

SOLIDIFICACIÓN DE RELAVES DE UNA EMPRESA MINERA 2016, UTILIZANDO CEMENTO PORTLAND, PARA LA FABRICACIÓN DE JARDINES EN MINIATURA

Priscila Estefania Guañuna Díaz

Director del proyecto

M.Sc. Katty Coral

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y AMBIENTALES

RESUMEN

En los últimos años se ha desarrollado la industria minera a nivel mundial, actividad que genera (relaves mineros) una gran cantidad de residuos tóxicos y peligrosos, los cuales no son sometidos a un adecuado tratamiento para su disposición final causando un mayor impacto en el ambiente como en la salud humana. A partir de este planteamiento, se ve necesaria la implementación de una tecnología eficiente para una adecuada disposición final de relaves mineros mediante el proceso de solidificación con Cemento Portland Puzolánico para la fabricación de jardines inertizados, los cuales contarán con algunas propiedades como: mínima generación de lixiviados, no poseer reactividad química, mínima permeabilidad, elevada resistencia, entre otros. El presente proyecto pretende proporcionar una opción eficiente para un adecuado manejo de relaves mineros mediante el uso de aglomerante, agregado fino, residuo sólido, agua y aditivo, con el objetivo de obtener muestras inertizadas con mínima concentración de metales pesados y útiles para su aprovechamiento. La metodología aplicada fue la descrita en la tesis del Ing. Oviedo Esteban; se tomaron muestras representativas mediante muestreo sistemático, de esta manera se realizó seis ensayos de acuerdo a la composición de cada muestra basada en una misma dosificación; los cuales además dieron paso a análisis fisicoquímicos para evaluar la capacidad contaminante y determinar el nivel de inertización.

En base a los resultados obtenidos tanto de procedimientos experimentales como de laboratorio, se pudo determinar como una opción válida y eficiente el proceso de solidificación con Cemento Portland Puzolánico para relaves mineros, como tratamiento que reduce su capacidad de lixiviarse y los encapsula en una matriz concreta de la cual no pueden salir.

Palabras clave: *Disposición de residuos peligrosos, Estabilización, Residuos de la minería, Reuso de residuos sólidos, Tratamiento Fisicoquímico.*

ABSTRACT

In the past years, the mining industry has developed all over the world, generating (mining waste) a large amount of toxic and dangerous waste, which are not subjected to the proper treatment before their disposal and therefore causing a great impact and damage to the environment as well as to people's health. From this point of view, the need is observed to come up with an efficient technology for the proper disposal of the mining waste, solidifying it by using pozzolanic Portland cement and using it for building inert gardens. These will have qualities such as minimum leachate production, no chemical reactivity, minimum permeability, high level of endurance, among others. This project hopes to provide an efficient option for an appropriate handling of tailings miners by the use of binders, fine aggregate, solid residue, water and additive in order to come up with inert samples this a minimum concentration of heavy metals, that can be useful.

Based on the results from both, experimental and laboratory procedures, it was considered valid and efficient the process of solidification with pozzolanic Portland cement for mining waste, this treatment reduces its ability to leach and encases them in a concrete matrix.

Key words: Disposal of hazardous waste, stabilization, Mining Waste, reuse of solid waste, physicochemical treatment.

INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad la industria minera se ha desarrollado a nivel mundial, constituyéndose en una fuente importante de trabajo a nivel mundial, como también un gran potencial de contaminación cuando sus residuos no reciben tratamiento adecuado, afectando de manera directa al ser humano y al ambiente. Sin embargo, aún queda mucho por hacer, en particular en el caso de las pequeñas operaciones mineras en países en desarrollo cuyo desempeño ambiental es precario (M.Sc. Guañuna, 2016).

En el Ecuador, la minería se ha desarrollado desde tiempos milenarios pero solamente a nivel artesanal y de pequeña minería, en la actualidad el estado ecuatoriano busca una

transformación cualitativa para el desarrollo minero.

La actividad minera genera los siguientes residuos; roca estéril, drenajes ácidos, depósito de metales y relaves (lodos), los cuales están compuestos por agua, arena y químicos (sulfuros, cianuro, arsénico, antimonio, cadmio), en sus diferentes procesos de explotación y beneficio (Alianza Mundial de Derecho Ambiental (ELAW), 2010).

Con respecto al manejo de los residuos tóxicos y peligrosos generados por la actividad minera a nivel mundial, se ha optado por la creación de tecnologías eficientes para tratar este tipo de residuos. En función de todo lo mencionado anteriormente el siguiente estudio propone la aplicación del Proceso de Solidificación con Cemento

Portland Puzolánico de los relaves mineros , por ser catalogado como una de las más seguras y viables estrategias para el manejo integral de residuos tóxicos y peligrosos, el trabajo consistió en inertizar los relaves mineros utilizando Cemento Portland Puzolánico, previo a lo cual se determinó la concentración de metales Vía residuo y Vía Lixiviado, tanto antes de la solidificación como después de la misma.

El presente estudio radica su importancia en el manejo adecuado de los relaves, con el fin de que puedan ser integrados como materia prima para la elaboración de un nuevo proceso productivo, jardines miniatura inertes, con características de durabilidad, resistencia e impermeabilidad, lo cual representará beneficios dirigidos hacia la economía como también hacia el ambiente.

El resultado final jardines miniatura inertizados tienen una serie de propiedades como: bajos costos de producción, estabilidad estructural del aglomerante a largo plazo, mínima permeabilidad y generación de lixiviados, no poseer reactividad química, no generar olores, dar una eficiente disposición final del residuo con su debido aprovechamiento (Shi y Spence, 2004).

Este estudio permitió evaluar capacidad contaminante de los relaves mineros mediante ensayos vía residuo y vía lixiviado, también se verificó la factibilidad y eficiencia

de solidificar relaves mineros con Cemento Portland Puzolánico mediante ensayo de lixiviación monolítica, mediante el cual los resultados obtenidos son inferiores a las concentraciones de los ensayos blanco, de esta manera de obtuvo altos porcentajes de inertización en la mayoría de muestras inertizadas.

MATERIALES Y METODOS

3.1. Procedimientos de campo

El tamaño de la muestra para la presente investigación fue $n = 2$, se consideró la cantidad necesaria para el proceso de solidificación. Ambas muestras fueron sometidas al proceso de secado con el fin de obtener muestras secas para poder realizar el ensayo vía residuo y vía lixiviado.

3.2. Procedimientos Experimentales

3.2.1. Diseño y elaboración de moldes

Se realizaron siete ensayos diferentes de acuerdo a la composición de cada muestra. El desarrollo y construcción de moldes se basó en la elaboración de recipientes estructurales y resistentes, las dimensiones para cada molde fueron establecidas en función del volumen que se alojaría, es decir un molde cuadrilátero de 20 cm de largo por 20 cm de ancