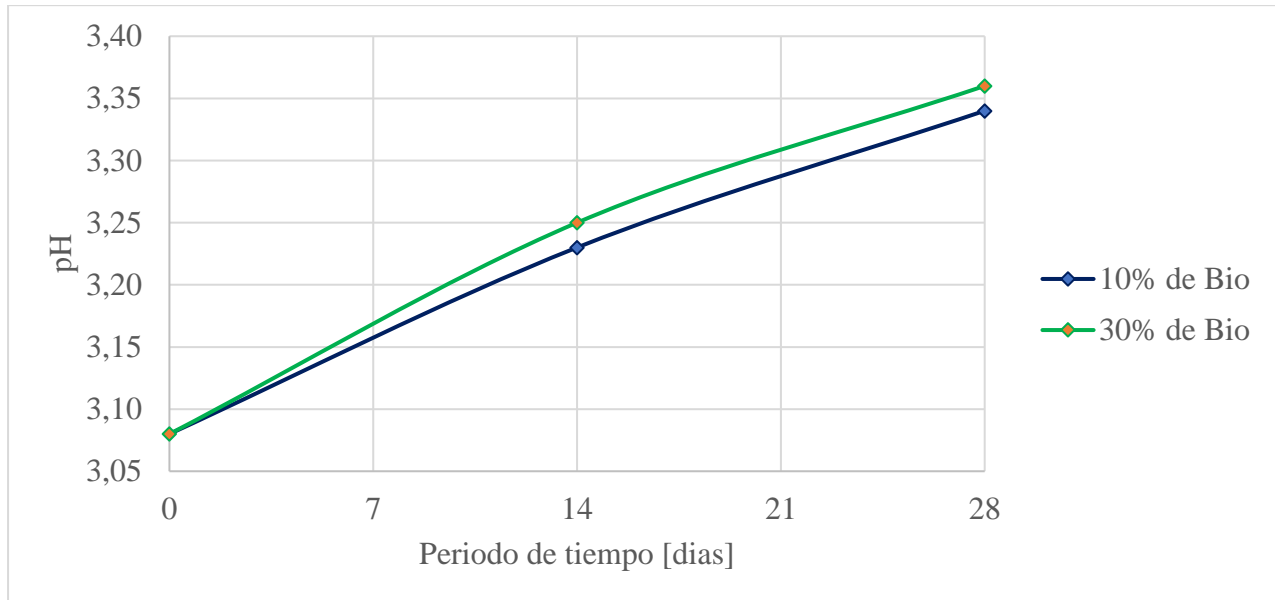
#### 4.2.2 Variación de pH y conductividad eléctrica a lo largo del estudio

Los resultados de las mediciones de pH y conductividad eléctrica se pueden observar en las tablas 21 y 22 del Anexo D. El resumen de los resultados obtenidos se puede observar en la tabla 10 presentada a continuación, además, es imprescindible hacer mención que, el valor del día 0 es sin la enmienda aplicada, a diferencia de los días 14 y 28.

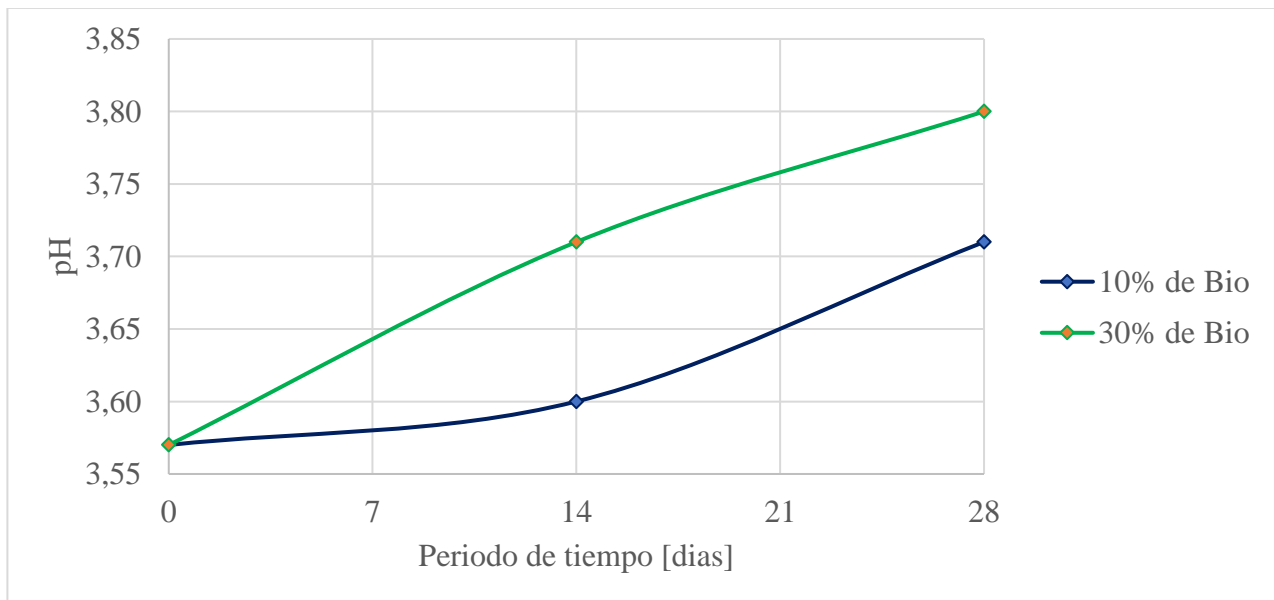
**Tabla 10. Mediciones de pH y conductividad eléctrica con la aplicación del Biorreparador.**

Muestra	pH			Conductividad eléctrica [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]		
	Día 0	Día 14	Día 28	Día 0	Día 14	Día 28
CHSQ-3 + 10% BIO	3,08	3,23	3,34	5.796	4.383	1.652
CHSQ-3 + 30% BIO	3,08	3,25	3,36	5.796	4.190	1.186
CHSQ-4 + 10% BIO	3,57	3,60	3,71	3.923	2.767	2.495
CHSQ-4 + 30% BIO	3,57	3,71	3,80	3.923	2.507	2.268

Para entender y poder analizar estos resultados de una mejor manera, se desarrollan los siguientes gráficos 4, 5, 6 y 7 expuestos a continuación, donde en estos se podrán percibir todas las variaciones de pH y conductividad eléctrica que presentan las muestras al momento de la aplicación de la enmienda utilizada.



**Gráfico 4. Variación del pH en la muestra CHSQ-3.**

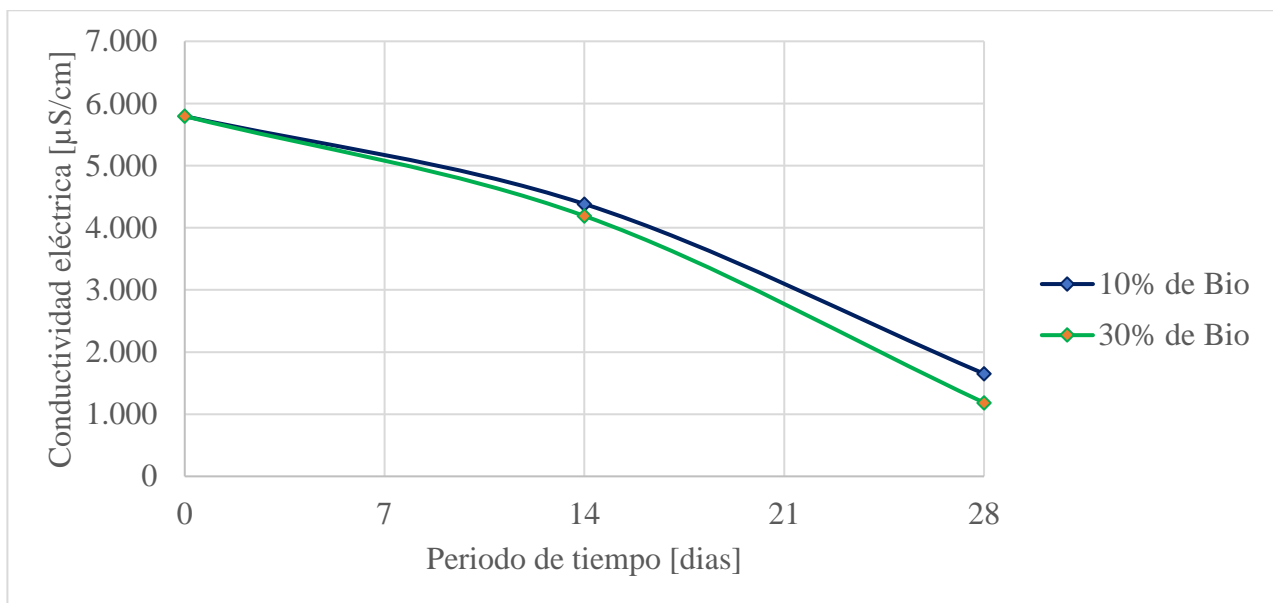


**Gráfico 5. Variación del pH en la muestra CHSQ-4.**

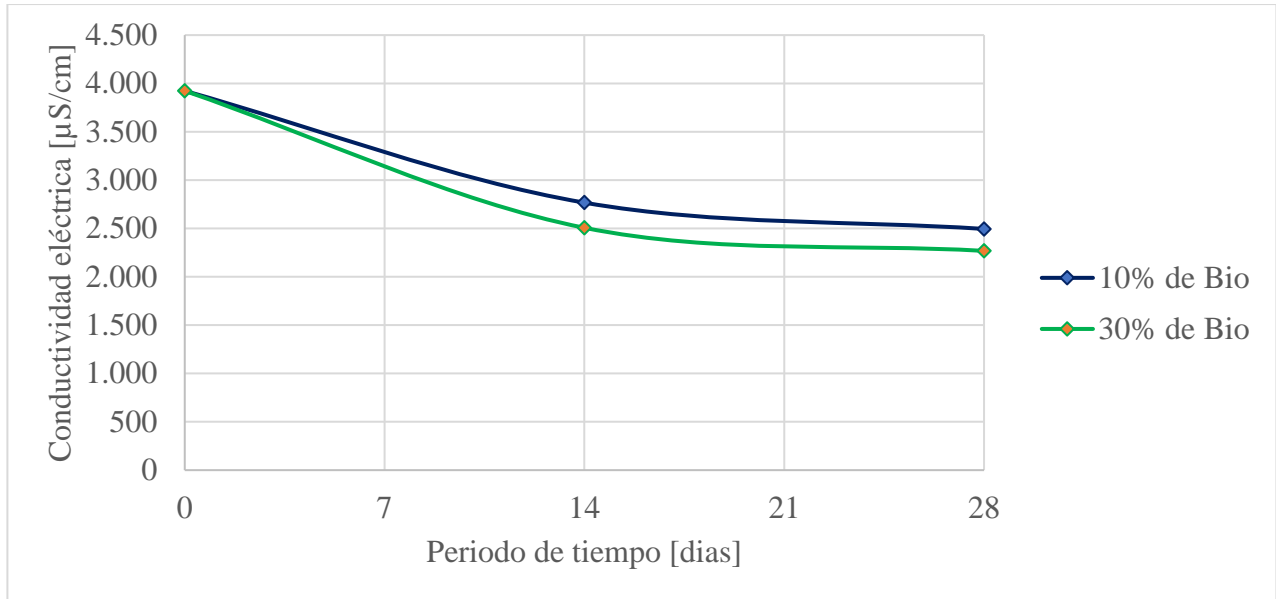
En los gráficos 4 y 5 se puede distinguir un leve aumento de pH luego de la incorporación del Bioarregador, tanto para la muestra CHSQ-3 como para CHSQ-4.

Consideremos que, en base a los datos que se obtienen de la tabla 10 para CHSQ-3, el pH inicial es de 3,08 y para el día final del experimento el pH sería de 3,34 y 3,36. Por otro lado para CHSQ-4 el pH inicial es de 3,57 y para el día 28 del experimento estos serían de 3,71 y 3,80 ambos valores de las diferentes muestras de suelo son para un 10 [%] y 30 [%] de enmienda aplicada respectivamente, esto ayuda a divisar que aplicar un 30 [%] de enmienda para ambos casos haría que el pH aumentará en una mayor proporción en comparación a la aplicación de esta en un 10 [%], sin embargo, estos resultados siguen siendo valores ácidos aun aplicando la solución para la remediación de suelos, es por este motivo que, se procede al análisis de los resultados obtenidos para la conductividad eléctrica.

Una vez que se analizan los valores de pH para ambas muestras de suelo, se construyen los gráficos 6 y 7 para la conductividad eléctrica, estos nos permiten estudiar el comportamiento en ambas muestras luego de la aplicación del Biorreparador, recordemos que este fue un parámetro de gran importancia para la selección de las muestras a utilizar en este estudio.



**Gráfico 6. Variación de la conductividad eléctrica para la muestra CHSQ-3.**



**Gráfico 7. Variación de la conductividad eléctrica para la muestra CHSQ-4.**

Para los gráficos 6 y 7 anteriores se puede advertir que existe una disminución considerable luego de la aplicación del Biorreparador para ambas muestras de suelo.

Observando los resultados de la tabla 10 se obtiene que, para la muestra CHSQ-3 la conductividad eléctrica inicial es de 5.796 [µS/cm], la cual tiene un descenso importante, llegando a 1.652 [µS/cm] para un 10 [%] de aplicación del Biorreparador y para un 30 [%] este valor llega a 1.186 [µS/cm]; en ambos casos resulta evidente que no se llega aún a un equilibrio en el proceso.

Asimismo, para la muestra CHSQ-4 se percibe una disminución un tanto menor a lo que se puede apreciar para la muestra anterior, ya que, inicialmente esta muestra tiene una conductividad eléctrica 3.923 [µS/cm] y al momento de aplicar un 10 [%] de enmienda este valor llega a 2.495 [µS/cm] y 2.268 [µS/cm] al momento de aplicar un 30 [%] de Biorreparador. En este caso sí se aprecia una situación final que podría ser de equilibrio, tras 14 días.

### 4.2.3 Retención de metales pesados en muestras de suelo solidas

En este apartado se procede a visualizar los datos obtenidos de la medición de la composición elemental mediante FRX en las muestras de suelo, es importante mencionar que se realiza un duplicado de cada medición y de estas se obtiene un promedio que nos permite tener un valor con un menor error asociado a la medición que nos entrega el equipo, por ende, en el Anexo E se podrán visualizar todas las tablas con los resultados obtenidos de cada una de las mediciones por cada día, no obstante, a lo largo de esta sección se presentan resúmenes de los promedios obtenidos de estas cuantificaciones.

En primer lugar, se debe considerar las concentraciones iniciales de cada uno de los metales de interés presentes en ambas muestras de suelo, esto para poder examinar la efectividad del Biorreparador en diferentes proporciones, los resultados de estas concentraciones se exhiben en la tabla 11 expuesta a continuación.

**Tabla 11. Concentraciones iniciales de los elementos de interés para cada muestra de suelo.**

Muestra	Concentración de Zn [%]	Concentración de Pb [%]	Concentración de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Concentración de Cu [ppm]
CHSQ-3	1,25	4,00	12,05	1.095
CHSQ-4	0,71	2,71	8,31	553,7

Considerando los valores expuestos en la tabla 11 anterior, a simple vista el metal con menor concentración es el Cu, ya que estos valores se encuentran en [ppm] y no en [%] como en los metales restantes, además se puede visualizar que existe una alta concentración de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> llegando a tener valores para CHSQ-3 y CHSQ-4 de 12,05 [%] y 8,31 [%] respectivamente. Además, si comparamos esta Tabla 11 con la Tabla 9, es posible inferir que la mayor conductividad eléctrica de la muestra CHSQ-3 no es una indicación directa de los contenidos totales en los metales mostrados en la Tabla 11, sino, que esa mayor conductividad es una indicación de la mayor movilidad de los elementos contenidos en esa muestra.

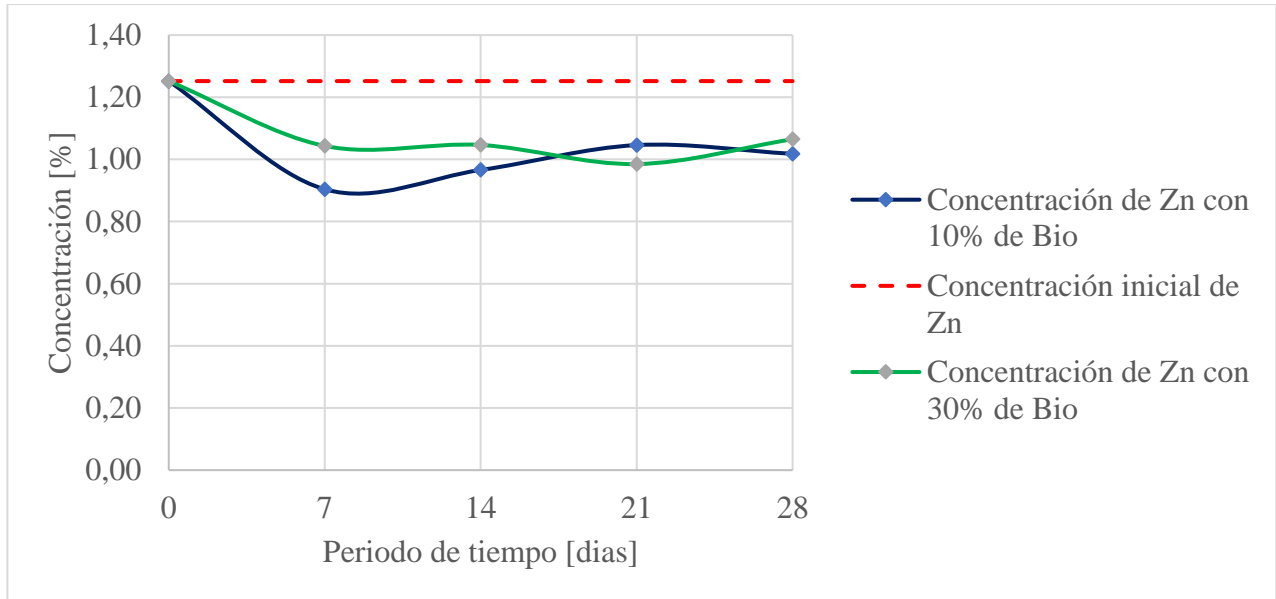
A continuación, en la tabla 12, se podrá observar un resumen con los valores promedios obtenidos por cada día de cuantificación para los diferentes metales de interés, con las diferentes proporciones de Biorreparador empleado para la muestra de suelo CHSQ-3, asimismo, para un mayor detalle de las mediciones obtenidas por día incluyendo los promedios se podrán visualizar en el Anexo E.

**Tabla 12. Resumen de los valores promedios obtenidos para la muestra de suelo CHSQ-3.**

Muestra CHSQ-3	Día	Concentración de Zn [%]	Concentración de Pb [%]	Concentración de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Concentración de Cu [ppm]
Sin enmienda	0	1,25	4,00	12,05	1.095
+10% de Bio	7	0,90	3,24	9,48	834,7
+10% de Bio	14	0,97	3,56	10,27	884,7
+10% de Bio	21	1,05	3,76	10,79	940,9
+10% de Bio	28	1,02	3,71	10,33	909,5
+30% de Bio	7	1,04	3,95	12,49	1.035
+30% de Bio	14	1,05	4,03	12,74	1.104
+30% de Bio	21	0,99	3,71	11,51	949,8
+30% de Bio	28	1,07	4,17	12,68	1.055

Igualmente, en base a los resultados expuestos en la tabla 12 presentada con anterioridad, se puede observar que no existe una tendencia concluyente respecto a las concentraciones de los metales de interés, se percibe además que ocurre un fenómeno no esperado, ya que en más de un caso la concentración final del metal con la aplicación de la enmienda termina siendo mayor que la concentración inicial.

De esta manera, se efectúan distintos gráficos expuestos más adelante que permiten visualizar de mejor manera el comportamiento de cada elemento de interés junto a la efectividad de la enmienda utilizada en cada una de sus proporciones y al mismo tiempo posibilita la observación más detallada del fenómeno ocurrido, finalmente es importante mencionar que, cada uno de los gráficos por elemento están detallados en el Anexo E.



**Gráfico 8. Comparativa de Zn en la muestra CHSQ-3.**

En el gráfico 8 perteneciente a las concentraciones de Zn junto a cada una de las proporciones de Biorreparador utilizado, se puede observar una disminución de concentración en el día final del experimento respecto a la concentración inicial que es de 1,25 [%]. Sin embargo, se puede advertir un fenómeno inesperado, puesto que, al aplicar un 10 [%] de la enmienda utilizada la concentración de Zn disminuye aún más llegando a un valor de 1,02 [%] en comparación a un 1,07 [%] utilizando el Biorreparador en un 30 [%].

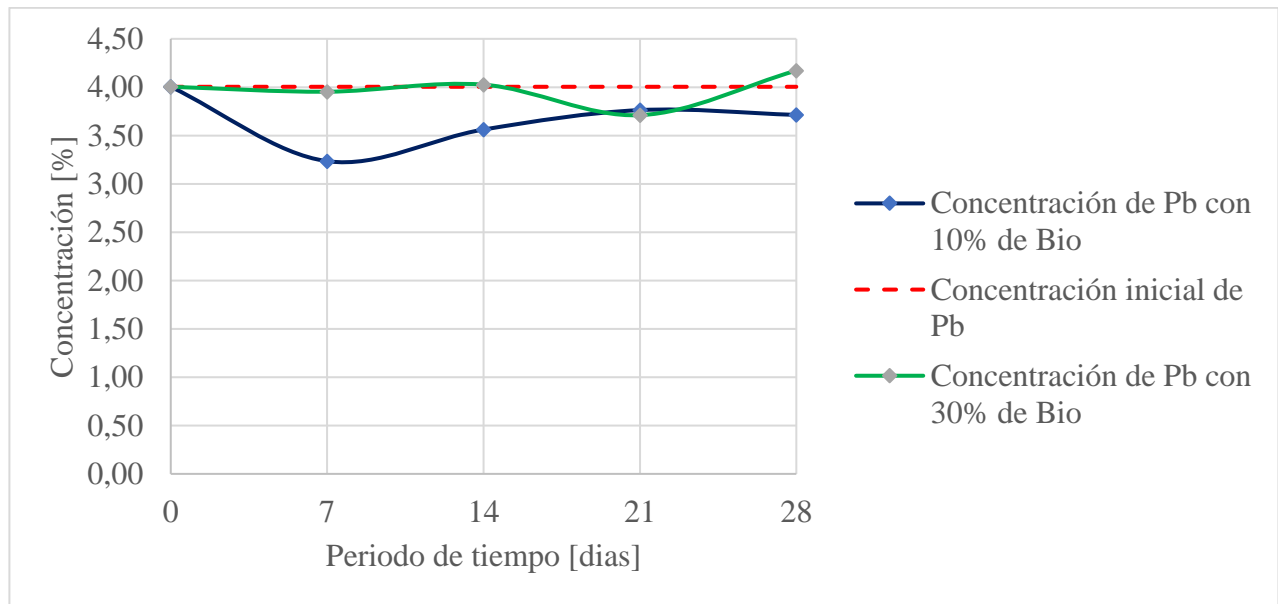
De igual forma, se puede divisar una disminución en la primera semana de medición para la aplicación de la enmienda en un 10 [%] llegando a un valor de 0,90 [%], no obstante, a partir de la segunda semana esta comienza un ascenso inesperado tomando un valor de 0,97 [%] y 1,05 [%] la segunda y tercera semana respectivamente, para lograr retomar su descenso la semana final del estudio.

Por otro lado, para el 30 [%] de enmienda utilizada ocurre igualmente un fenómeno inesperado, ya que, hasta la tercera semana las concentraciones de Zn van en descenso tomando un valor de 0,99 [%], sin embargo, a partir de este punto comienza un aumento llegando al valor final mencionado anteriormente.

Asimismo, además de analizar los resultados pertenecientes al Zn queda por examinar los elementos restantes, es por este motivo que el gráfico 9 presenta las concentraciones cuantificadas



pertenecientes al Pb y así poder advertir de una mejor manera el comportamiento de este a lo largo del experimento.



**Gráfico 9. Comparativa de Pb en la muestra CHSQ-3.**

Ahora bien, tal como se ve en el gráfico anterior y con relación a los valores de la tabla 12, la concentración inicial de Pb presente en la muestra CHSQ-3 es de 4,00 [%], no obstante, a diferencia del caso anterior con el Zn, la concentración final de Pb una vez adicionado el 30 [%] de Biorreparador termina siendo mayor a la concentración inicial con un valor de 4,17 [%] y adicionado un 10 [%] de enmienda la concentración final de Pb al día 28 del experimento es menor con un valor de 3,71 [%].

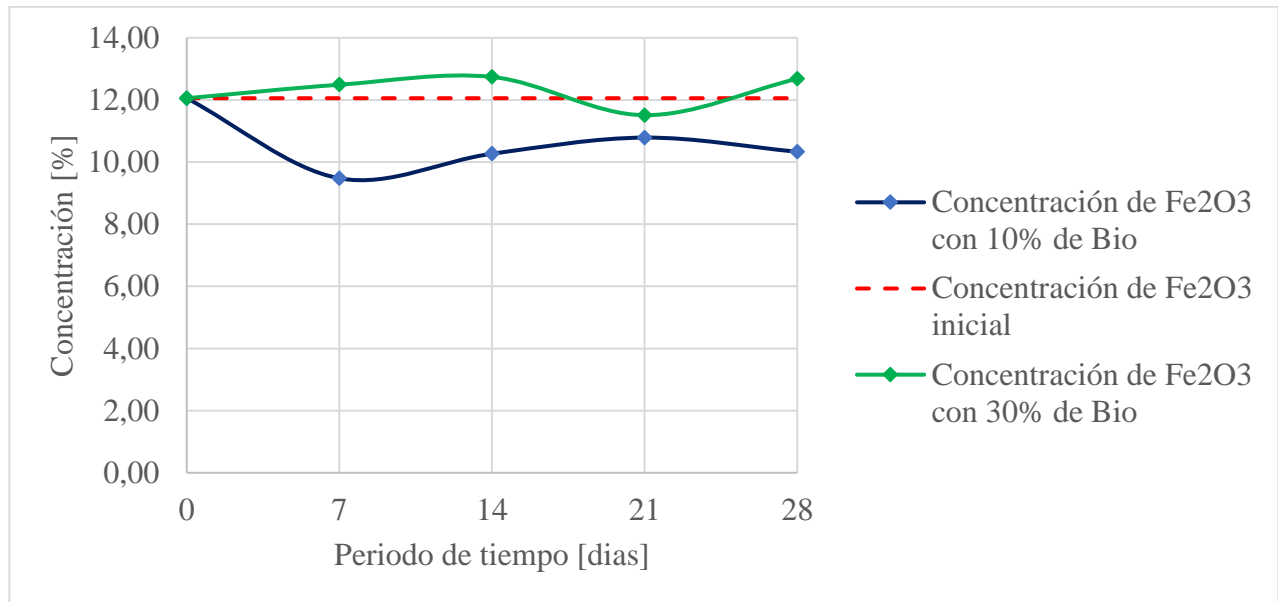
Por otra parte, al igual que en el caso anterior también sucede un hecho que no se espera, ya que, por un lado, la concentración final con un 30 [%] de enmienda utilizada termina siendo mayor a la concentración final con un 10 [%] de Biorreparador.

Además, se puede distinguir que en la primera semana existe una clara disminución en la concentración de Pb al momento de aplicar un 10 [%] de enmienda llegando a un valor de 3,23 [%], sin embargo, al transcurrir los días las concentraciones presentan un rotundo cambio e inician un ascenso que llega a 3,76 [%] en la tercera semana y finalmente vuelve a descender siendo la concentración al final del estudio menor a la concentración inicial.

También, para el caso de la aplicación del Biorreparador en un 30 [%] ocurre un fenómeno que no se había contemplado hasta el momento, dado que, la primera semana disminuye la

concentración, luego aumenta, pero a la tercera semana vuelve a disminuir y al momento de la finalización del experimento vuelve a tener un ascenso llegando su valor a ser mayor que la concentración inicial.

Seguido se presenta el grafico 10 perteneciente al siguiente metal de interés y se contempla que ocurre con la situación del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en la muestra de suelo CHSQ-3.



**Gráfico 10. Comparativa de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en la muestra CHSQ-3.**

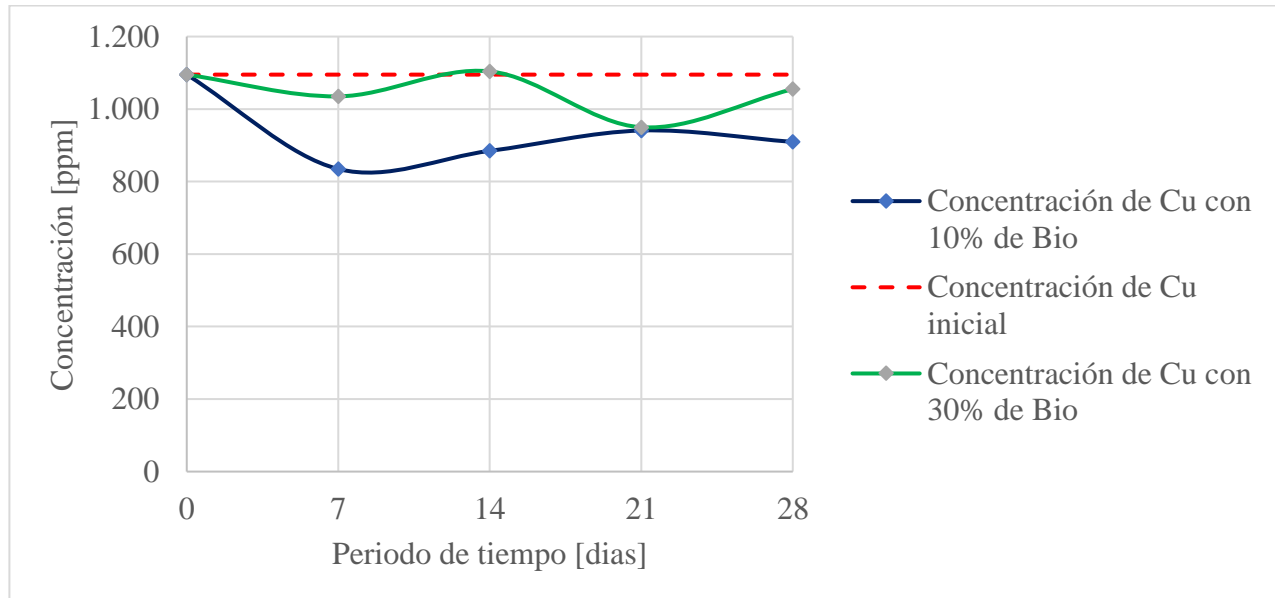
Tal como se aprecia en el gráfico anterior y con apoyo de los valores de la tabla 12 podemos entender que ocurre un fenómeno muy parecido al caso del Pb en cuanto a que al momento de aplicar el Biorreparador en un 30 [%] la concentración de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  al día final del experimento termina siendo mayor con un valor de 12,68 [%] en comparación a la concentración inicial que es de 12,05 [%].

Así mismo, se distingue que al momento de aplicar la enmienda en un 30 [%] hasta la segunda semana la concentración de Fe aumenta hasta 12,74 [%] y en la cuantificación de la tercera semana esta concentración disminuye hasta un valor de 11,51 [%], pero luego vuelve a aumentar inclusive a un valor mayor que el inicial.

Por otro lado, al momento de aplicar el Biorreparador en un 10 [%] ocurre algo similar al momento de aplicar la misma proporción de enmienda en el caso anterior del Pb, donde en la primera semana de medición el valor desciende a 9,48 [%], luego en la segunda y tercera semana

ocurre un incremento de la concentración llegando a un valor de 10,79 [%] y finalmente sucede un nuevo descenso con un valor 10,33 [%] siendo este menor que la concentración inicial.

A continuación, se presenta el gráfico 11 que anuncia el comportamiento del elemento Cu en el periodo que perdura el experimento.



**Gráfico 11. Comparativa de Cu en la muestra CHSQ-3.**

En el anterior gráfico se puede contemplar que la concentración inicial de Cu es de 1.10 [ppm] y al día final del estudio con las diferentes proporciones de aplicación de la enmienda este valor en ambos casos disminuye.

A pesar de que en ambos casos las concentraciones disminuyen respecto a la inicial, es importante mencionar que sucede en los días anteriores en los cuales se cuantifica, para el caso del 10 [%] de aplicación del Biorreparador, en su primer día decrece hasta valor de 834,7 [ppm], pero seguidamente de esto, hasta la tercera semana se percibe un aumento tomando un valor de 940,9 [ppm] y finalmente al último día de medición este valor anterior decrece llegando definitivamente a 909,5 [ppm] siendo este menor que la concentración de Cu que se tenía en un inicio.

Por otra parte, para la aplicación de un 30 [%] de Biorreparador ocurre un acontecimiento diferente, ya que, en la primera semana ocurre un descenso en comparación al valor inicial siendo este de 1.035 [ppm], pero luego ocurre un ascenso en la segunda semana llegando a un valor incluso mayor al inicial siendo este de 1.104 [ppm], inmediatamente en la tercera semana vuelve a disminuir

el valor llegando a 949,8 [ppm] y finalmente este valor vuelve a aumentar en la última semana logrando a la cifra de 1.055 [ppm] siendo este valor final menor al inicial pero muy parecido.

Aun cuando, fueron presentados todos los resultados pertenecientes a la muestra de suelo CHSQ-3 en la primera etapa del estudio, también es de importancia analizar los valores obtenidos para la otra muestra de suelo utilizada perteneciente a CHSQ-4 y así permitirse obtener una resolución en base a los resultados conseguidos, es por esto que en la tabla 13 se exponen las cuantificaciones para esta muestra de suelo.

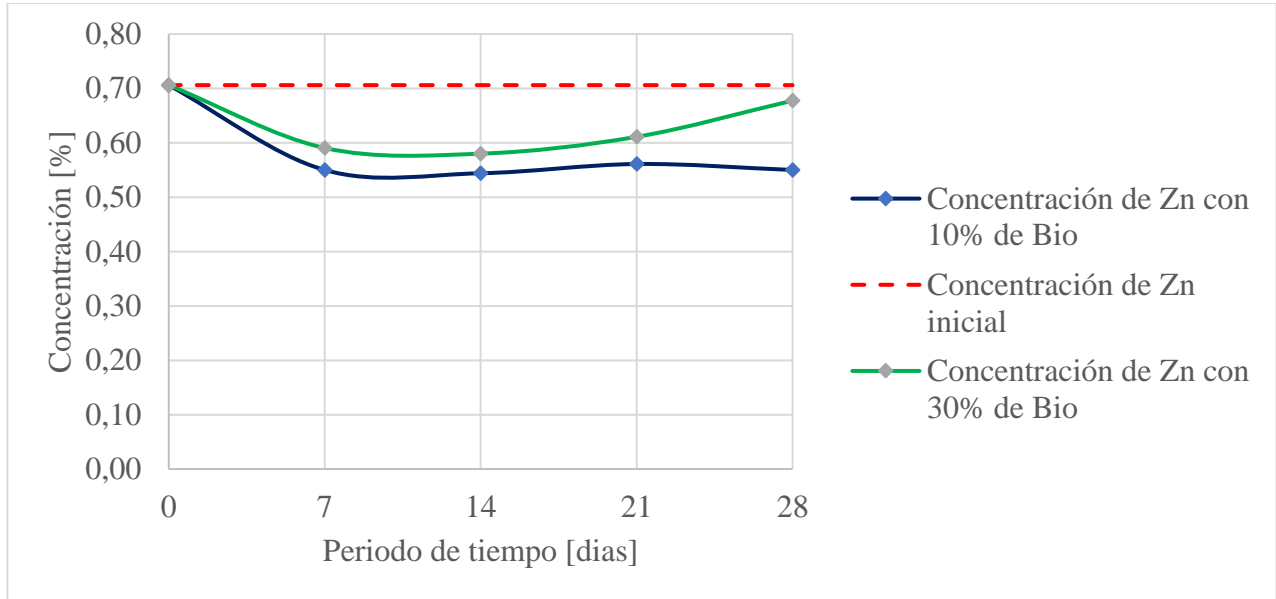
**Tabla 13. Resumen de los valores promedios obtenidos para la muestra de suelo CHSQ-4.**

Muestra CHSQ-4	Día	Concentración de Zn [%]	Concentración de Pb [%]	Concentración de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Concentración de Cu [ppm]
Sin enmienda	0	0,71	2,71	8,31	553,7
+10% de Bio	7	0,55	2,26	7,41	465,3
+10% de Bio	14	0,54	2,10	7,31	469,1
+10% de Bio	21	0,56	2,39	7,85	507,7
+10% de Bio	28	0,55	2,22	7,46	457,4
+30% de Bio	7	0,59	2,39	8,21	504,6
+30% de Bio	14	0,58	2,32	7,67	481,9
+30% de Bio	21	0,61	2,38	8,07	504,2
+30% de Bio	28	0,68	3,00	8,78	567,7

Además de la tabla presentada anteriormente, se debe tener presente cada cuantificación recopilada cada 7 días de medición a lo largo del estudio, estas pueden ser observadas en el Anexo E en este presente informe.

Para tener la facultad de determinar que sucede con cada elemento presente en la muestra de suelo analizada es imprescindible efectuar los distintos gráficos presentados más adelante pertenecientes a cada elemento de interés al igual que en el caso de la muestra de suelo anterior.

Además de presentar dichos gráficos igualmente se detalla que sucede en cada caso en particular con los resultados obtenidos a lo largo de la duración del experimento, es por esto que, a continuación, se presenta el gráfico 12 perteneciente al comportamiento de Zn en CHSQ-4.



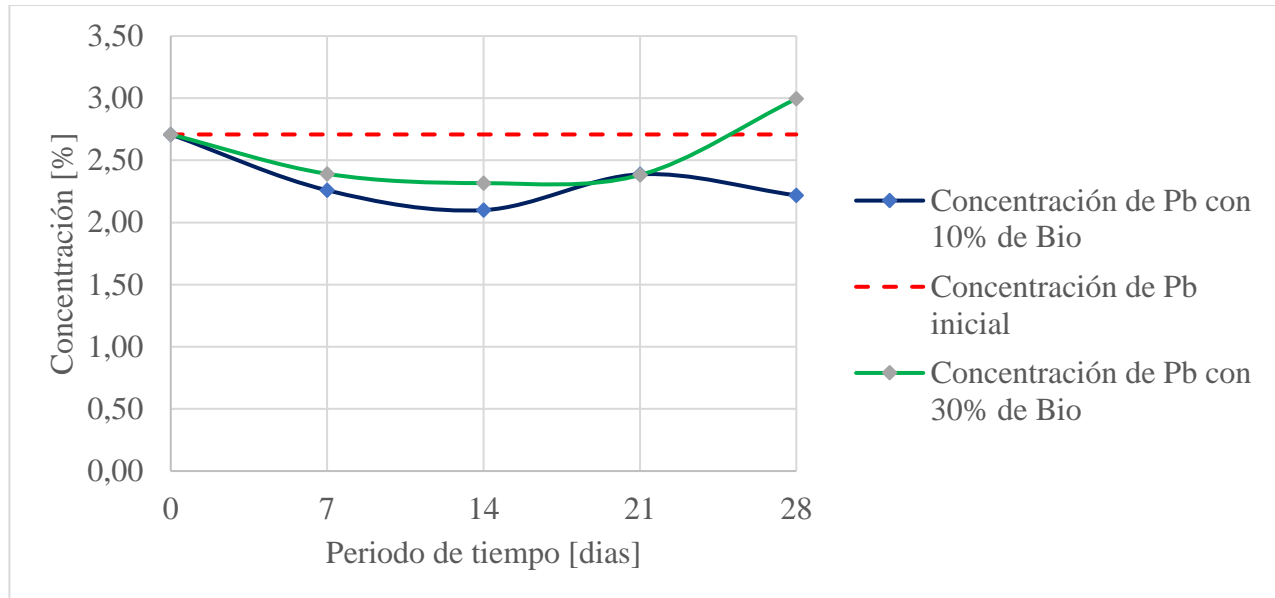
**Gráfico 12. Comparativa de Zn en la muestra CHSQ-4.**

En función del gráfico 12 presentado anteriormente, se revela que la concentración inicial de Zn presente en la muestra de suelo CHSQ-4 corresponde a 0,71 [%] y al momento de aplicar el Biorreparador en un 10 [%] se logra notar un descenso en la concentración hasta la segunda semana llegando a un valor de 0,54 [%], a pesar de ello, en la tercera semana ocurre un ascenso en la medición inesperado llegando a 0,56 [%] y al día final de cuantificación el valor vuelve a bajar adquiriendo un valor de 0,55 [%].

De igual forma, para el momento de la aplicación del Biorreparador en un 30 [%] también se observa una disminución de concentración de Zn hasta la segunda semana logrando un valor de 0,58 [%], pero, a partir de este punto de medición la concentración cuantificada de Zn comienza un incremento hasta el día final del estudio alcanzando un valor de 0,68 [%].

Aun cuando, en ambos casos presentados anteriormente tienen incrementos y descensos en sus cuantificaciones, finalmente se obtienen ambas concentraciones menores a la concentración de Zn inicial, a pesar de ello, se contempla que la aplicación de la enmienda en un 10 [%] tendría una mayor eficacia que la aplicación en un 30 [%], puesto que, la concentración en el primer caso es mucho menor que en el segundo caso expuesto.

Al igual que, en el caso del elemento Zn presentado, también es importante analizar el comportamiento de los demás elementos de interés, es por esta razón que, en el gráfico 13 expuesto a continuación se puede observar el comportamiento del Pb en la muestra de suelo CHSQ-4.



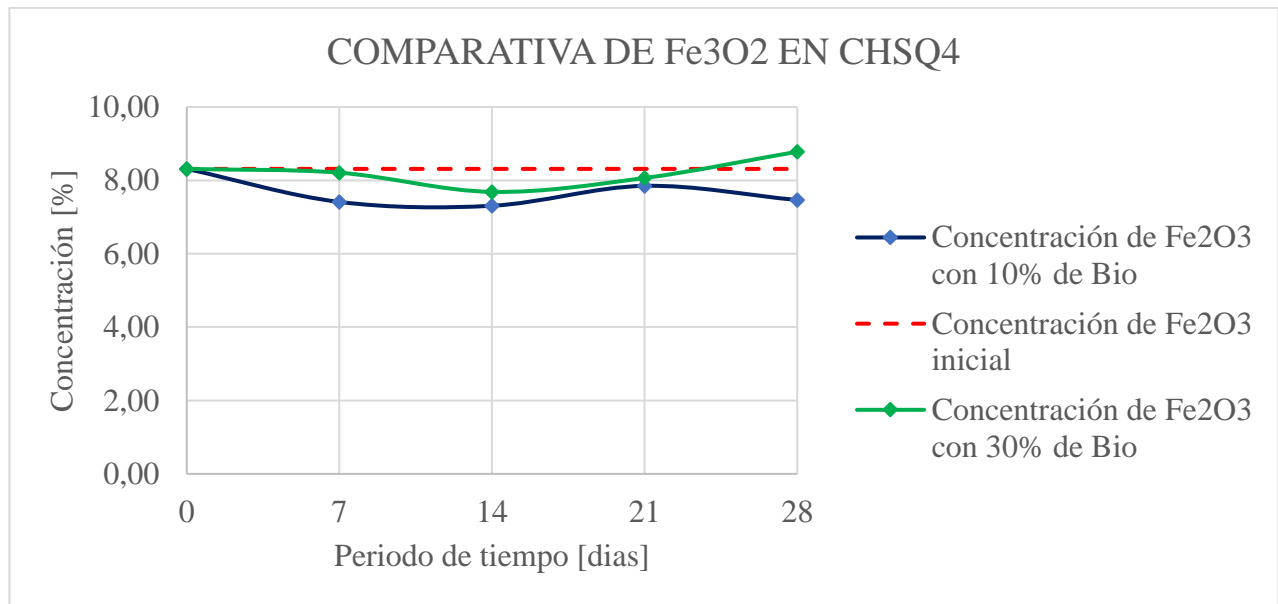
**Gráfico 13. Comparativa de Pb en la muestra CHSQ-4.**

De este grafico expuesto es posible inferir que sucede con las concentraciones de Pb una vez aplicada la enmienda utilizada y así realizar una comparativa según las proporciones empleadas a la muestra de suelo CHSQ-4.

Asimismo, se puede notar que la concentración inicial de Pb sin adulteración alguna en la muestra de suelo CHSQ-4 es de 2,71 [%], no obstante, al momento de aplicar el Biorreparador en un 10 [%] la concentración de Pb disminuye hasta la segunda semana de medición logrando llegar a un valor de 2,10 [%] y a partir de este punto comienza un crecimiento hasta la tercera semana de cuantificación adquiriendo un valor de 2,39 [%], finalmente al día culmine del experimento el valor tiene un descenso consiguiendo un valor final de 2,22 [%] siendo este valor menor al valor inicial.

Por otro lado, para la aplicación de la enmienda en un 30 [%] ocurre un fenómeno un tanto diferente, puesto que, al igual con lo que ocurre en el caso anterior en las primeras dos semanas ocurre una disminución del valor siendo este de 2,32 [%], pese a ello, desde este punto de medición la cuantificación de Pb disponible en esta muestra de suelo comienza un ascenso hasta la última semana de medición llegando a un valor de 3,00 [%] siendo este valor incluso mayor a la concentración inicial de Pb en CHSQ-4.

A continuación, en el gráfico 14 se exhibe los datos recopilados acerca del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  presente en la muestra de suelo CHSQ-4 a lo largo del estudio realizado.



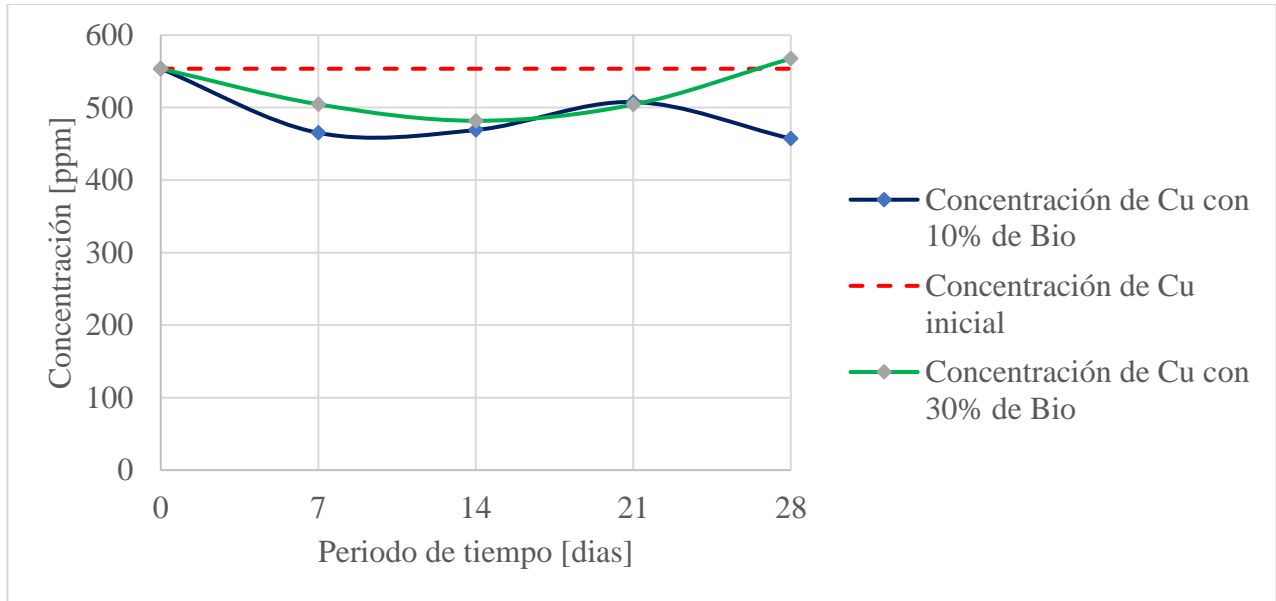
**Gráfico 14. Comparativa de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en la muestra CHSQ-4.**

Del mismo modo que en los casos anteriores en el gráfico 14 es posible avistar el comportamiento del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en la muestra de suelo de interés, también, se advierte que la concentración inicial de este elemento el cual se está estudiando corresponde a 8,31 [%].

Agregando a lo anterior, para el 10 [%] de enmienda aplicada ocurre algo parecido a lo visto en casos anteriores ya que hasta la segunda semana la concentración va en declive tomando un valor de 7,31 [%], luego, el valor aumenta la tercera semana a 7,85 [%] y finalmente vuelve a disminuir recibiendo un valor final de 7,46 [%] siendo este un valor inferior a la concentración inicial.

Por otra parte, para la aplicación del Biorreparador en un 30 [%] al igual que para el 10 [%] las primeras dos semanas los resultados de las cuantificaciones decrece llegando a un valor de 7,69 [%], pero, a partir de este punto las concentraciones adquieren una elevación en su valor hasta el día final del estudio presentando un valor de 8,78 [%] que es mayor que la concentración inicial expuesta con anterioridad.

Finalmente, una vez considerados los anteriores elementos, el gráfico 15 presenta el comportamiento del Cu presente en la muestra CHSQ-4 en todo el periodo del estudio realizado.



**Gráfico 15. Comparativa de Cu en la muestra CHSQ-4.**

A partir del gráfico 15 lo primero que es factible divisar es que al igual que para la muestra CHSQ-3 las concentraciones de Cu captadas por el equipo están en [ppm] a diferencia de los elementos que están en [%], es decir, el Cu se encuentra en menor proporción dentro de la muestra CHSQ-4 que los demás elementos.

En esa misma línea, la concentración inicial de Cu perteneciente a la muestra de suelo sin adjudicar la respectiva enmienda, o sea, en su estado original corresponde a 553,7 [ppm], ahora, una vez empleado el Biorreparador ocurren diferentes casos dentro de la muestra que se comentarán a continuación.

Para un 10 [%] de enmienda atribuida acontece una disminución la primera semana de medición siendo el valor de la concentración de Cu de 465,3 [ppm], a pesar de este acontecimiento, en la segunda y tercera semana la cuantificación aumenta llegando a 507,7 [ppm] y al día final del experimento este valor vuelve a disminuir llegando 457,4 [ppm] siendo este menor a la cuantía inicial.

Por otro lado, para la asignación del 30 [%] del Biorreparador en las primeras dos semanas sucede una caída en la cuantificación del Cu alcanzando un valor de 481,9 [ppm] y a partir de este momento comienza un crecimiento llegando a un valor de 567,7 [ppm] al día final del experimento donde se puede apreciar que este valor es mayor a la concentración inicial expuesta anteriormente.



#### 4.2.4 Análisis de metales posiblemente solubles en agua

Al momento de observar que las variaciones de concentración en el estudio anterior son poco significativas, se ejecuta un tercer experimento a modo de complementar y poder alcanzar conclusiones más consecuentes y de este modo ampliar el análisis de las muestras de suelo CHSQ-3 y CHSQ-4.

Al igual que en el estudio anterior se analizan los mismos elementos potencialmente tóxicos para las muestras utilizadas, así, primeramente, obtendremos las concentraciones iniciales de cada elemento sin la alteración de ninguna proporción de enmienda, estas se pueden ver en la tabla 11 expuesta con anterioridad y a continuación en la tabla 14 se presentan los valores al día 7 del experimento y al igual que en el experimento anterior son los valores promedios conseguidos puesto que se realizan dos mediciones a cada muestra y estas se logran ver en el Anexo F.

**Tabla 14. Promedio de mediciones cuantificadas al séptimo día.**

<b>Muestra</b>	<b>Concentración de Zn [%]</b>	<b>Concentración de Pb [%]</b>	<b>Concentración de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [%]</b>	<b>Concentración de Cu [ppm]</b>
<b>CHSQ-3 + 10% BIO</b>	0,25	2,33	8,40	595,7
<b>CHSQ-3 + 30% BIO</b>	0,23	2,23	7,75	525,1
<b>CHSQ-4 + 10% BIO</b>	0,15	2,71	6,90	387,7
<b>CHSQ-4 + 30% BIO</b>	0,15	2,34	6,57	351,4

Ahora bien, como es un experimento complementario y de esta forma mejorar el análisis propuesto con el estudio anterior es que a ambas muestras se les realiza un lavado previo y se dejaron secar para obtener nuevos resultados al día 14 del estudio que se exhiben en la tabla 15 presentada a continuación, con esto, se puede observar la variación en la movilidad de los elementos tóxicos de interés.

Tabla 15. Promedio de mediciones cuantificadas al último día.

Muestra	Concentración de Zn [ppm]	Concentración de Pb [%]	Concentración de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Concentración de Cu [ppm]
<b>CHSQ-3 + 10% BIO</b>	804,9	1,10	4,28	411,9
<b>CHSQ-3 + 30% BIO</b>	676,7	0,68	3,48	247,4
<b>CHSQ-4 + 10% BIO</b>	1.155	3,18	6,27	330,3
<b>CHSQ-4 + 30% BIO</b>	837,8	0,90	5,19	273,2

Asimismo, para poder tener una noción más clara respecto a los valores anteriores es que se construyen distintos gráficos para los distintos elementos de interés con el objetivo de analizar que sucede con estos a lo largo del tiempo en el que se lleva a cabo el estudio, entonces, primeramente, se analiza lo que sucede con la muestra CHSQ-3.

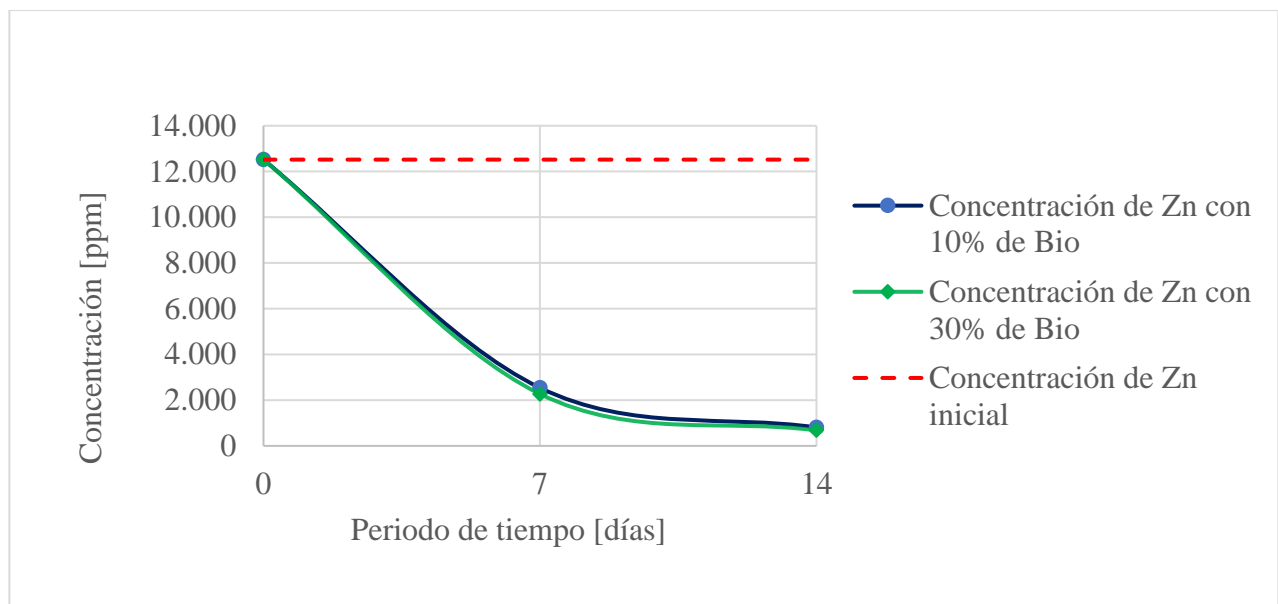
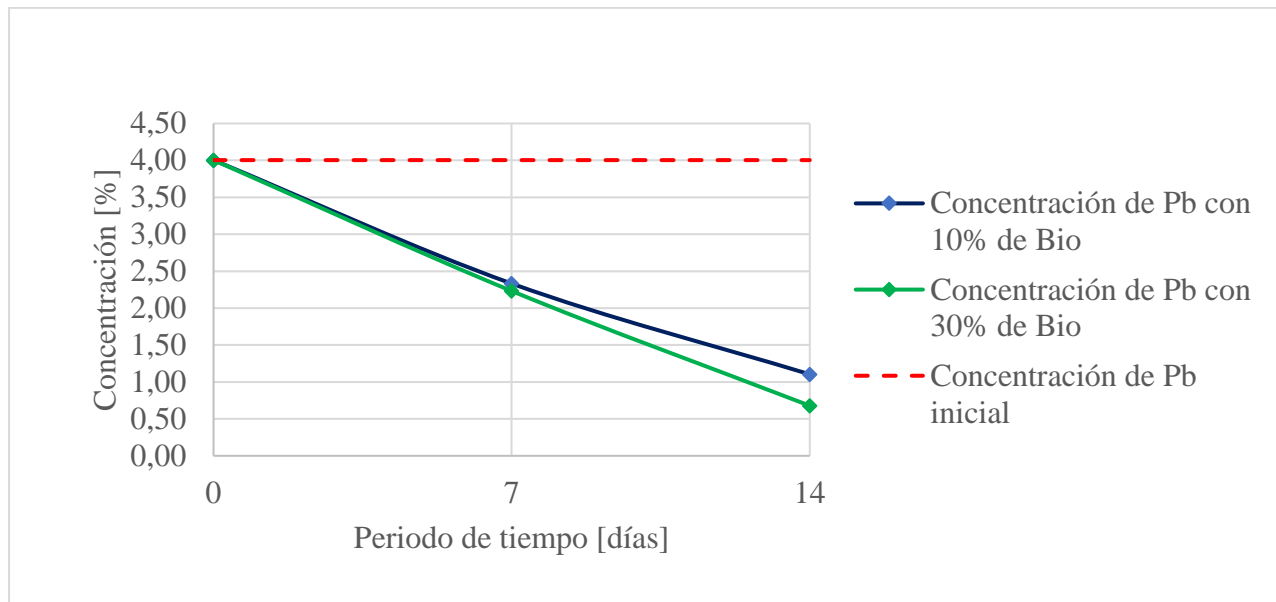


Gráfico 16. Comportamiento de Zn en la muestra CHSQ-3.

En el gráfico 16 anterior se puede advertir una clara disminución en la concentración de Zn desde el momento en el que se emplea el Biorreparador y esto sucede en ambas proporciones aplicadas.

En ambos casos, esto es, para un 10 [%] y 30 [%] de Biorreparador empleado ocurre un descenso de la concentración en un 80% aproximadamente en la primera medición efectuada al

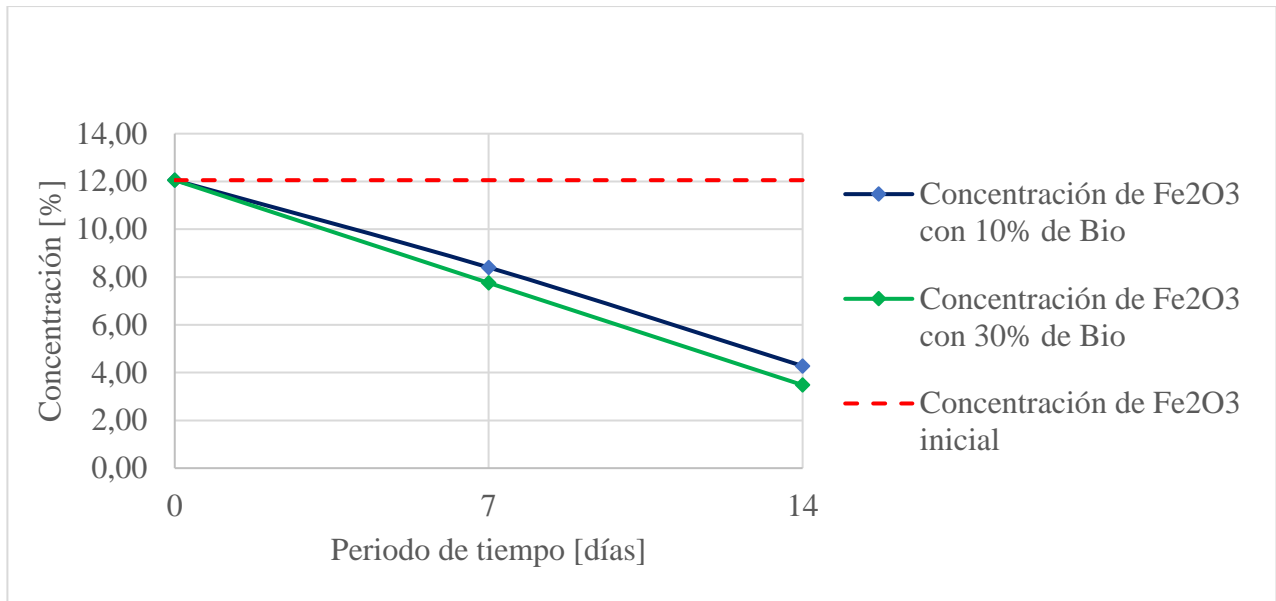
séptimo día e igualmente ocurre algo parecido para la segunda y última medición efectuada al día 14, ya que, en ambas mediciones el descenso fue cercano a un 70%.



**Gráfico 17. Comportamiento de Pb en la muestra CHSQ-3.**

Ahora bien, para el comportamiento de Pb podemos observar que el gráfico 17 hace notar una tendencia a disminuir la concentración.

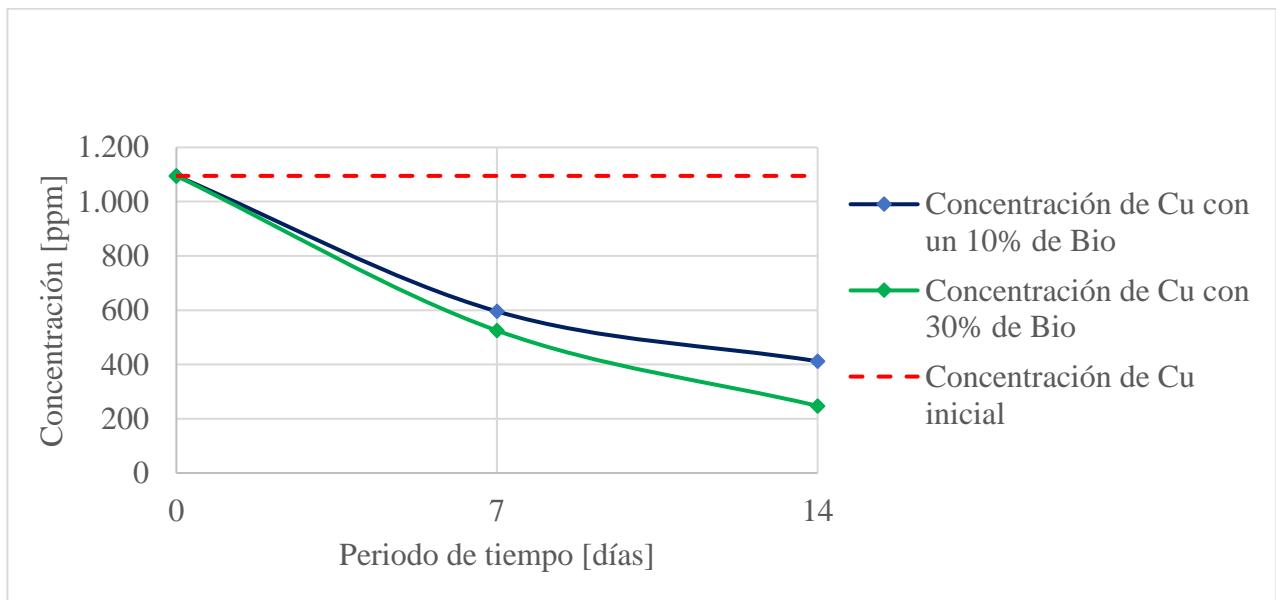
Para ambas proporciones de Biorreparador utilizadas podemos advertir una disminución del 40% aproximadamente al séptimo día, sin embargo, para el último día de medición las tendencias evidenciadas cambian un tanto, para el 10 [%] de enmienda aplicada ocurre una disminución cercana al 50%, por otro lado, para un 30 [%] de Biorreparador empleado sucede una disminución del 70% aproximadamente.



**Gráfico 18. Comportamiento de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en la muestra CHSQ-3.**

Asimismo, en el gráfico 18 se distingue una disminución de la concentración de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a lo largo de lo que perdura el experimento.

Ahora, podemos ver que, si bien para ambas proporciones ocurre un descenso en la concentración notable, existe un descenso un tanto mayor para la aplicación de la enmienda en un 30 [%], ya que, para este caso la disminución es cercana a un 71% desde el día inicial al día final de medición en comparación a un 64% ocurrido para un 10 [%] de Biorreparador aplicado.

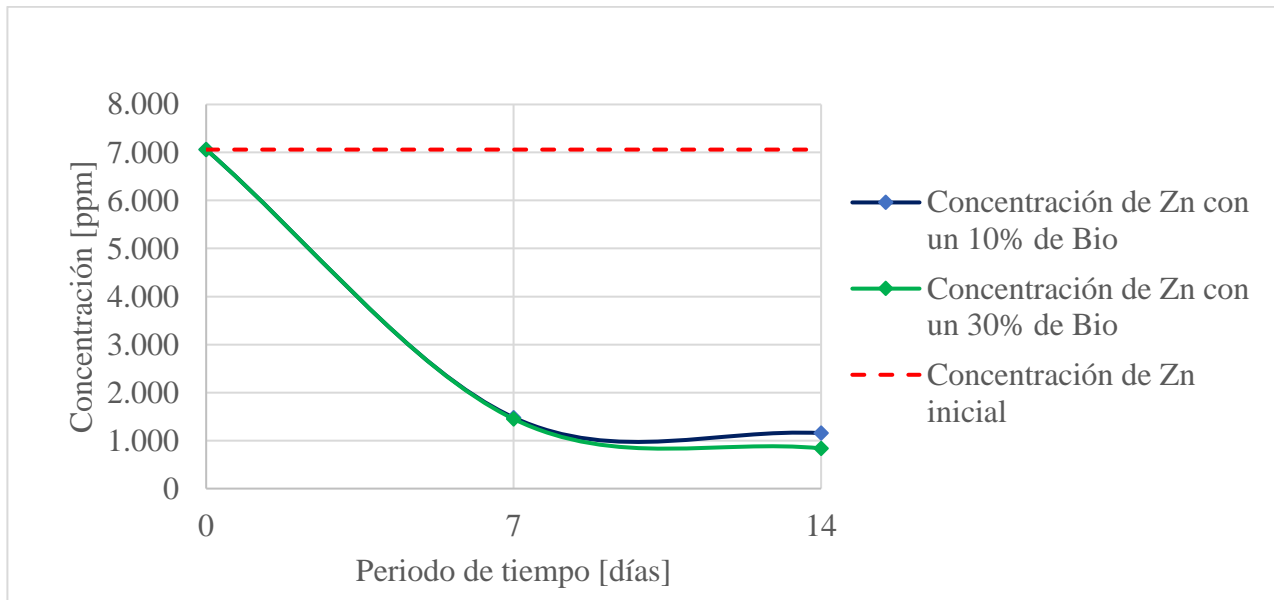


**Gráfico 19. Comportamiento de Cu en la muestra CHSQ-3.**

Al igual que lo que sucede en el caso anterior con la concentración de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , para el Cu sucede algo similar, pero se puede observar una diferencia un tanto mayor en las proporciones de Biorreparador utilizado y esto se puede evidenciar gracias al gráfico 19 presentado anteriormente.

Para un 10 [%] de enmienda aplicada ocurre un descenso del 46% aproximadamente al momento de realizar la primera medición a diferencia del 52% de disminución para el 30 [%] de enmienda empleada, ahora bien, para el último día de medición disminuye un 31% para la primera proporción utilizada y un 52% para el porcentaje de Biorreparador mayor utilizado.

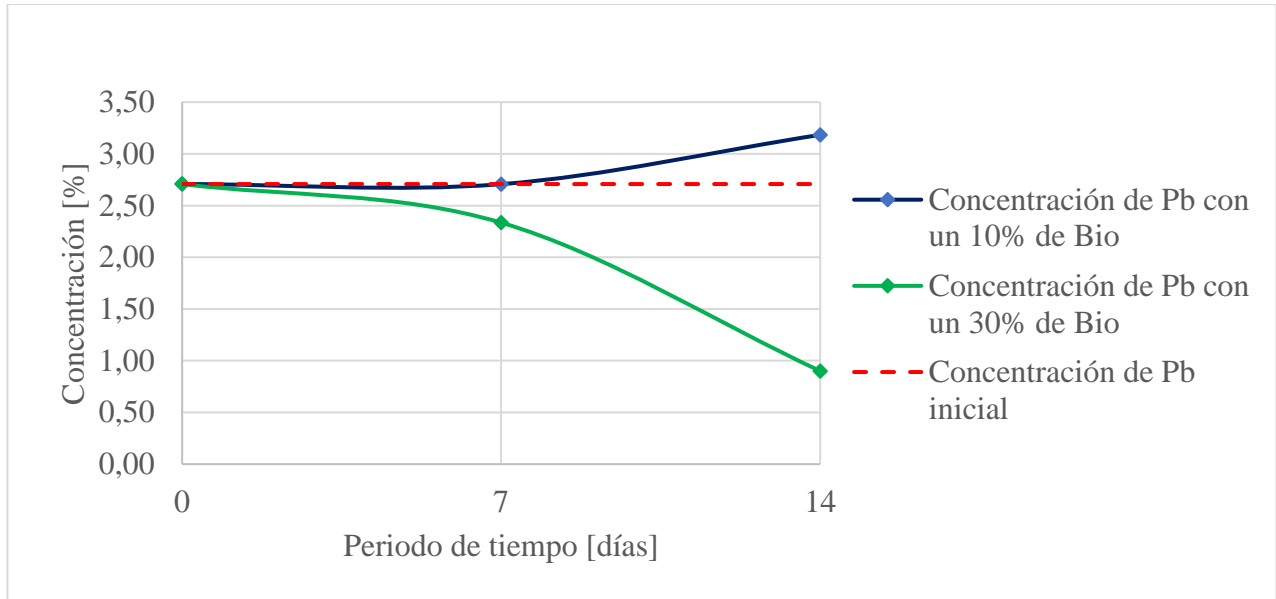
Por otro lado, para CHSQ-4 igual se producen distintos gráficos para poder evidenciar que sucede con cada elemento de interés presentes en la muestra de suelo.



**Gráfico 20. Comportamiento de Zn en la muestra CHSQ-4.**

Para este primer elemento analizado en esta muestra de suelo sucede algo similar a lo que pasa con la muestra de suelo anterior, ya que, como se puede observar en el gráfico 20, las concentraciones de Zn para ambas proporciones de Biorreparador utilizado disminuyen considerablemente, cercano a un 80% al momento de realizar la primera medición, tras lo cual parece alcanzarse un equilibrio.

Ahora bien, se advierte una ligera diferencia entre el 10 [%] y 30 [%] de enmienda utilizada, ya que, para el primer caso la disminución de la concentración es cercana a un 83.6%, sin embargo, para el segundo caso esta llega cercano al 88%.

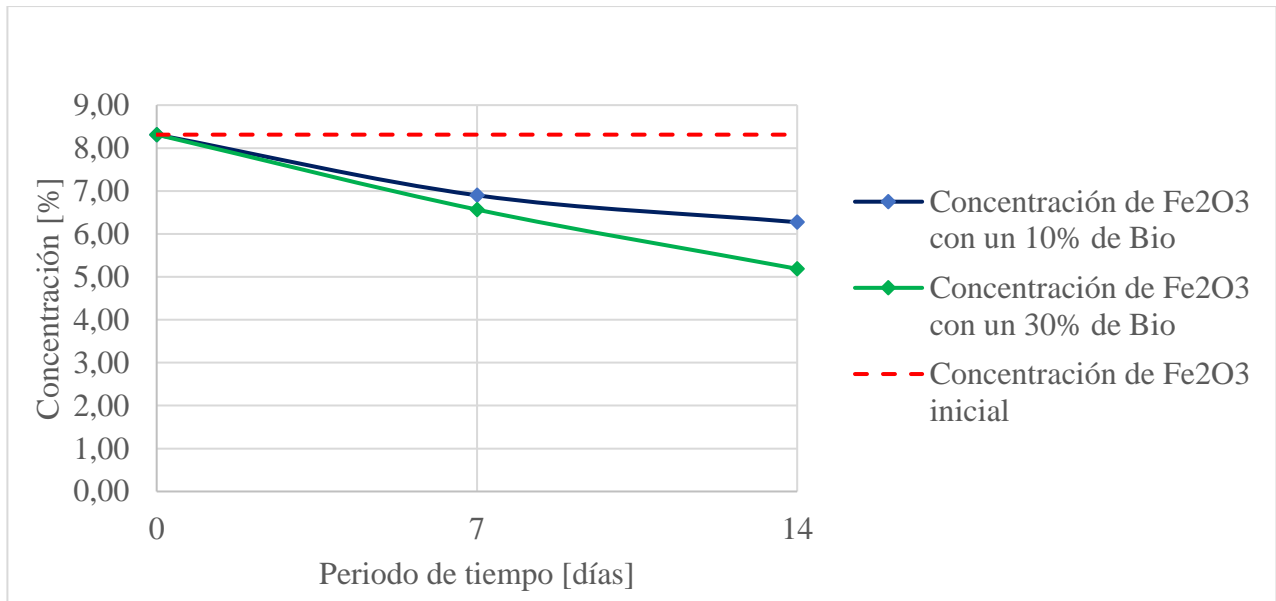


**Gráfico 21. Comportamiento de Pb en la muestra CHSQ-4.**

Para este caso particular presentado por el gráfico 21, ocurre un fenómeno no esperado para las mediciones realizadas con un 10 [%] de Biorreparador utilizado, ya que, al séptimo día transcurrido del estudio las concentraciones de Pb se mantienen prácticamente en el mismo valor, sin embargo, para el día final de medición la concentración aumenta inesperadamente casi un 18%.

Por otro lado, ocurre lo contrario para el 30 [%] de Biorreparador implementado y se continua con la tendencia apreciada en los demás elementos de interés, esto pues, para el primer día de medición sucede una disminución de la concentración de Pb cercano a un 14% y para el día final este disminuye un 62% aproximadamente.

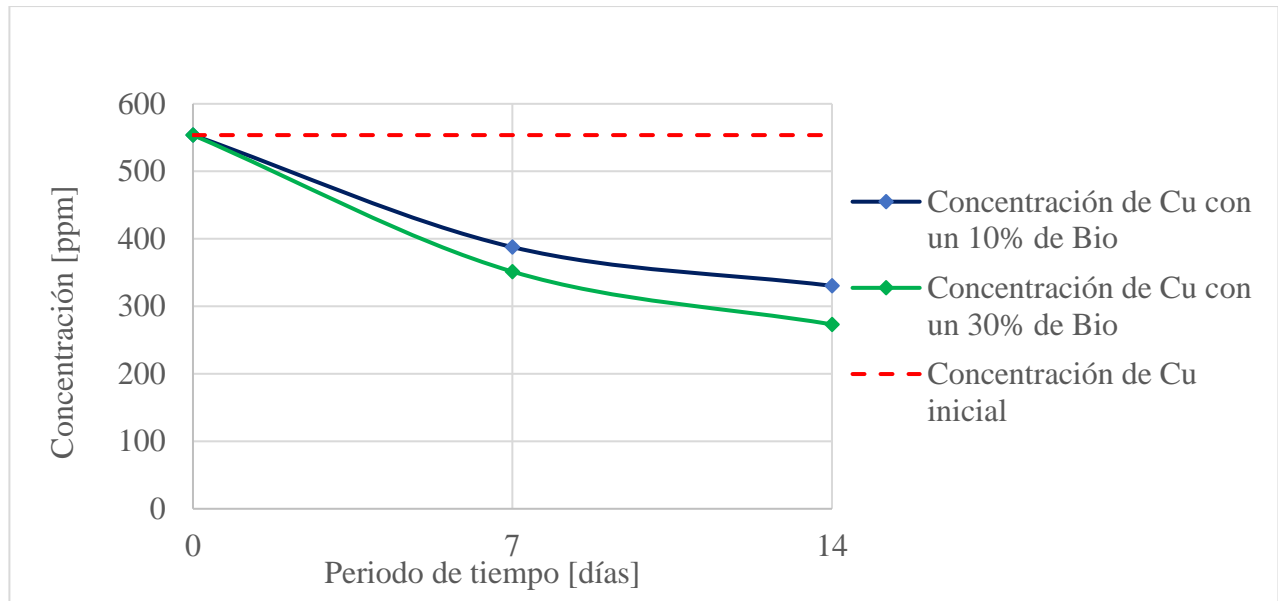
Esta diferencia podría achacarse a algún problema analítico o en la preparación del experimento.



**Gráfico 22. Comportamiento de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en la muestra CHSQ-4.**

Continuando con el comportamiento del Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presentado en el gráfico 22 se logra advertir una disminución en ambas proporciones de enmienda utilizada, sin embargo, se aprecia una diferencia entre ambas.

Para el caso del 10 [%] utilizado, la primera semana la concentración de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> disminuye un 17%, en cambio para un 30 [%] utilizado esta disminuye un tanto más llegando a un 21%, asimismo, para la segunda semana de medición solo disminuye un 9% para el primer caso presentado y la diferencia es más notoria en el segundo caso ya que el porcentaje de disminución llega a un 21% final.



**Gráfico 23. Comportamiento de Cu en la muestra CHSQ-4.**

El gráfico 23 presenta el comportamiento del Cu en la muestra de suelo CHSQ-4, donde se puede percibir una disminución en ambos casos presentados, no obstante, para un 30 [%] de Biorreparador utilizado la disminución de concentración es mayor en comparación a un 10 [%] de enmienda aplicada.

Para un 10 [%] de enmienda utilizada la disminución la primera semana de medición es de un 30 [%] aproximadamente y para la última semana de medición esta sigue disminuyendo, llegando a casi un 15% de disminución.

Por otro lado, para un 30 [%] de Biorreparador igualmente existe una disminución, pero más notoria que en el caso anterior, puesto que, para la primera medición efectuada al séptimo día la disminución es cercana a un 37% y para el día final de cuantificación este valor disminuye en un 22% aproximadamente.

En general, es indiscutible que se logran mejores resultados finalizando el tercer estudio, ya que, revelan de una mejor forma el efecto del Biorreparador en base a la variación de las partículas de cada elemento de interés evaluado.



## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este apartado se argumenta lo sucedido en cada estudio respecto a los datos obtenidos y con esto poder llegar a una conclusión razonable y comprobar si estos resultados conseguidos fueron los esperados realmente al inicio del proyecto.

En cuanto al primer estudio realizado, los resultados obtenidos, al respecto de la movilidad del mercurio promovida por el biorremediador, son favorables, ya que, las concentraciones de Hg presentes en las diferentes muestras de suelo disminuyen notablemente al momento de aplicar el Biosurfactante natural. Con todo lo mencionado recientemente, podemos establecer que la enmienda utilizada cumple con el objetivo de reducir los niveles de concentración de este peligroso elemento, en proporciones variables de unas muestras a otras, diferencias que pueden atribuirse a diferencias en la movilidad inicial del Hg en cada muestra.

En esa misma línea, es importante hacer mención del extraño caso que ocurre con la muestra WUAJ2 antigua, dado que, la concentración de esta muestra de suelo una vez que se le aplica el Biorreparador aumenta al doble de su concentración inicial, lo que no tiene un fondo lógico para lograr argumentar esta situación. Si se busca alguna razón probable de lo sucedido, se tiende a pensar en algún error del equipo al momento de efectuar la medición o es posible que el equipo utilizado haya cuantificado las partículas presentes en la muestra que tenían una mayor concentración de Hg, esto porque el Biorreparador pudo liberar partículas de Hg presentes en el agua, no obstante, cualquiera sea la opción que se pudiese razonar, ninguna de estas puede tomar como una opción verídica puesto que, no se tiene más estudios realizados a esta muestra con este porcentaje de enmienda.

Ahora bien, para el segundo experimento realizado, relativo a las variaciones en la movilidad de los elementos Pb, Zn, Cu y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en muestras ambientales procedentes de suelos y materiales residuales de una mina de Pb-Zn, se alcanzaron resultados que se pueden considerar como no favorables. Sin embargo, se tenía en conocimiento que el equipo utilizado cuantifica la disponibilidad del elemento de interés presente en la muestra, asimismo, lo que no se esperaba era que en la mayoría los casos exhibidos la disminución advertida para un 10 [%] de Biorreparador utilizado era mayor que en un 30 [%] y en algunos casos este último presentaba concentraciones finales mayores a las iniciales. Por otro lado, se logra identificar, gracias a los gráficos y a los números presentados en las tablas, que al momento de realizar esta última medición las diferencias de concentraciones cuantificadas no son muy notables, lo que hace pensar que no hace diferencia la

cantidad de enmienda que se utiliza, y que, en definitiva, el producto aplicado no afecta a la movilidad de los elementos considerados.

Por su parte, tras obtener los primeros resultados del segundo experimento, se opta por efectuar un tercer estudio complementario a este, analizando la solubilidad de cada elemento de interés presentes en las muestras CHSQ-3 y CHSQ-4, con el objetivo de analizar si realmente el Biosurfactante natural afecta directamente a la muestra y así utilizar correctamente el instrumento de medición. Del mismo modo, a partir de los resultados obtenidos en este último estudio y complementándolos con los resultados obtenidos en el estudio anterior, es viable precisar que el Biorreparador tiene un efecto considerable al momento de aplicarlo en las distintas muestras de suelo, no obstante, ocurre un hecho no esperado, específicamente en el comportamiento del Pb para la muestra CHSQ-4 en un 10 [%] de enmienda aplicada, puesto que, la concentración final medida de este elemento fue mayor a la inicial, esto da pie a creer que pudo ser un error de medición pero no se tienen pruebas contundentes a esta probabilidad.

Dejando de lado ese caso particular, el estudio demostró que las concentraciones de los elementos de interés potencialmente tóxicos para los suelos van en decrecimiento y consigo el aumento de la movilidad, así, se logró cumplir con lo que se esperaba en un comienzo del estudio, es decir, estos son solubles en agua, puesto que, al momento de realizar el lavado y volver a realizar la cuantificación estas concentraciones iban en descenso y no tuvieron un ascenso imprevisto.

Es importante mencionar, la significativa disminución de la conductividad eléctrica que logra “PETRA ZYME” y a su vez se recomienda continuar con distintos estudios que tengan relación directa con esta enmienda natural, esto ya que, se comprueba el impacto que produce en los distintos metales, estos estudios recomendados pueden estar orientados a la propia conductividad eléctrica, realizar estudios con mayor duración o incluso el análisis de diferentes elementos que igualmente puedan provocar daños al ecosistema.

Finalmente, no se logra observar si la utilización en un 30 [%] de Biorreparador tiene una mayor eficacia en comparación con el 10 [%] utilizado, puesto que no se advierte una razón de “mayor cantidad de enmienda significa una disminución de concentración mayor”. Esto da pie a futuras investigaciones que puedan tener relación a la utilización de la enmienda en distintas proporciones, o la visualización en los metales de interés específicos.

## 6. REFERENCIAS

- Acevedo-Sandoval, O., Ortiz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M., & Cruz-Chávez, E. (2004). *El papel de óxidos de hierro en suelos*. Chapingo.
- Agencia de protección ambiental de Estados Unidos. (2023). EPA. Obtenido de EPA: <https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-el-mercurio>
- Altolaguirre, Y., Campanero, R., Campos, S., & Font, P. (2013). *Almaden y su historia ¿Indicios de sostenibilidad?* Obtenido de Universidad Complutense de Madrid : [https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-44157/Almaden\\_2\\_Final.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-44157/Almaden_2_Final.pdf)
- ATSDR. (2016). *Resúmenes de Salud Pública - Cinc (Zinc)*. Obtenido de Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs60.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs60.html)
- Caiza, G. F. (2018). *Mercurio en el suelo. Contaminación y remediación*. Universidad Complutense. Obtenido de <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/GISELA%20FERNANDA%20CAIZA%20CAIZA.pdf>
- Cano, S. E. (2012). *Contaminación con mercurio por la actividad minera*. Obtenido de Instituto Nacional de Salud: <https://www.redalyc.org/pdf/843/84324092001.pdf>
- Cruz, A. B., Barra, J. E., Castillo, R. d., & Gutiérrez, C. (2004). *La calidad del suelo y sus indicadores*. Ecosistemas. Obtenido de Revista ecosistemas: <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/572>
- García, C., Moreno, J. L., Hernández, M. T., & Polo, A. (2002). *Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo*. Ciencia y medioambiente. Obtenido de Consejo superior de investigaciones científicas.
- Gómez, M. R., & Barreto, L. (2011). *Efecto de la materia orgánica del suelo en la retención de contaminantes*. Bogota.
- Higueras, P., Esbrí, J. M., Oyarzun, R., García, J. A., & Barrenechea., J. F. (2010). *El Grupo Minero San Quintín: Geología y Yacimientos Minerales*. Ciudad Real: UCLM. Obtenido de Aulados:

[https://www.aulados.net/GEMM/Documentos/San\\_Quintin\\_Innova/Geologia\\_YMMM\\_Mineria.pdf](https://www.aulados.net/GEMM/Documentos/San_Quintin_Innova/Geologia_YMMM_Mineria.pdf)

Iberdrola. (2022). *La contaminación del suelo, sus efectos sobre nuestro futuro y qué podemos hacer para reducirla*. Recuperado el 2024, de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/contaminacion-del-suelo-causas-efectos-soluciones>

Jiménez, M. C., & Rodríguez, L. D. (2022). *Tratamiento de suelos impactados por elementos traza de zinc, cobre y níquel mediante aplicación de zeolitas como agente inmovilizador*. Bogota.

Martínez, K. J. (2021). *Evaluación de la contaminación por plomo derivada de la*. Bogota.

Medline Plus. (2021). *Hierro en la dieta*. Recuperado el 2024, de <https://medlineplus.gov/spanish/iron.html>

Mineralogía Topográfica Ibérica. (2012). *Minas de San Quintin: Poblado minero, Villa mayor de Calatrava, Ciudad Real*. Obtenido de <https://www.mtiblog.com/2012/02/minas-de-san-quintin-poblado-minero.html>

PennState Extension. (2023). *Introducción a los Suelos: La Calidad de los Suelos*. Obtenido de PennState Extension: <https://extension.psu.edu/introduccion-a-los-suelos-la-calidad-de-los-suelos>

Ramos, M. (2010). *Minas abandonadas: una amenaza letal para miles de chilenos*. Obtenido de CiperChile: <https://www.ciperchile.cl/2010/10/26/minas-abandonadas-una-amenaza-letal-para-miles-de-chilenos/>

Rodríguez, L., Ruiz, E., Alonso-Azcárate, J., & Rincón, J. (2009 ). *Heavy metal distribution and chemical speciation in tailings and soils around a Pb–Zn mine in Spain*. Ciudad Real.

Sanz, C. (2020). *Miciudadreal*. Recuperado el 2023, de <https://www.miciudadreal.es/2020/11/07/un-recorrido-imprescindible-por-el-paisaje-marciano-de-las-minas-de-san-quintin/>

Substrata. (2022). *Substrata*. Obtenido de Substrata: <https://www.substrata.es/petra-zyme>

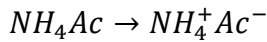
Universidad de Burgos. (2020). *Fluorescencia de Rayos x*. Obtenido de UBU: <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/rayos-x/fluorescencia-de-rayos-x-frx>

Universidad Rey Juan Carlos. (2010). Expertos solicitan la restauración urgente del Grupo Minero de San Quintín. Obtenido de Agencia Sinc: <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Expertos-solicitan-la-restauracion-urgente-del-Grupo-Minero-de-San-Quintin>

## 7. ANEXOS

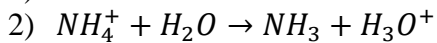
A continuación, se presentan los datos que no fueron presentados a lo largo del presente informe, sin embargo, son de gran utilidad para poder examinar y entender cada uno de los estudios realizados de una mejor manera.

### A. Fórmulas para comprobar que el pH del $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ es 7

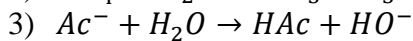


E.A	E.B
$\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{O}$
$\text{NH}_4^+ : 1\text{M}$	$\text{Ac}^- : 1\text{M}$

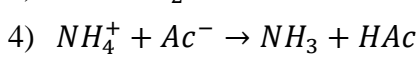
$$1) K = 10^{-14}$$



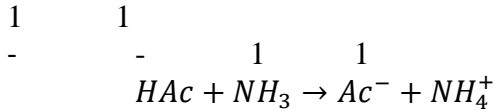
$$K = 10^{-9.2}$$



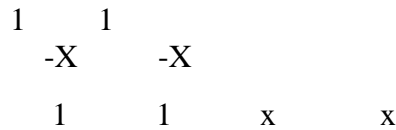
$$K = 10^{-9.2}$$



$$K = \frac{10^{-9.2}}{10^{-4.8}} = 10^{4.4}$$



$$K = 10^{-4.4}$$



E.A	E.B
$\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{O}$
$\text{HAc}$	$\text{NH}_3$

$$\text{pH} = \frac{1}{2} \left[ \text{p}K_{\text{HAc}} + \text{p}K_{\text{NH}_4^+} - \log \frac{|\text{HAc}| |\text{NH}_4^+|}{|\text{NH}_3| |\text{Ac}^-|} \right] = \frac{1}{2} [4,8 + 9,2] = 7$$

### B. Pasos para la utilización del Lumex

- 1) Encender el ordenador y poner la contraseña.
- 2) Una vez cargado *Windows*, encender el Lumex RA-915+ y oprimir el botón de "lamp" durante 5 [s].
- 3) Encender la unidad de bombas del pirolizador (PYRO).
- 4) Click en el *software* del equipo (RAPID)
- 5) Elegir la opción "*Sample análisis*"
- 6) En la esquina superior derecha poner el equipo en "mode 5" y click en "start"
- 7) En la esquina superior izquierda click en "start" para que comience a verse en el gráfico la señal del equipo. Debe de variar en un rango estrecho, de no más de 20

números. Si varía más, significa que hay exceso de Hg atmosférico en el laboratorio o el pirolizador se encuentra sucio y hay que limpiar las lentes y el pirolizador.

8) Esperar 30 [min] para estabilización térmica de la lámpara analítica.

### C. Calibración del equipo Lumex RA-915+

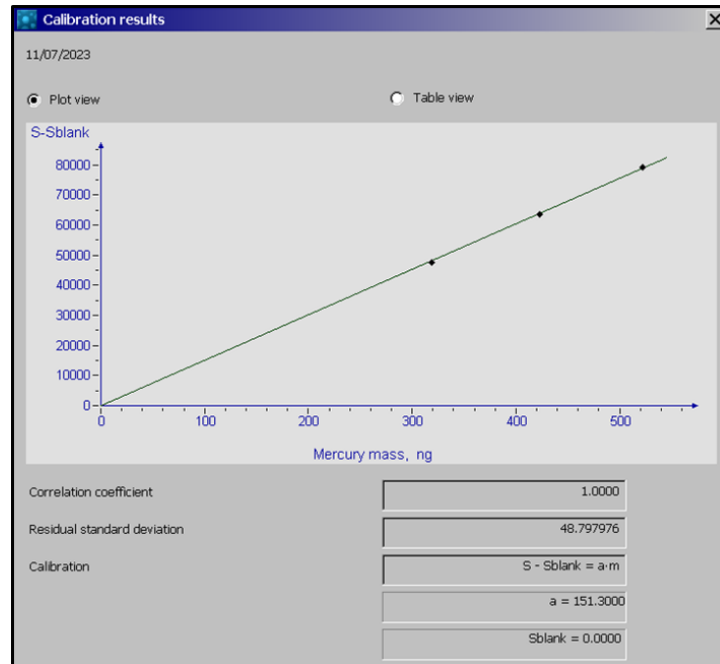
Antes de realizar cada medición del Hg total de las muestras de interés, se efectúa una calibración al espectrómetro, esto con el fin de obtener mejores resultados cada vez que se realiza el proceso, para esto hay que seguir una serie de pasos los cuales se detallan a continuación:

- **Primero:** Dentro del software RAPID se sitúa el equipo en modo calibración.
- **Segundo:** Se otorga de nombre a la muestra NIST 2710a con referencia 9880 (véase Ilustración 16).



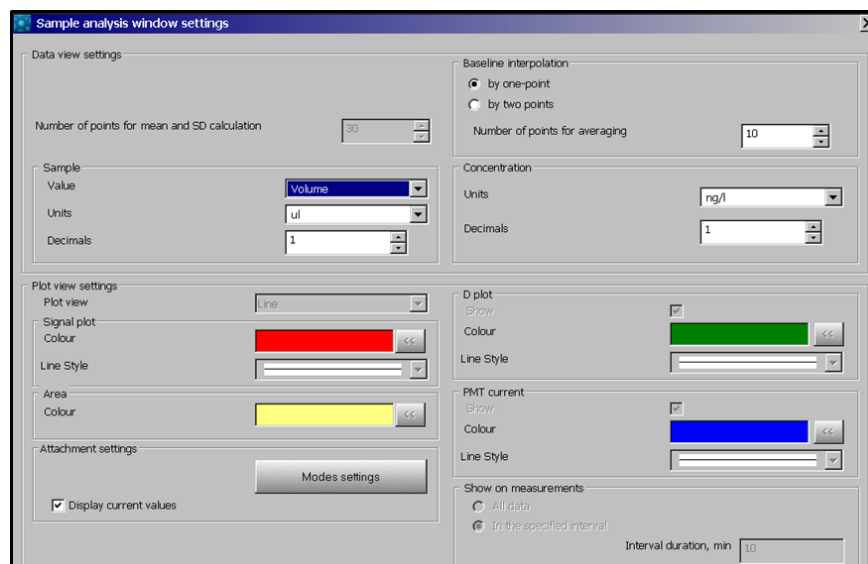
**Ilustración 27.** Estándares “Montana Soil” utilizados para la calibración del equipo LUMEX RA-915+.

- **Tercero:** Se pesan tres muestras en la báscula de precisión OAHUS, estas muestras deben tener un pesaje con razón 1:2:3, es decir, si se pesa 10 [mg], la siguiente debe pesar 20 [mg] y la última 30 [mg].
- **Cuarto:** Luego de obtener los resultados de los tres pesajes se seleccionan y se oprime “*calculate calibration*” y en “*calib name*” se escribe la fecha del día en el que se calibró.
- **Quinto:** Observar que los puntos estén lo más cercanos a la recta obtenida y guardar los resultados (véase Ilustración 28).



**Ilustración 28. Recta obtenida al momento de realizar la calibración.**

Teniendo la calibración ya realizada, el equipo LUMEX-915+ estaría óptimo para su uso, asimismo cabe recalcar que, al estar cuantificando el Hg en su estado líquido, se debe verificar que los parámetros del equipo estén correctos, es decir, estén en medición de volumen y no de masa (véase Ilustración 29).



**Ilustración 29. Unidades de medida bajo las cuales se cuantifica el Hg total.**



### D. Experimento 1

Tabla 16. Concentraciones obtenidas para el día 0 del estudio.

<b>DIA 0</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Medida [μl]</b>	<b>SP7 [mg]</b>	<b>Concentración de Hg [ng/l]</b>	<b>Promedio [ng/l]</b>	<b>RSD [%]</b>
<b>NC1</b>	100	80-90	152.100	163.000	6,8
			174.200		
			162.800		
<b>WUAJ2 Antiguo</b>	100	80-90	9.158.000	9.118.000	3,1
			8.819.000		
			9.376.000		
<b>WUAJ2 Nuevo</b>	100	80-90	12.500.000	12.650.000	4,6
			12.160.000		
			13.290.000		

Tabla 17. Concentraciones obtenidas para el día 7 del estudio.

<b>DIA 7</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Medida [μl]</b>	<b>SP7 [mg]</b>	<b>Concentración de Hg [ng/l]</b>	<b>Promedio [ng/l]</b>	<b>RSD [%]</b>
<b>NC1</b>	100	80-90	136.100	135.300	1,1
			133.600		
			136.200		
<b>WUAJ2 Antiguo</b>	100	80-90	4.272.000	4.515.000	7,4
			4.899.000		
			4.375.000		
<b>WUAJ2 Nuevo</b>	100	80-90	7.190.000	7.262.000	1,8
			7.181.000		
			7.414.000		

Tabla 18. Concentraciones obtenidas para el día 14 del estudio.

<b>Día 14</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Medida [μl]</b>	<b>SP7 [mg]</b>	<b>Concentración de Hg [ng/l]</b>	<b>Promedio [ng/l]</b>	<b>RSD [%]</b>
<b>NC1</b>	100	80-90	83.880	82.620	4,5
			85.550		
			78.430		
<b>WUAJ2 Antiguo</b>	100	80-90	4.154.000	4.109.000	2,3
			4.174.000		
			4.000.000		
<b>WUAJ2 Nuevo</b>	100	80-90	9.576.000	9.080.000	5,7
			9.126.000		
			8.538.000		

Tabla 19. Concentraciones obtenidas para el día 21 del estudio.

<b>Día 21</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Medida [μl]</b>	<b>SP7 [mg]</b>	<b>Concentración de Hg [ng/l]</b>	<b>Promedio [ng/l]</b>	<b>RSD [%]</b>
<b>NC1</b>	100	80-90	50.250	54.690	7,1
			56.480		
			57.360		
<b>WUAJ2 Antiguo</b>	100	80-90	4.850.000	4.892.000	1,3
			4.965.000		
			4.860.000		
<b>WUAJ2 Nuevo</b>	100	80-90	11.190.000	11.480.000	2,2
			11.620.000		
			11.620.000		

Tabla 20. Concentraciones obtenidas para el día 28 del estudio.

Dia 28					
Muestra	Medida [μl]	SP7 [mg]	Concentración de Hg [ng/l]	Promedio [ng/l]	RSD [%]
NC1	100	80-90	52.090	55.530	6,1
			55.620		
			58.890		
WUAJ2 Antiguo	100	80-90	3.324.000	3.142.000	5,1
			3.080.000		
			3.020.000		
WUAJ2 Nuevo	100	80-90	7.514.000	7.533.000	1,3
			7.643.000		
			7.443.000		

## E. Experimento 2

Tabla 21. pH y conductividad eléctrica para el día 14 del experimento.

Muestra	pH	Conductividad eléctrica [μS/cm]
CHSQ-3 + 10 % BIO	3,23	4.383
CHSQ-3 + 30 % BIO	3,25	4.190
CHSQ-4 + 10 % BIO	3,60	2.767
CHSQ-4 + 30 % BIO	3,71	2.507

Tabla 22. pH y conductividad eléctrica para el día 21 del experimento.

Muestra	pH	Conductividad eléctrica [μS/cm]
CHSQ-3 + 10 % BIO	3,34	1.652
CHSQ-3 + 30 % BIO	3,36	1.186
CHSQ-4 + 10 % BIO	3,71	2.495
CHSQ-4 + 30 % BIO	3,80	2.268

Tabla 23. Concentraciones iniciales sin enmienda para los elementos de interés.

Muestra	Concentración de Zn [%]	Concentración de Pb [%]	Concentración de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Concentración de Cu [ppm]
CHSQ-3 (1)	1,25	4,03	12,10	1.120
CHSQ-3 (2)	1,25	3,98	12,01	1.070
CHSQ-4 (1)	0,71	2,69	8,27	550,3
CHSQ-4 (2)	0,71	2,73	8,35	557,0

Tabla 24. Concentraciones de los metales de interés para el día 7 del experimento.

<b>Muestra</b>	<b>Concentración de Zn [%]</b>	<b>Concentración de Pb [%]</b>	<b>Concentración de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [%]</b>	<b>Concentración de Cu [ppm]</b>
<b>CHSQ-3 + 10% BIO (1)</b>	0,93	3,32	9,59	852,5
<b>CHSQ-3 + 10% BIO (2)</b>	0,88	3,15	9,36	816,9
<b>CHSQ-3 + 30% BIO (1)</b>	1,04	4,00	12,55	1.030
<b>CHSQ-3 + 30% BIO (2)</b>	1,05	3,91	12,43	1.040
<b>CHSQ-4 + 10% BIO (1)</b>	0,53	2,17	7,01	449,5
<b>CHSQ-4 + 10% BIO (2)</b>	0,57	2,35	7,82	481,0
<b>CHSQ-4 + 30% BIO (1)</b>	0,58	2,33	8,12	497,8
<b>CHSQ-4 + 30% BIO (2)</b>	0,60	2,45	8,30	511,4

Tabla 25. Resumen de los datos obtenidos para el día 7 del experimento.

<b>Muestra</b>	<b>Concentración de Zn [%]</b>	<b>Concentración de Pb [%]</b>	<b>Concentración de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [%]</b>	<b>Concentración de Cu [ppm]</b>
<b>CHSQ-3 + 10% BIO</b>	0,90	3,23	9,48	834,7
<b>CHSQ-3 + 30% BIO</b>	1,04	3,95	12,49	1.035
<b>CHSQ-4 + 10% BIO</b>	0,55	2,26	7,41	465,3
<b>CHSQ-4 + 30% BIO</b>	0,59	2,39	8,21	504,6

Tabla 26. Concentraciones de los metales de interés para el día 14 del experimento.

Muestra	Concentración de Zn [%]	Concentración de Pb [%]	Concentración de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Concentración de Cu [ppm]
<b>CHSQ-3 + 10% BIO (1)</b>	0,98	3,61	10,35	889,3
<b>CHSQ-3 + 10% BIO (2)</b>	0,95	3,51	10,19	880,1
<b>CHSQ-3 + 30% BIO (1)</b>	1,05	4,06	12,80	1.050
<b>CHSQ-3 + 30% BIO (2)</b>	1,04	3,99	12,68	1.030
<b>CHSQ-4 + 10% BIO (1)</b>	0,54	2,03	7,15	458,0
<b>CHSQ-4 + 10% BIO (2)</b>	0,55	2,17	7,47	480,2
<b>CHSQ-4 + 30% BIO (1)</b>	0,55	2,18	7,25	457,1
<b>CHSQ-4 + 30% BIO (2)</b>	0,61	2,45	8,12	506,6

Tabla 27. Resumen de los datos obtenidos para el día 14 del experimento.

Muestra	Concentración de Zn [%]	Concentración de Pb [%]	Concentración de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Concentración de Cu [ppm]
<b>CHSQ-3 + 10% BIO</b>	0,97	3,56	10,27	884,7
<b>CHSQ-3 + 30% BIO</b>	1,05	4,03	12,74	1.040
<b>CHSQ-4 + 10% BIO</b>	0,54	2,10	7,31	469,1
<b>CHSQ-4 + 30% BIO</b>	0,58	2,32	7,69	481,9

Tabla 28. Concentraciones de los metales de interés para el día 21 del experimento.

<b>Muestra</b>	<b>Concentración de Zn [%]</b>	<b>Concentración de Pb [%]</b>	<b>Concentración de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[%]</b>	<b>Concentración de Cu [ppm]</b>
<b>CHSQ-3 + 10% BIO (1)</b>	1,10	3,98	11,16	995,2
<b>CHSQ-3 + 10% BIO (2)</b>	0,99	3,54	10,41	886,5
<b>CHSQ-3 + 30% BIO (1)</b>	1,04	3,92	12,21	1.000
<b>CHSQ-3 + 30% BIO (2)</b>	0,93	3,50	10,81	899,6
<b>CHSQ-4 + 10% BIO (1)</b>	0,57	2,40	7,87	511,4
<b>CHSQ-4 + 10% BIO (2)</b>	0,56	2,38	7,83	504,0
<b>CHSQ-4 + 30% BIO (1)</b>	0,61	2,40	8,07	517,8
<b>CHSQ-4 + 30% BIO (2)</b>	0,61	2,37	8,06	490,6

Tabla 29. Resumen de los datos obtenidos para el día 21 del experimento.

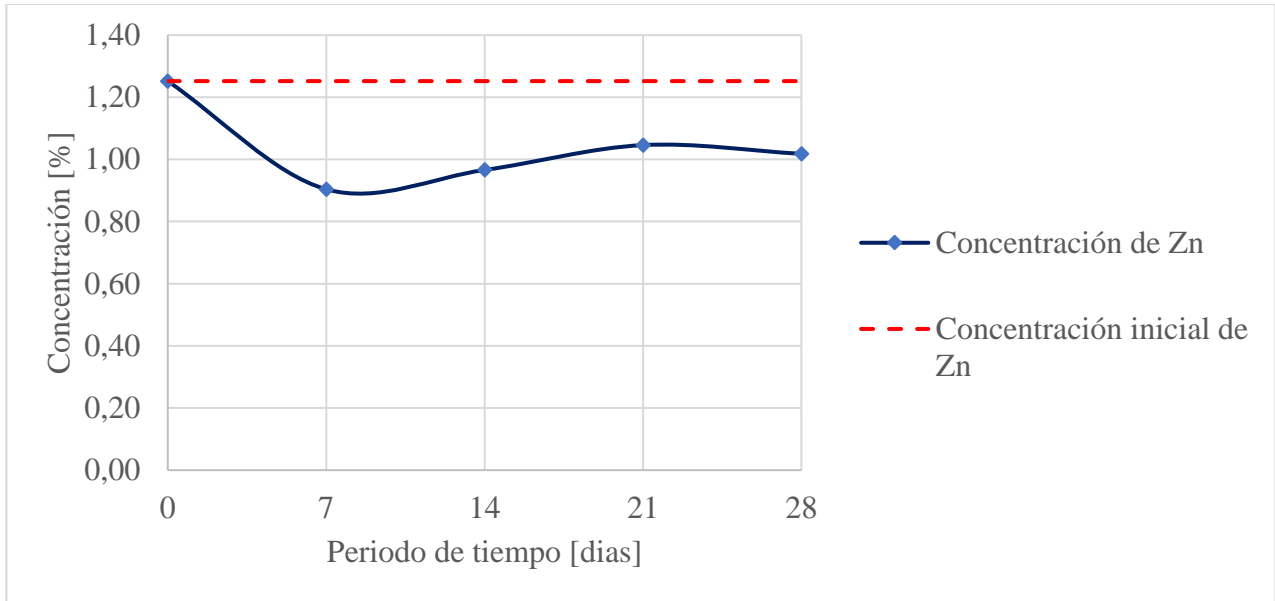
<b>Muestra</b>	<b>Concentración de Zn [%]</b>	<b>Concentración de Pb [%]</b>	<b>Concentración de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[%]</b>	<b>Concentración de Cu [ppm]</b>
<b>CHSQ-3 + 10% BIO</b>	1,05	3,76	10,79	940,9
<b>CHSQ-3 + 30% BIO</b>	0,99	3,71	11,51	949,8
<b>CHSQ-4 + 10% BIO</b>	0,56	2,39	7,85	507,7
<b>CHSQ-4 + 30% BIO</b>	0,61	2,38	8,06	504,2

Tabla 30. Concentraciones de los metales de interés para el día 28 del experimento.

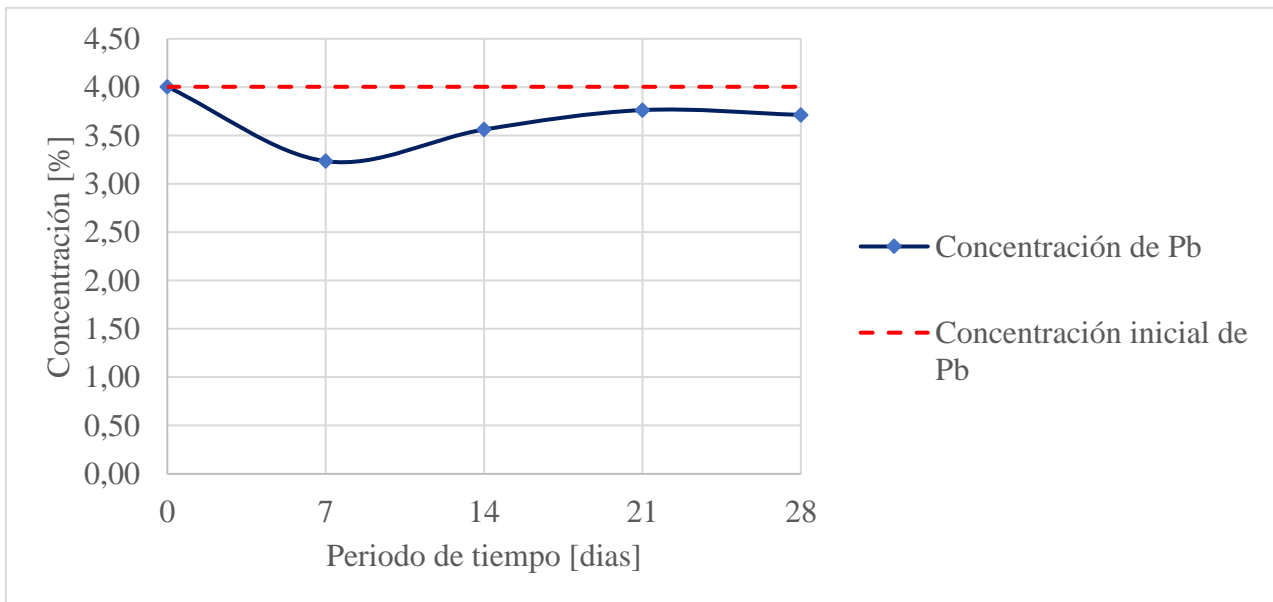
Muestra	Concentración de Zn [%]	Concentración de Pb [%]	Concentración de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Concentración de Cu [ppm]
<b>CHSQ-3 + 10% BIO (1)</b>	1,03	3,73	10,31	924,4
<b>CHSQ-3 + 10% BIO (2)</b>	1,00	3,70	10,36	894,5
<b>CHSQ-3 + 30% BIO (1)</b>	1,09	4,30	12,90	1.070
<b>CHSQ-3 + 30% BIO (2)</b>	1,04	4,04	12,46	1.040
<b>CHSQ-4 + 10% BIO (1)</b>	0,55	2,12	7,33	447,1
<b>CHSQ-4 + 10% BIO (2)</b>	0,55	2,31	7,60	467,6
<b>CHSQ-4 + 30% BIO (1)</b>	0,68	2,99	8,72	567,9
<b>CHSQ-4 + 30% BIO (2)</b>	0,68	3,00	8,85	567,4

Tabla 31. Resumen de los datos obtenidos para el día 28 del experimento.

Muestra	Concentración de Zn [%]	Concentración de Pb [%]	Concentración de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Concentración de Cu [ppm]
<b>CHSQ-3 + 10% BIO</b>	1,02	3,71	10,33	909,5
<b>CHSQ-3 + 30% BIO</b>	1,07	4,17	12,68	1.055
<b>CHSQ-4 + 10% BIO</b>	0,55	2,22	7,46	457,4
<b>CHSQ-4 + 30% BIO</b>	0,68	3,00	8,78	567,7

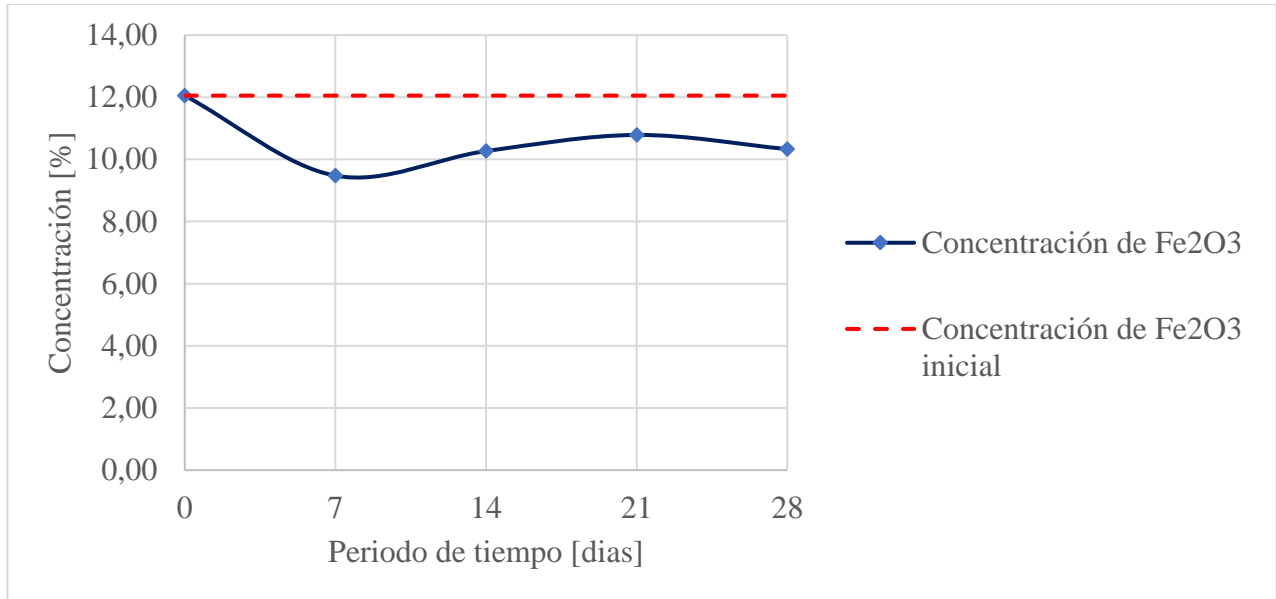


**Gráfico 24. Comportamiento de Zn en CHSQ-3 + 10% de BIO.**

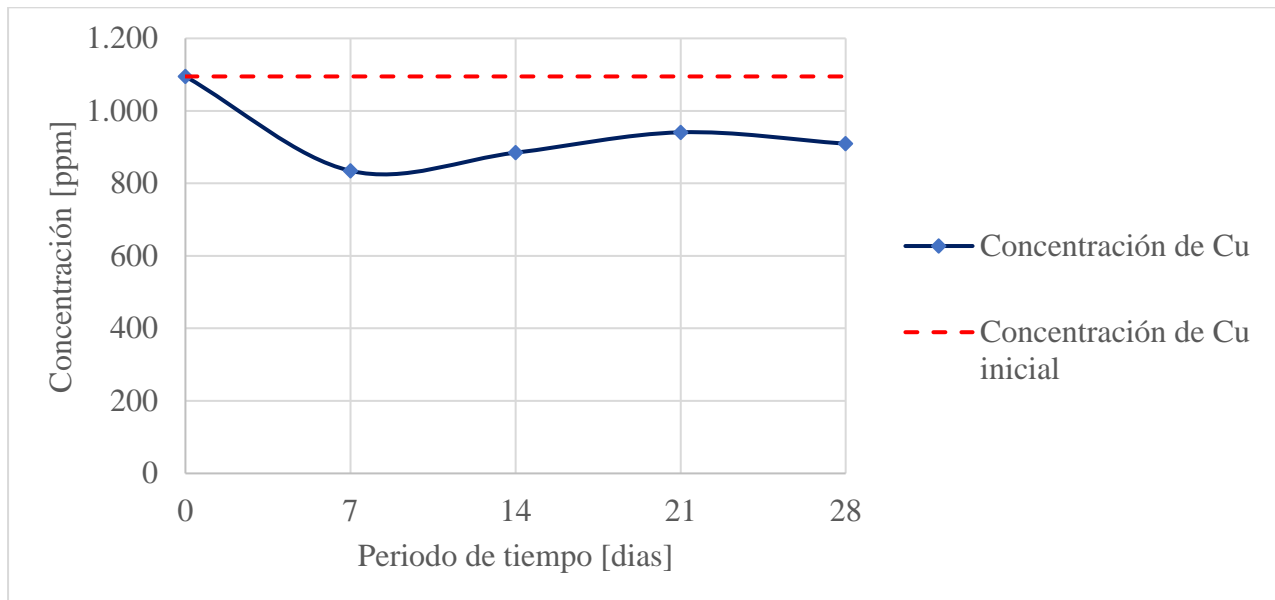


**Gráfico 25. Comportamiento de Pb en CHSQ-3 + 10% de BIO.**

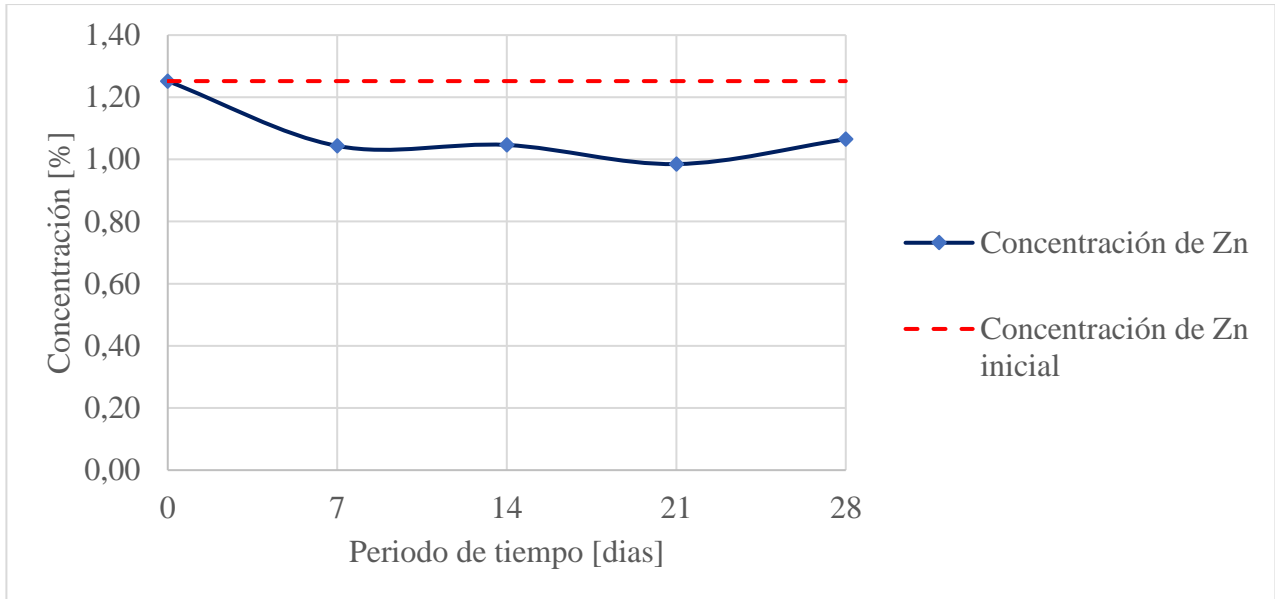




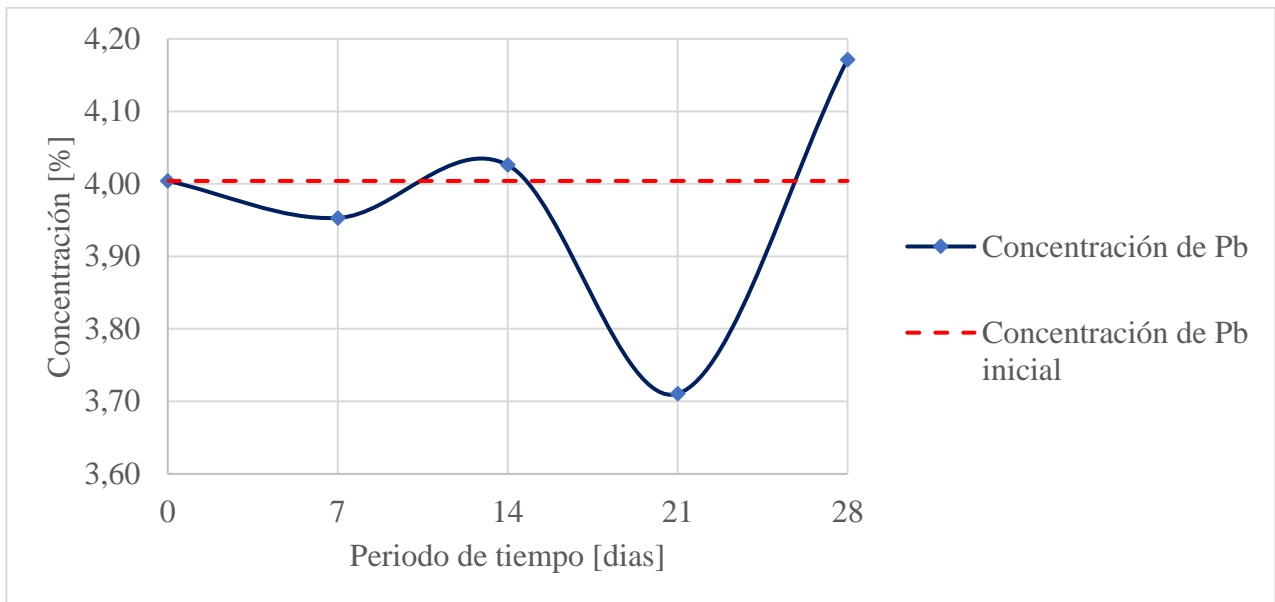
**Gráfico 26. Comportamiento de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en CHSQ-3 + 10% de BIO.**



**Gráfico 27. Comportamiento de Cu en CHSQ-3 + 10% de BIO.**



**Gráfico 28. Comportamiento de Zn en CHSQ-3 + 30% de BIO.**



**Gráfico 29. Comportamiento de Pb en CHSQ-3 + 30% de BIO.**

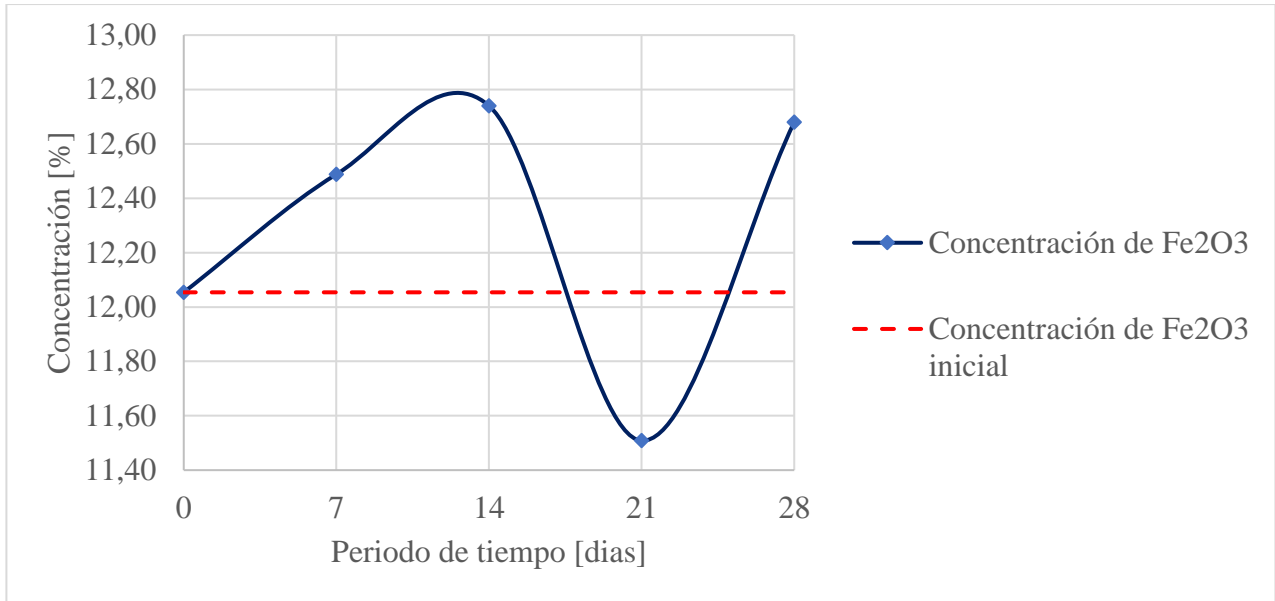


Gráfico 30. Comportamiento de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en CHSQ-3 + 30% de BIO.

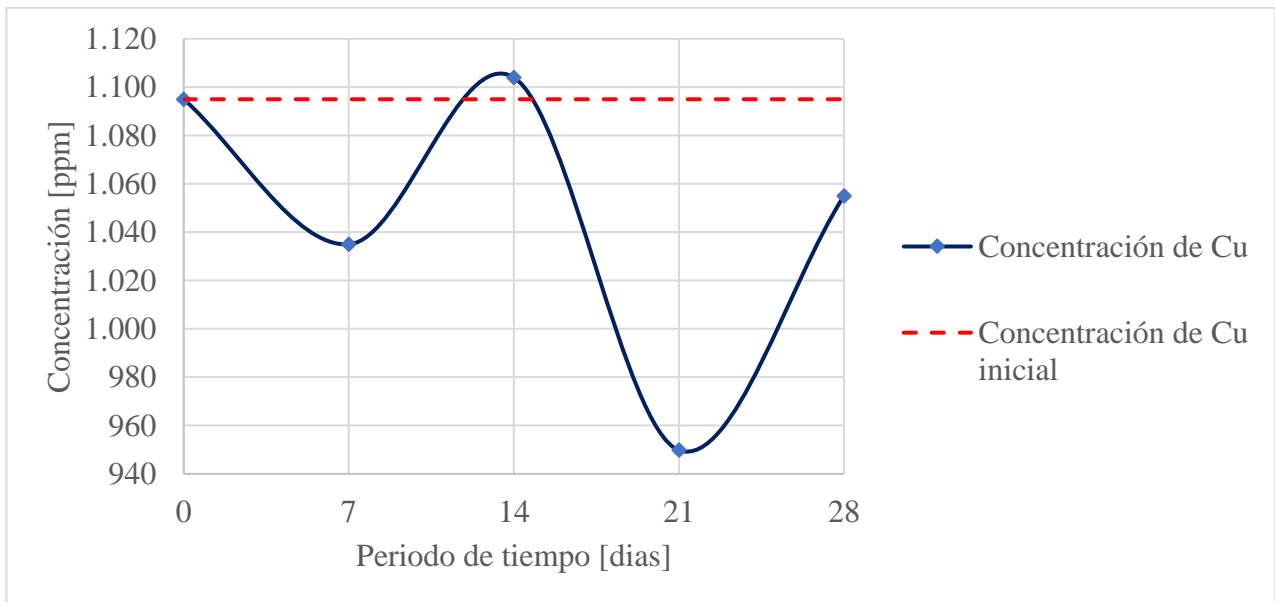


Gráfico 31. Comportamiento de Cu en CHSQ-3 + 30% de BIO.

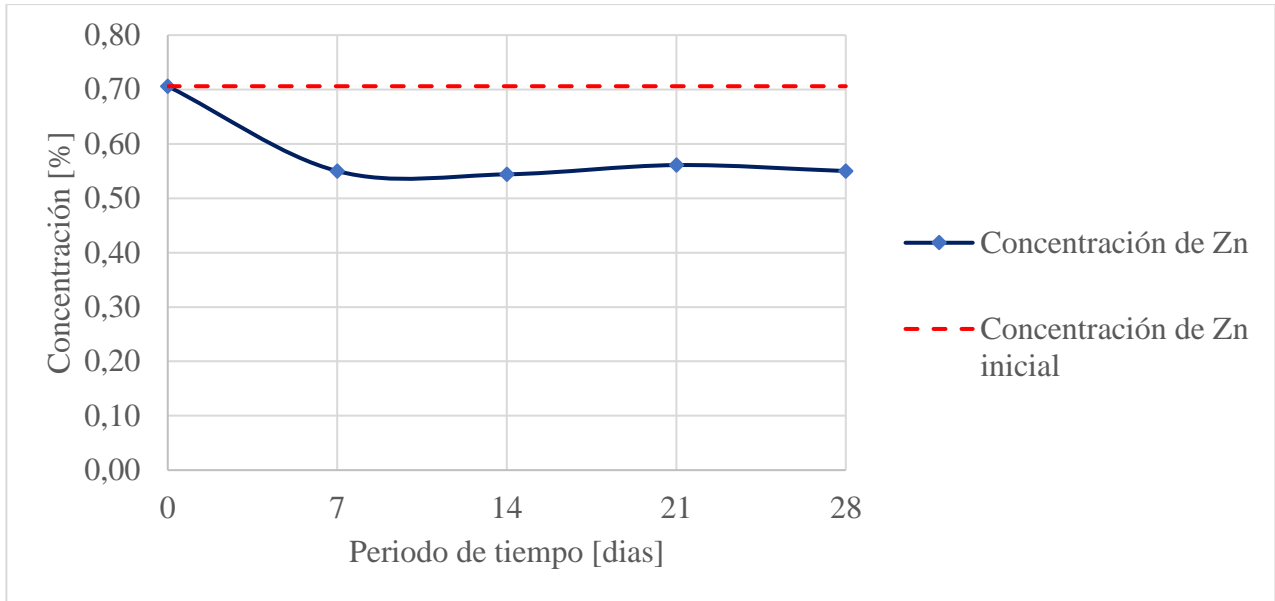


Gráfico 32. Comportamiento de Zn en CHSQ-4 + 10% de BIO.

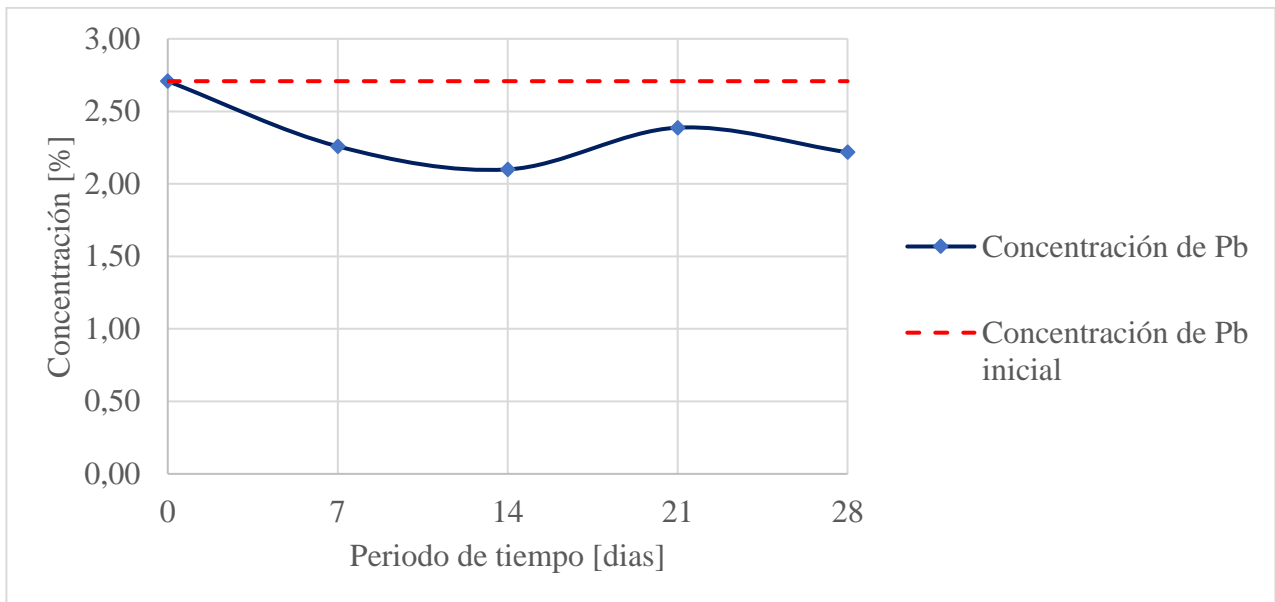
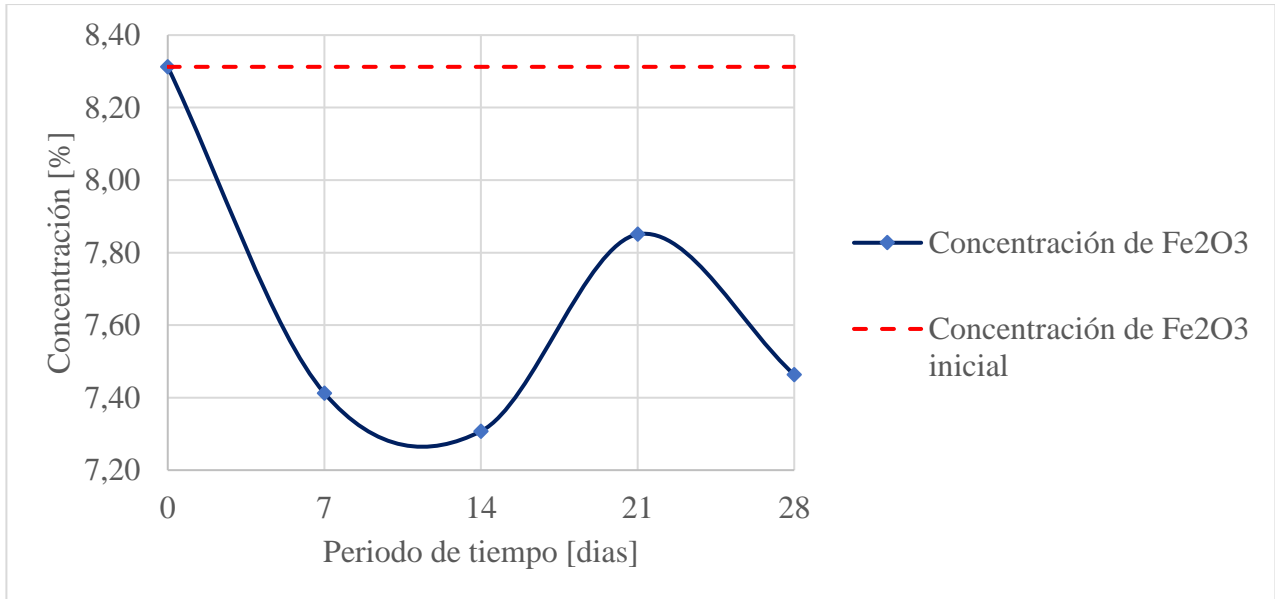
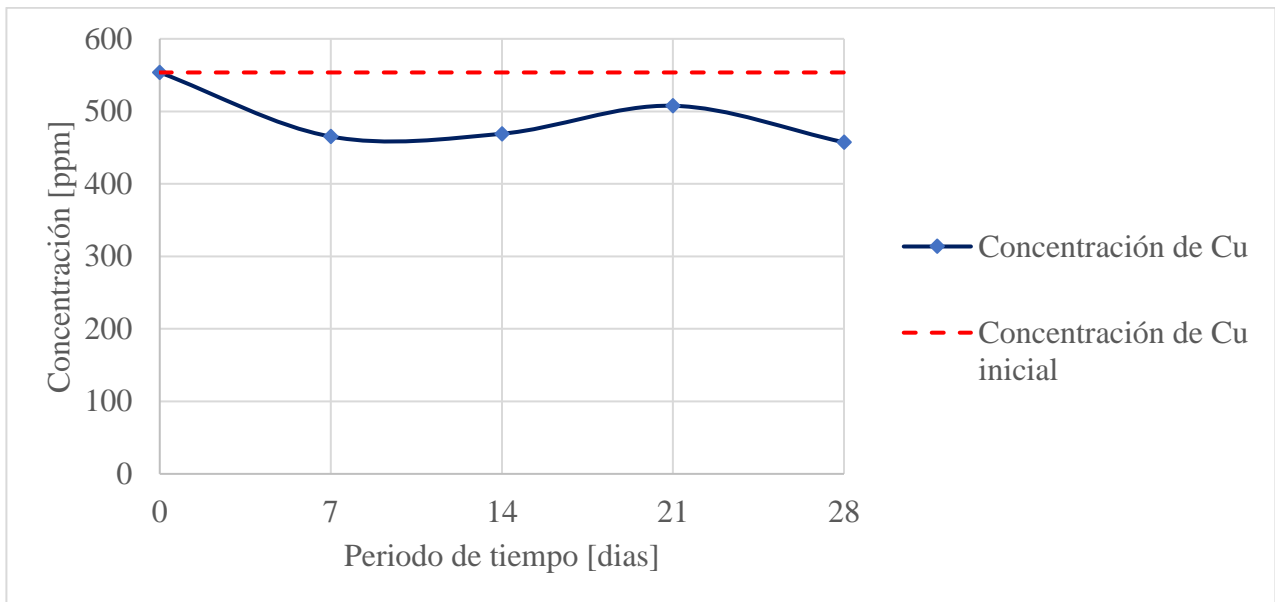


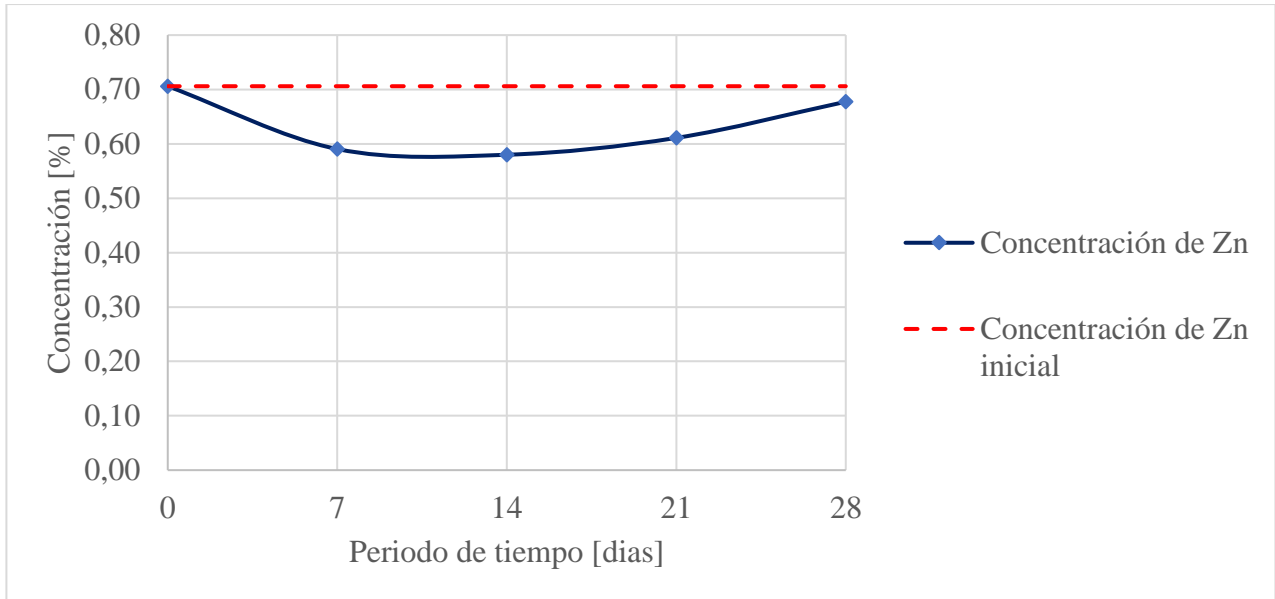
Gráfico 33. Comportamiento de Pb en CHSQ-4 + 10% de BIO.



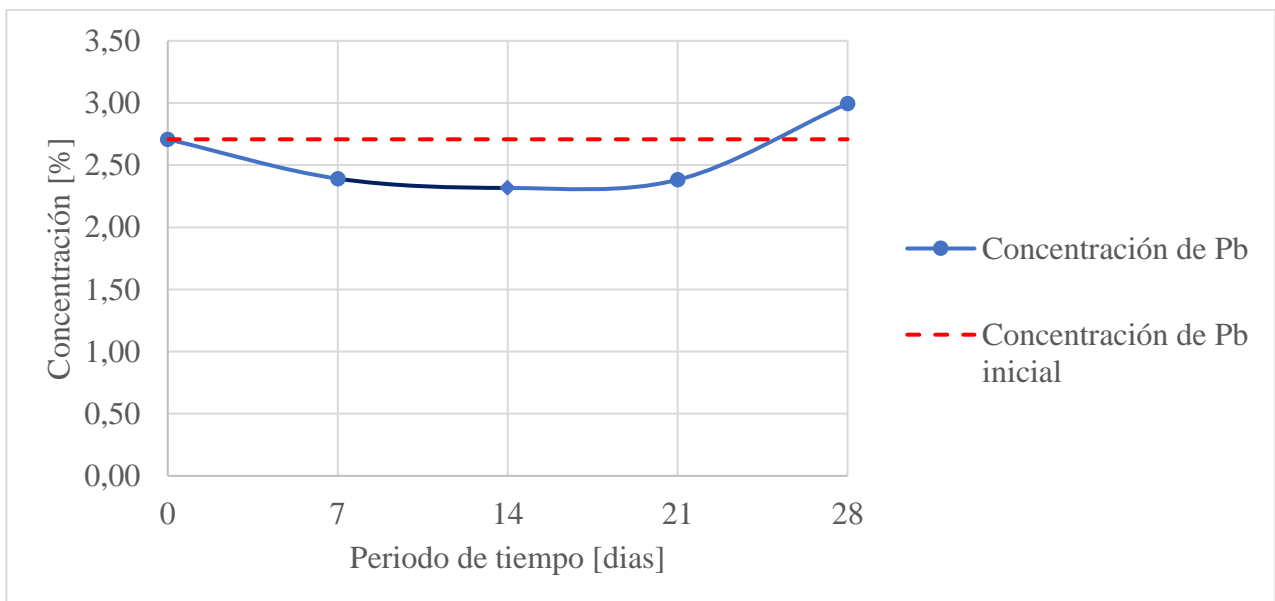
**Gráfico 34. Comportamiento de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en CHSQ-4 + 10% de BIO.**



**Gráfico 35. Comportamiento de Cu en CHSQ-4 + 10% de BIO.**



**Gráfico 36. Comportamiento de Zn en CHSQ-4 + 30% de BIO.**



**Gráfico 37. Comportamiento de Pb en CHSQ-4 + 30% de BIO.**

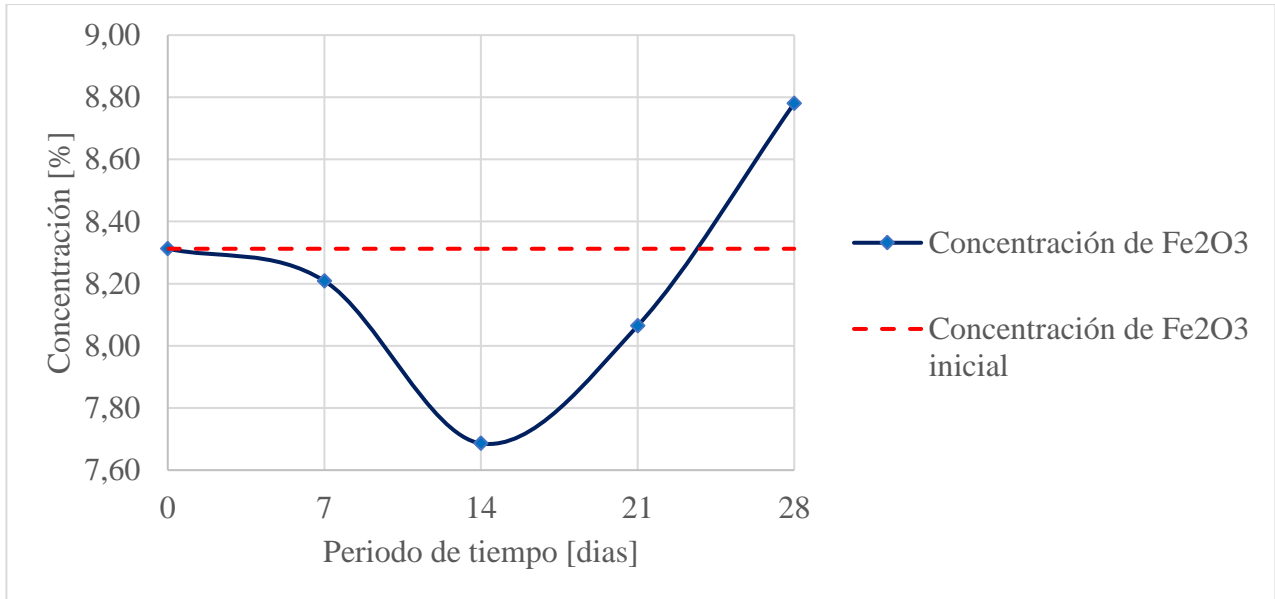


Gráfico 38. Comportamiento de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en CHSQ-4 + 30% de BIO.

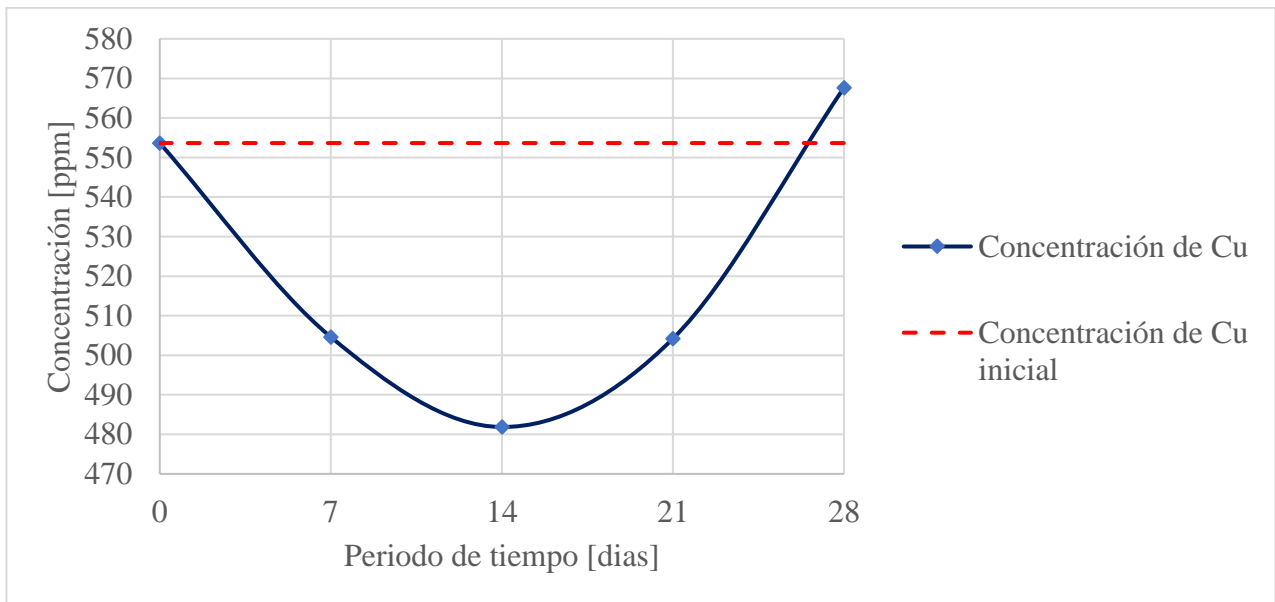


Gráfico 39. Comportamiento de Cu en CHSQ-4 + 30% de BIO.

### F. Experimento 3

Tabla 32. Concentraciones de los metales de interés para el día 7 del experimento.

Muestra	Concentración de Zn [%]	Concentración de Pb [%]	Concentración de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Concentración de Cu [ppm]
<b>CHSQ3 + 10% BIO (1)</b>	0,24	2,15	8,00	549,0
<b>CHSQ3 + 10% BIO (2)</b>	0,26	2,52	8,80	642,4
<b>CHSQ3 + 30% BIO (1)</b>	0,22	2,25	7,90	530,1
<b>CHSQ3 + 30% BIO (2)</b>	0,23	2,21	7,61	520,0
<b>CHSQ4 + 10% BIO (1)</b>	0,16	2,51	7,11	426,8
<b>CHSQ4 + 10% BIO (2)</b>	0,14	2,90	6,69	348,6
<b>CHSQ4 + 30% BIO (1)</b>	0,15	2,17	6,59	358,9
<b>CHSQ4 + 30% BIO (2)</b>	0,15	2,50	6,54	343,9

Tabla 33. Resumen de los datos obtenidos para el día 7 del experimento.

Muestra	Concentración de Zn [%]	Concentración de Pb [%]	Concentración de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Concentración de Cu [ppm]
<b>CHSQ3 + 10% BIO</b>	0,25	2,33	8,40	595,7
<b>CHSQ3 + 30% BIO</b>	0,23	2,23	7,76	525,1
<b>CHSQ4 + 10% BIO</b>	0,15	2,71	6,90	387,7
<b>CHSQ4 + 30% BIO</b>	0,15	2,34	6,57	351,4

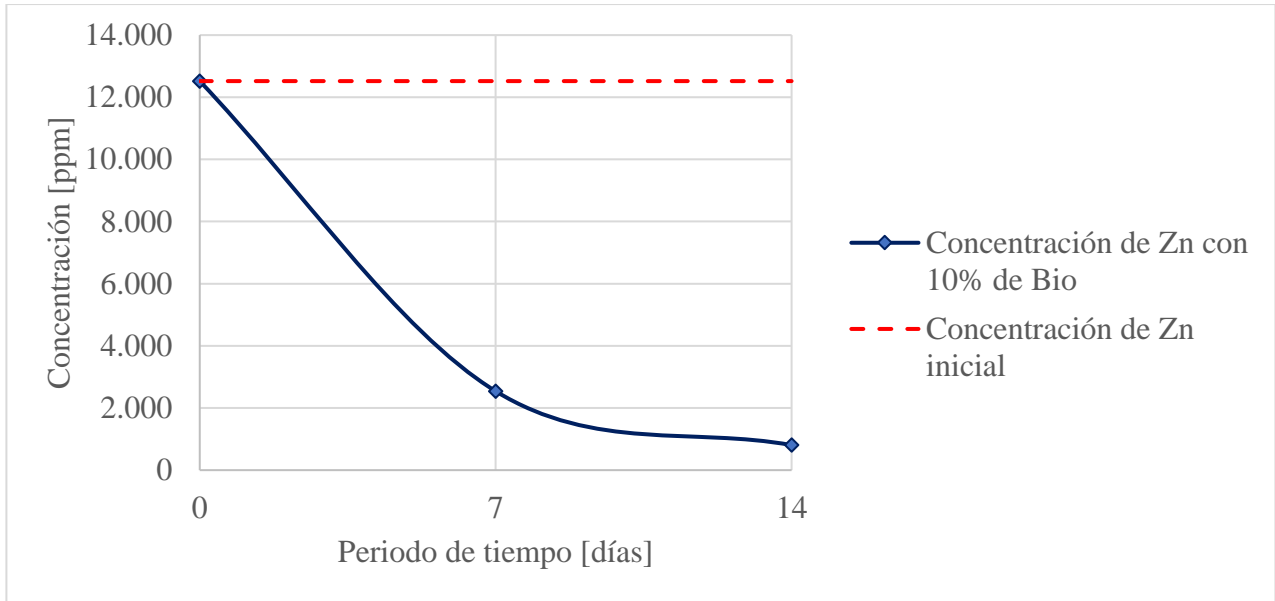


Tabla 34. Concentraciones de los metales de interés para el día 14 del experimento.

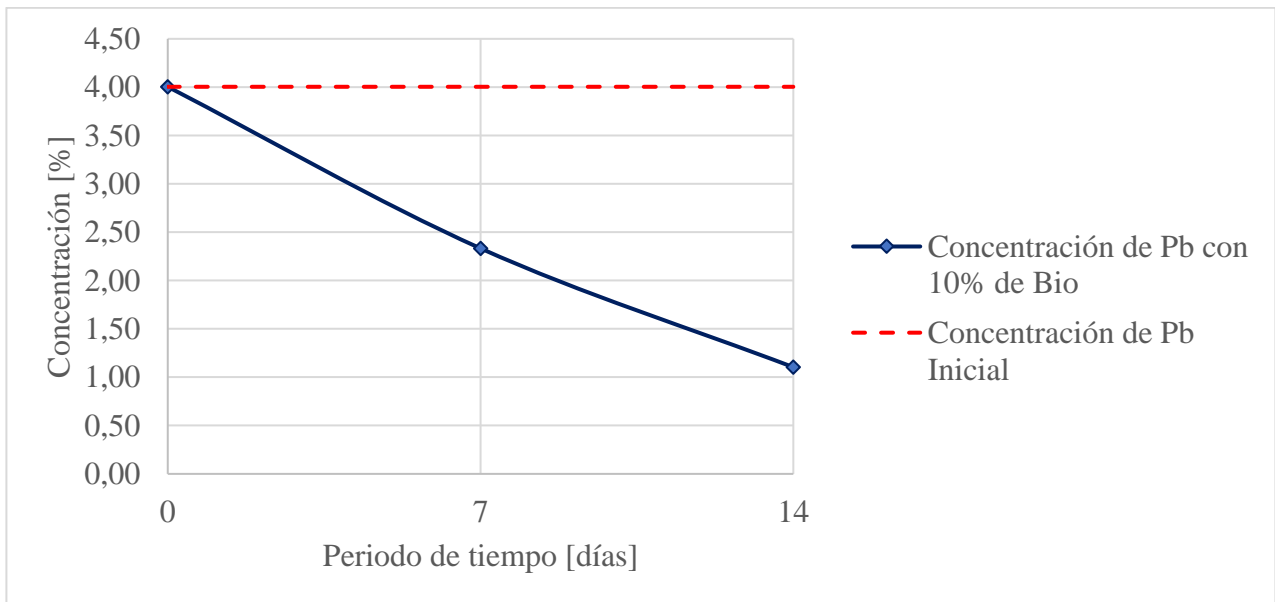
Muestra	Concentración de Zn [ppm]	Concentración de Pb [%]	Concentración de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Concentración de Cu [ppm]
<b>CHSQ3 + 10% BIO (1)</b>	827,4	1,06	4,40	403,4
<b>CHSQ3 + 10% BIO (2)</b>	782,4	1,15	4,15	420,4
<b>CHSQ3 + 30% BIO (1)</b>	668,8	0,70	3,47	246,1
<b>CHSQ3 + 30% BIO (2)</b>	684,5	0,66	3,49	248,7
<b>CHSQ4 + 10% BIO (1)</b>	1.180	3,23	6,39	343,7
<b>CHSQ4 + 10% BIO (2)</b>	1.130	3,14	6,16	316,9
<b>CHSQ4 + 30% BIO (1)</b>	857,0	0,97	5,25	297,6
<b>CHSQ4 + 30% BIO (2)</b>	818,5	0,83	5,13	248,7

Tabla 35. Resumen de los datos obtenidos para el día 14 del experimento.

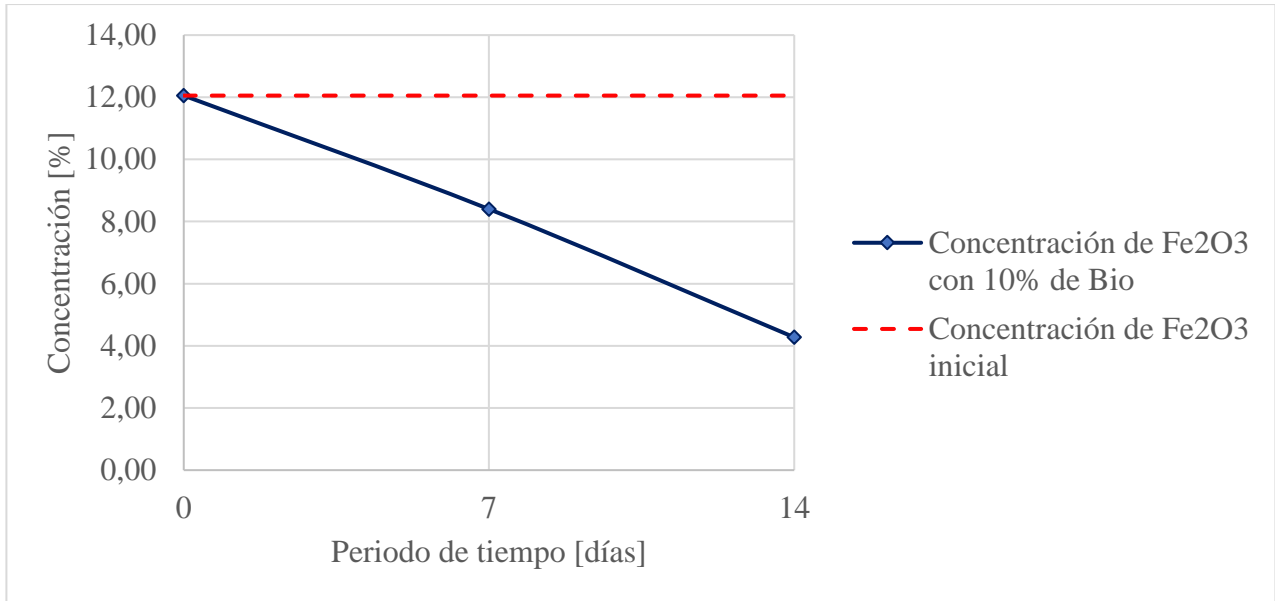
Muestra	Concentración de Zn [ppm]	Concentración de Pb [%]	Concentración de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Concentración de Cu [ppm]
<b>CHSQ-3 + 10% BIO</b>	804 ,9	1,10	4,28	411,9
<b>CHSQ-3 + 30% BIO</b>	676,7	0,68	3,48	247,4
<b>CHSQ-4 + 10% BIO</b>	1.155	3,18	6,27	330,3
<b>CHSQ-4 + 30% BIO</b>	837,8	0,90	5,19	273,2



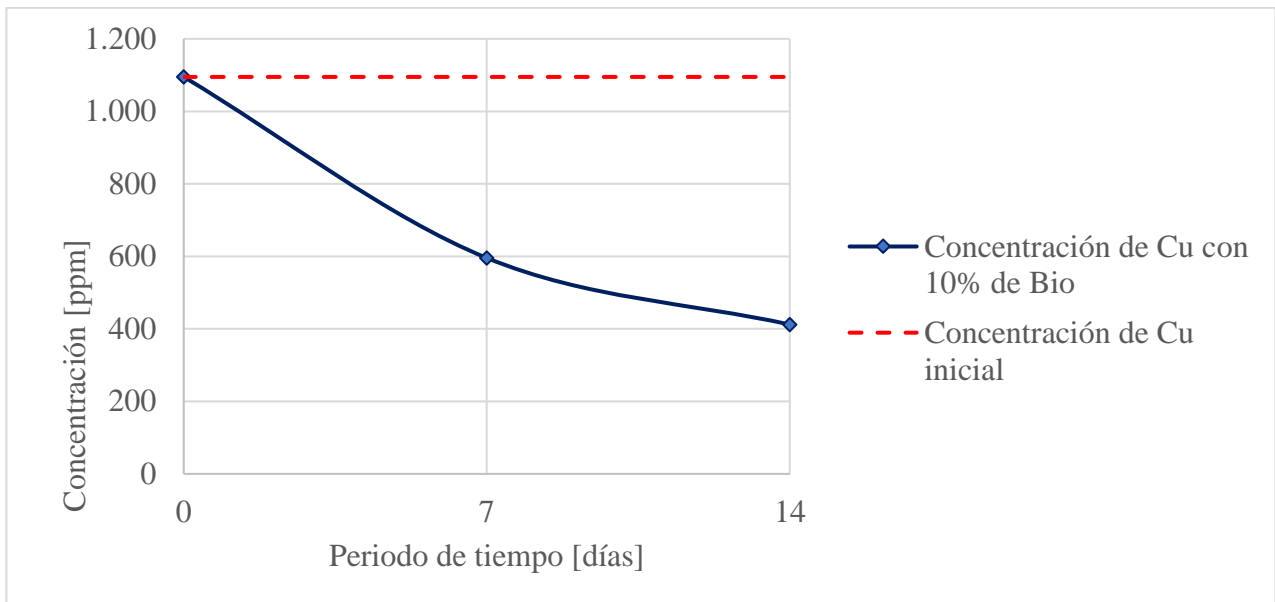
**Gráfico 40. Comportamiento de Zn en CHSQ-3 + 10% de BIO.**



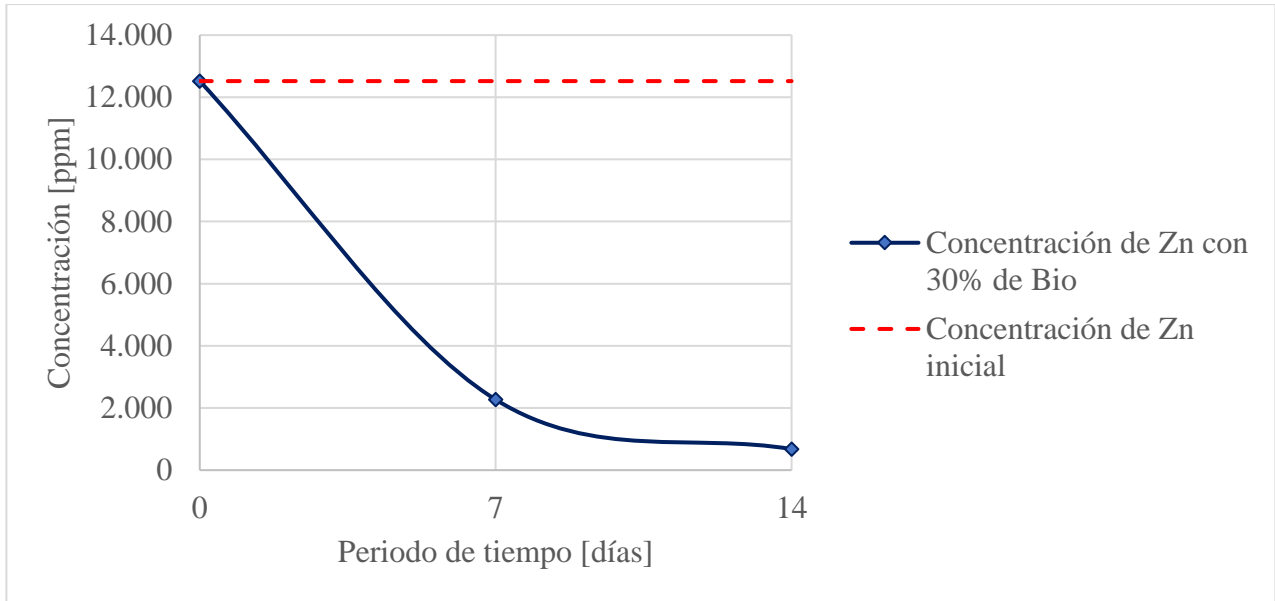
**Gráfico 41. Comportamiento de Pb en CHSQ-3 + 10% de BIO.**



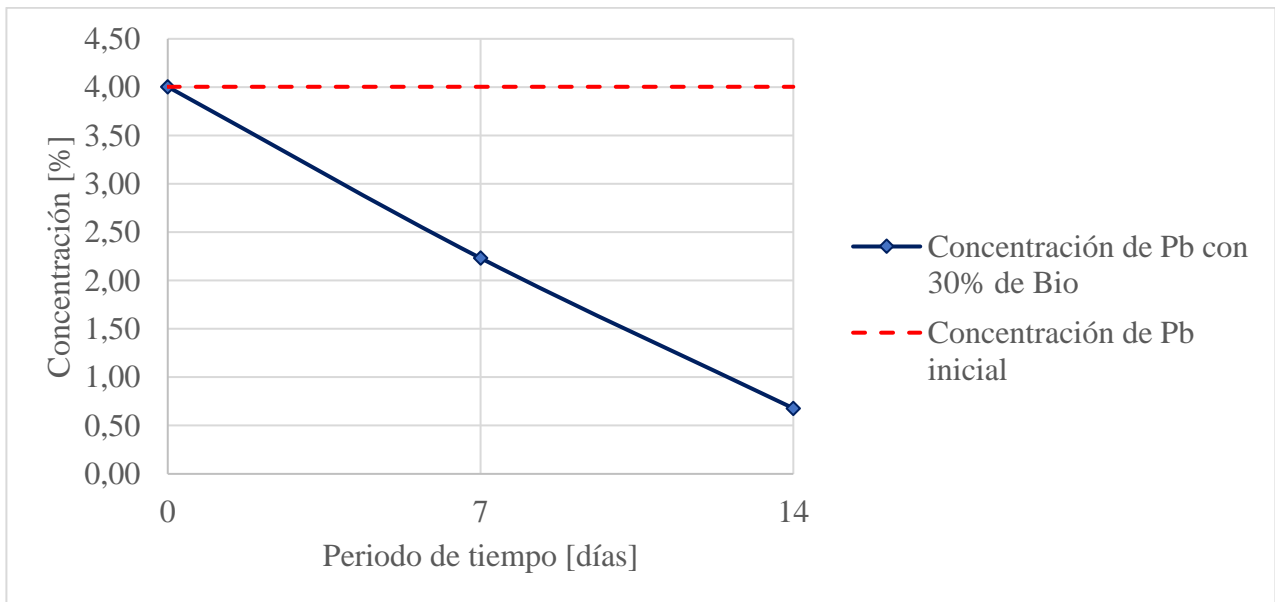
**Gráfico 42. Comportamiento de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en CHSQ-3 + 10% de BIO.**



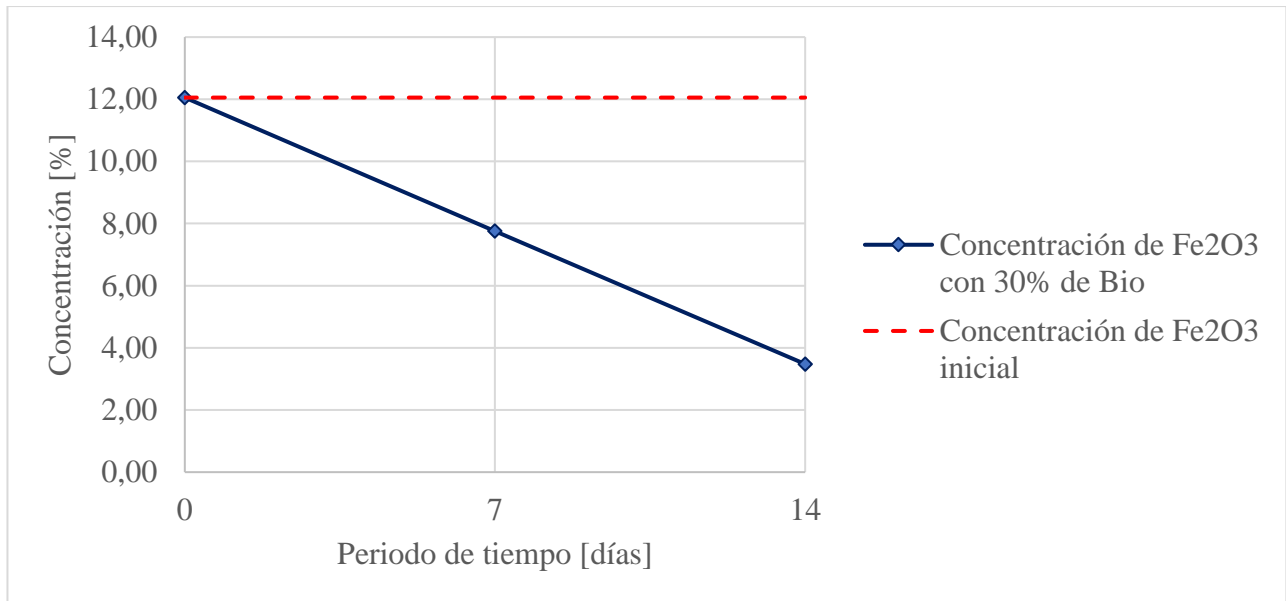
**Gráfico 43. Comportamiento de  $\text{Cu}$  en CHSQ-3 + 10% de BIO.**



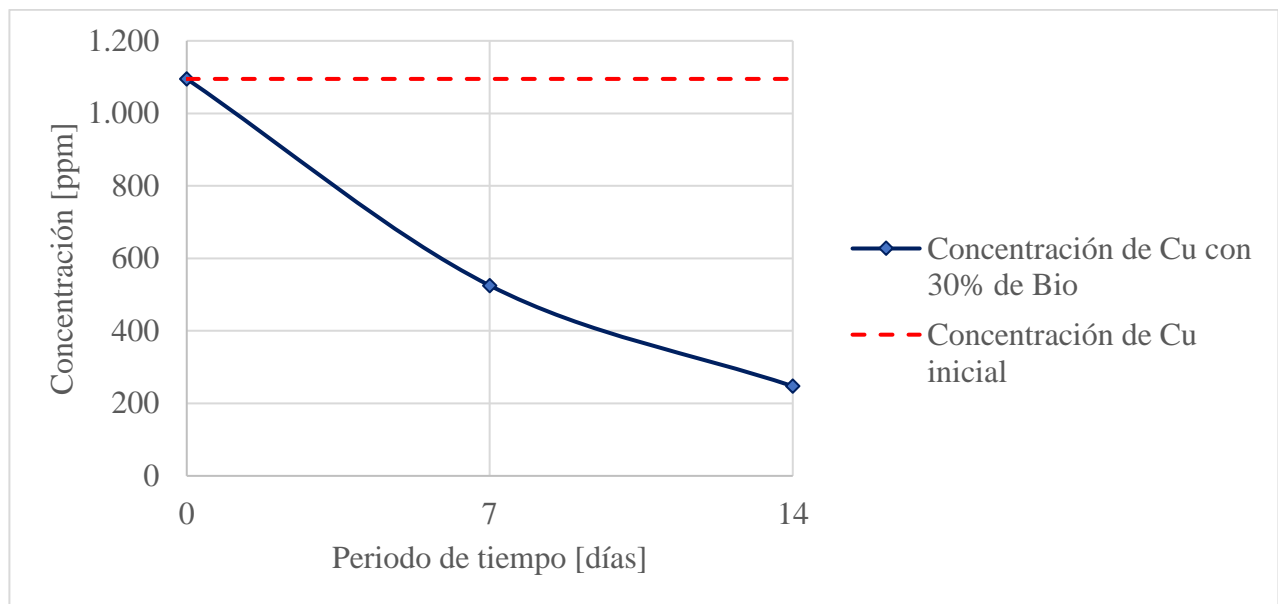
**Gráfico 44. Comportamiento de Zn en CHSQ-3 + 30% de BIO.**



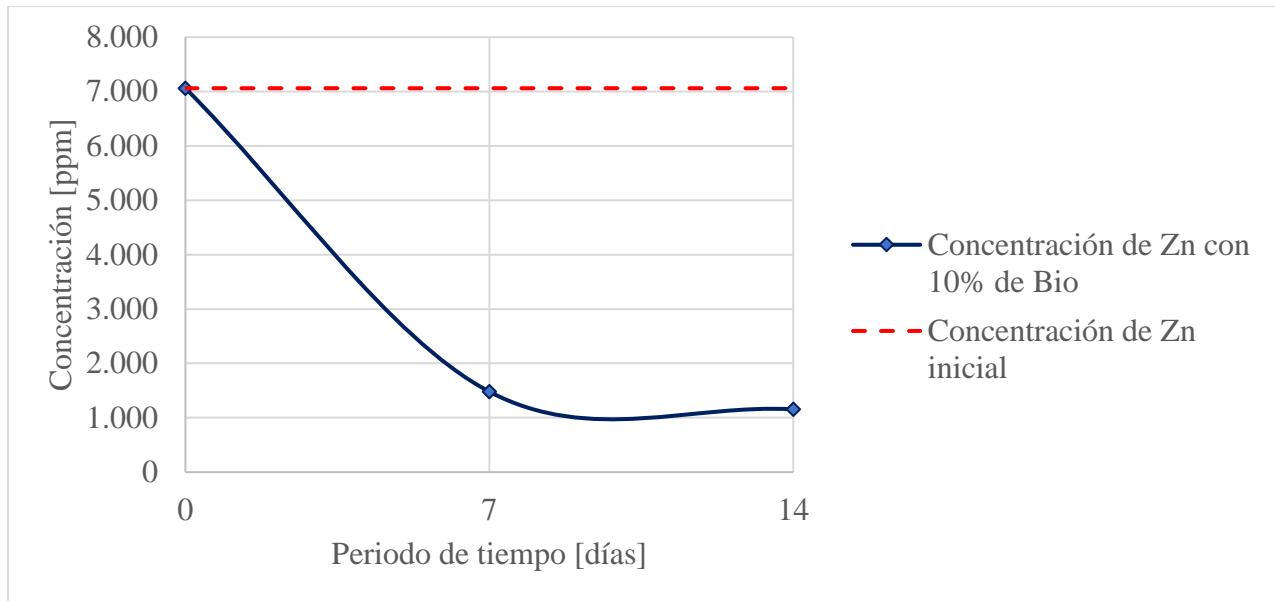
**Gráfico 45. Comportamiento de Pb en CHSQ-3 + 30% de BIO.**



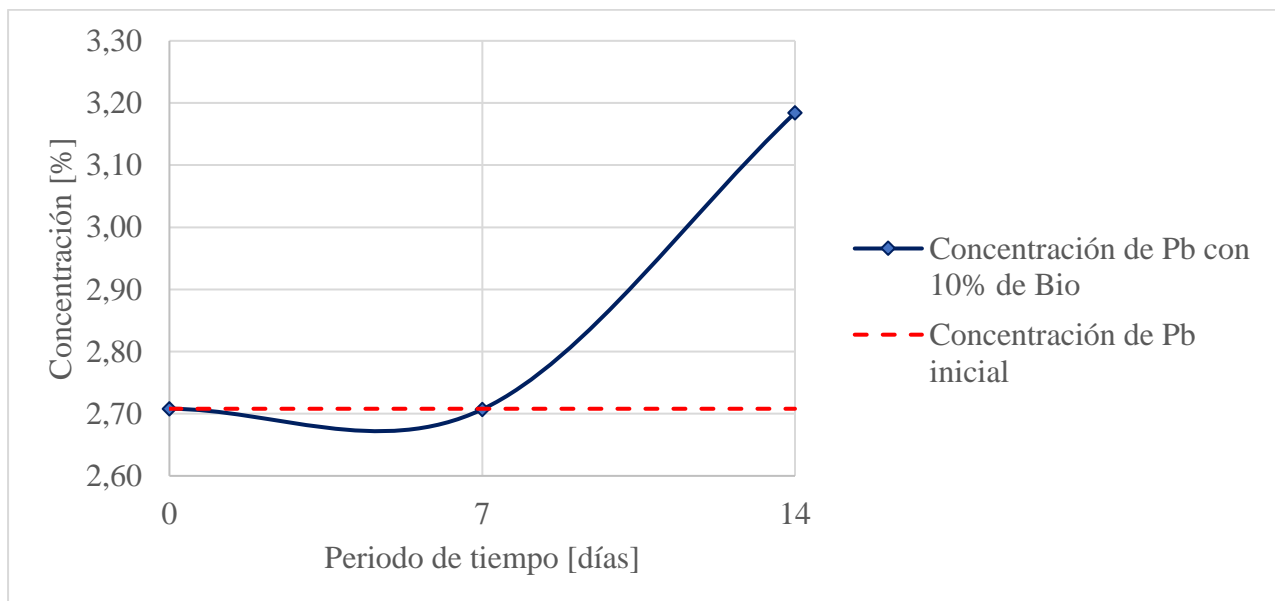
**Gráfico 46. Comportamiento de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en CHSQ-3 + 30% de BIO.**



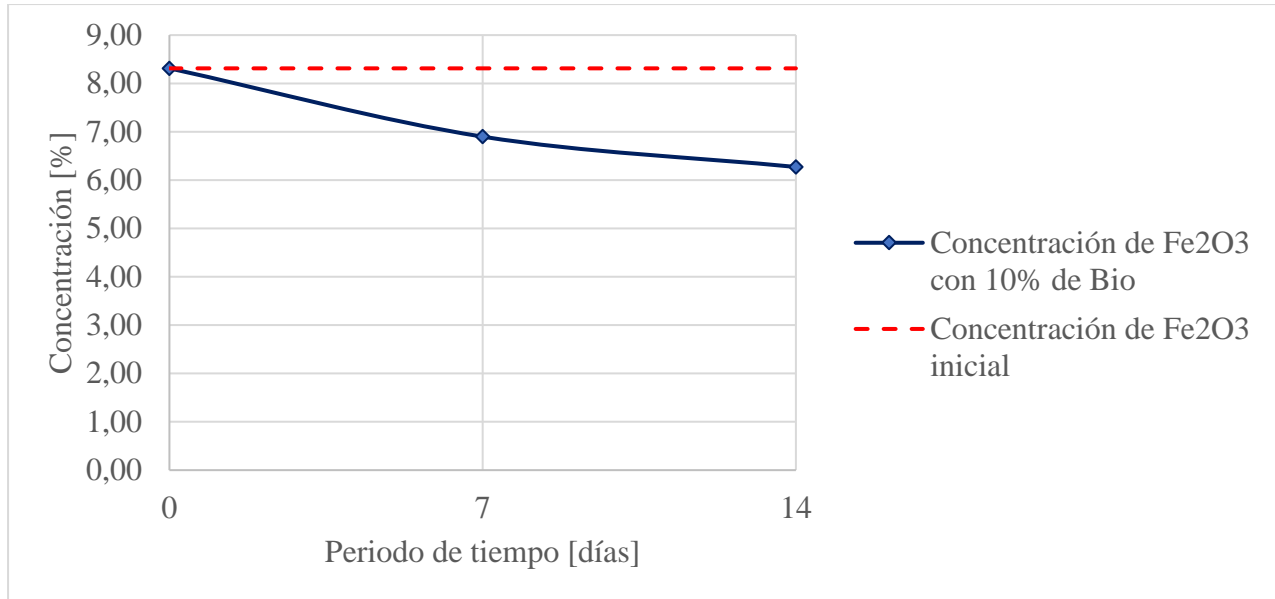
**Gráfico 47. Comportamiento de  $\text{Cu}$  en CHSQ-3 + 30% de BIO.**



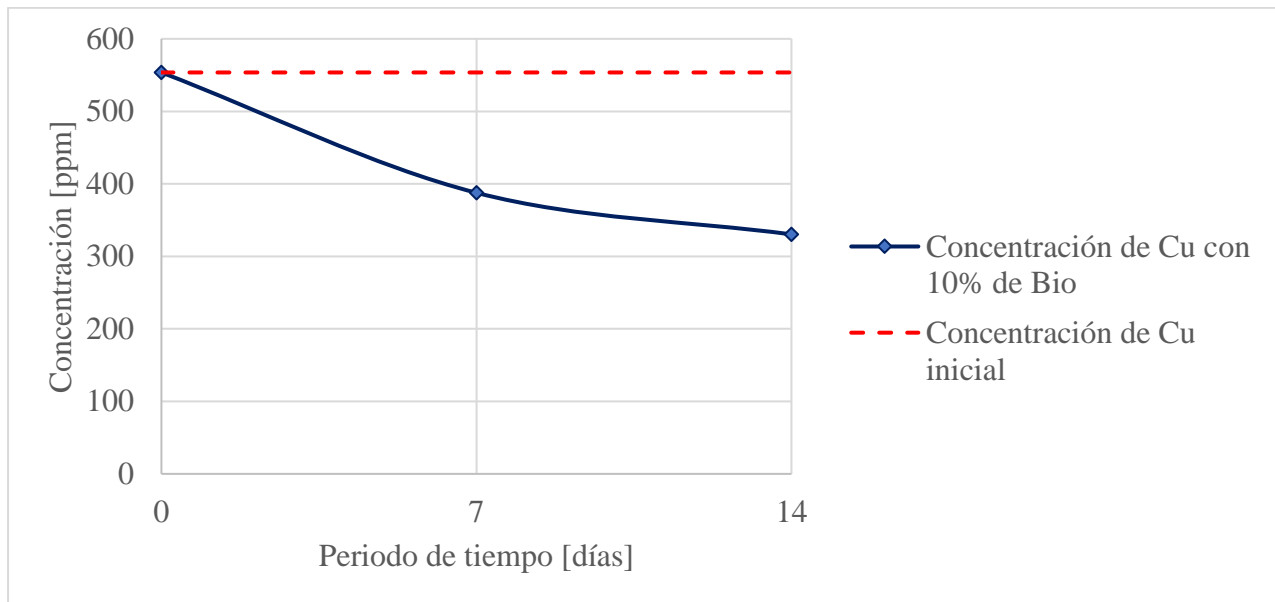
**Gráfico 48. Comportamiento de Zn en CHSQ-4 + 10% de BIO.**



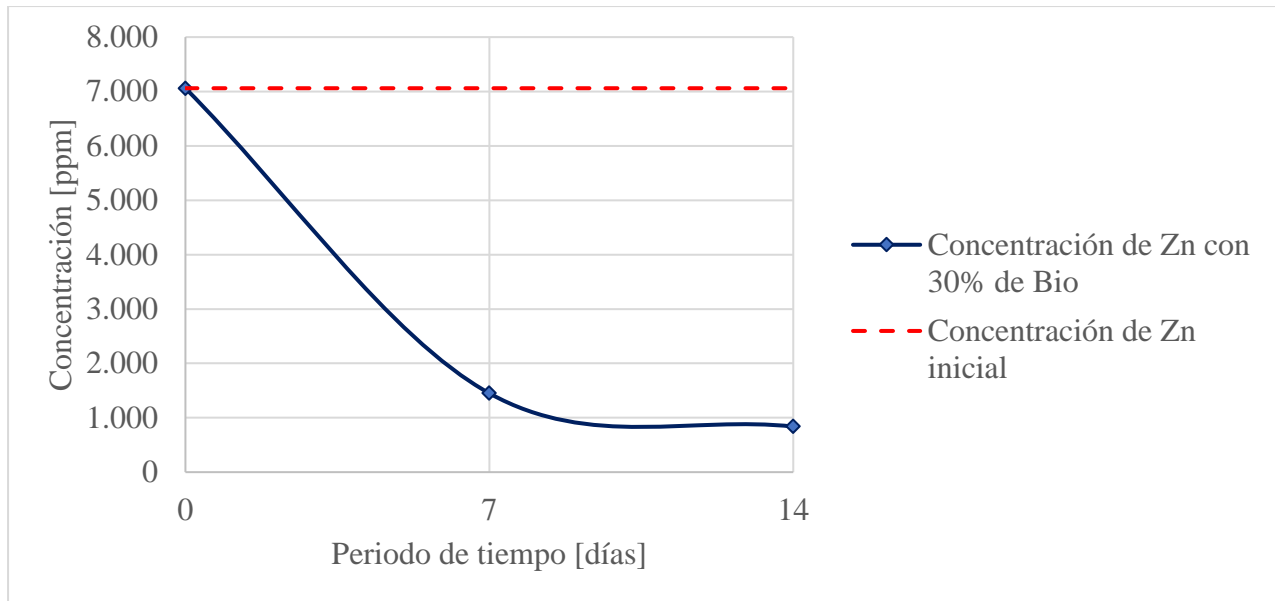
**Gráfico 49. Comportamiento de Pb en CHSQ-4 + 10% de BIO.**



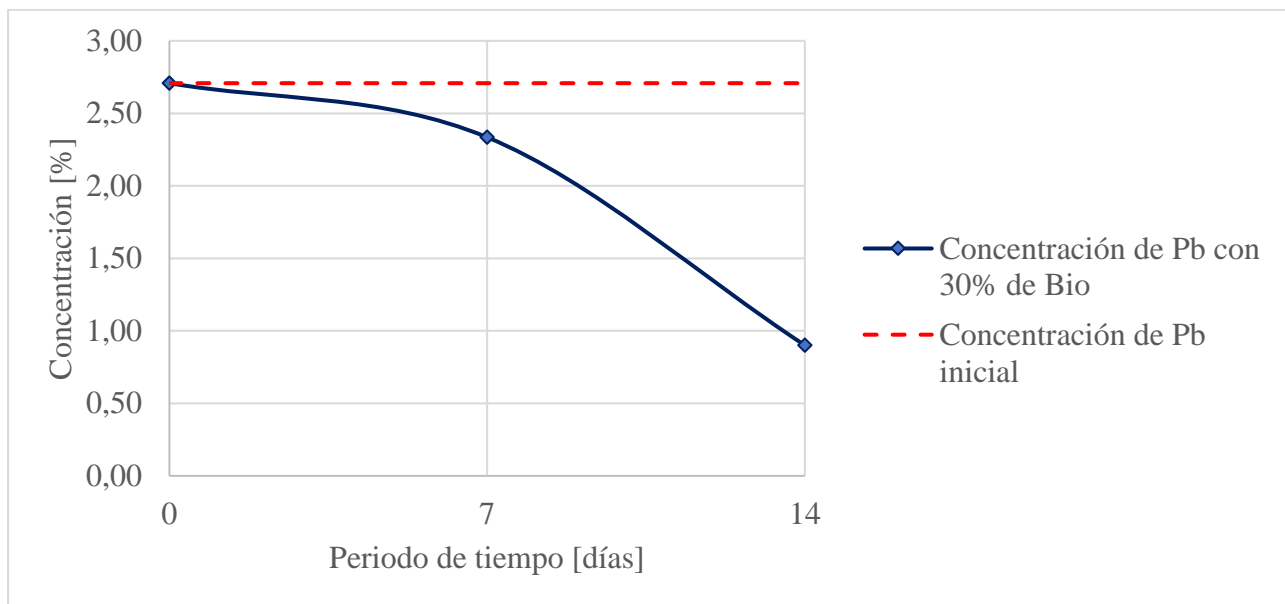
**Gráfico 50. Comportamiento de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en CHSQ-4 + 10% de BIO.**



**Gráfico 51. Comportamiento de Cu en CHSQ-4 + 10% de BIO.**

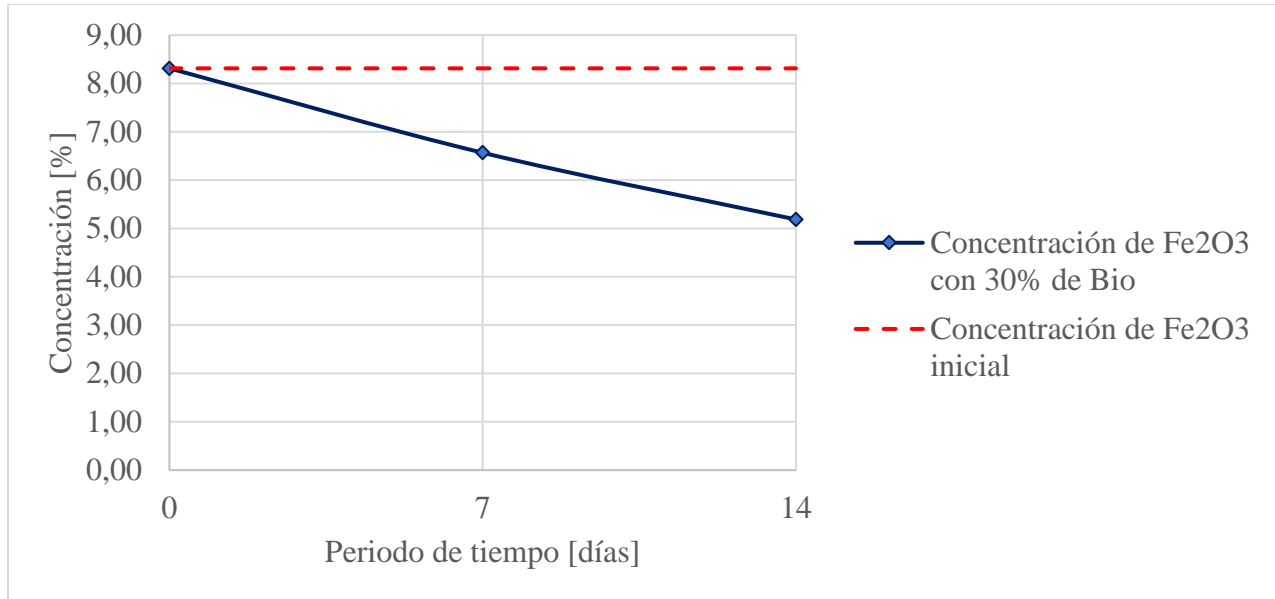


**Gráfico 52. Comportamiento de Zn en CHSQ-4 + 30% de BIO.**

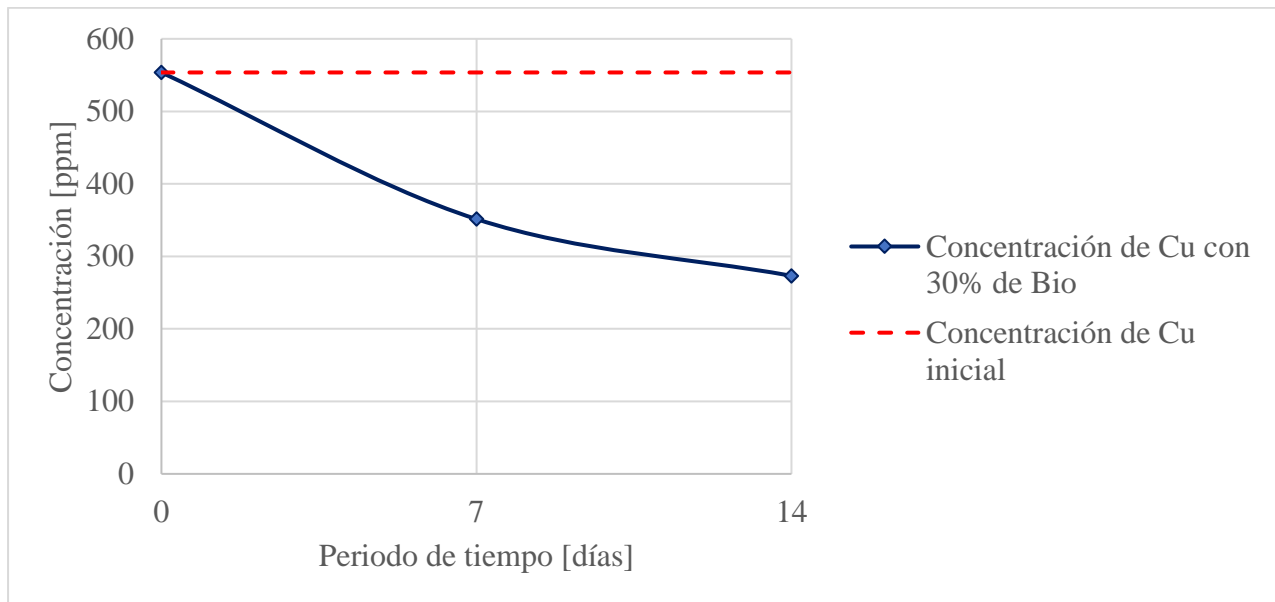


**Gráfico 53. Comportamiento de Pb en CHSQ-4 + 30% de BIO.**





**Gráfico 54. Comportamiento de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en CHSQ-4 + 30% de BIO.**



**Gráfico 55. Comportamiento de  $\text{Cu}$  en CHSQ-4 + 30% de BIO.**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**Departamento de Ingeniería Metalúrgica**  
 Hoja Resumen Memoria de Título

<b>Título:</b> Aplicación de Biosurfactante natural enzimático "PETRA-ZYME" para la inmovilización de metales pesados potencialmente tóxicos presentes en los suelos		
<b>Nombre Memorista:</b> Alex Christian Riveros Peña		
<b>Modalidad</b>	<b>Investigación</b>	<b>Profesor (es) Patrocinante (s)</b>
<b>Concepto</b>	EXCELENTE	 <b>Prof. Roberto Gómez E.</b>
<b>Calificación</b>	7.0	
<b>Fecha</b>	18/03/2024	
 <b>Prof. René Gómez P.</b>		
		<b>Ingeniero Supervisor:</b>
		<b>Institución:</b>
<b>Comisión (Nombre y Firma)</b>		
<b>Prof. Pablo Higuera Higuera</b>		 <b>Prof. Ramón Díaz N.</b>
<b>Resumen</b>		
<p>Este estudio, se enfoca en la utilización de una enmienda natural llamada "Petra-Zyme", la cual será aplicada a distintos suelos mineros, que poseen un alto contenido de metales pesados en zonas localizadas en la comunidad autónoma de Castilla - La Mancha, España.</p> <p>Se realizaron tres estudios los cuales consisten en analizar la efectividad de la enmienda utilizada en distintas muestras de suelo y evaluar que sucede con los distintos metales pesados de interés.</p> <p>Para el primer experimento se utilizan dos muestras de suelos contaminados por mercurio, asimismo, para los dos experimentos restantes se utilizaron muestras de suelos contaminados por Pb/Zn y metales relacionados pertenecientes a una antigua mina abandonada llamada San Quintín, también, es importante mencionar que, el primer y segundo estudio tendrán una duración de 28 días y el tercer estudio solo se extenderá por 14 días.</p> <p>Luego de obtener los resultados de los diferentes estudios realizados, se cuantificó una disminución en la concentración de los metales en la mayoría de los casos, sin embargo, existen ciertos casos donde los resultados obtenidos no son los esperados, es por este motivo, que se recomienda continuar con distintos estudios, variando la duración, las proporciones o los metales de interés.</p>		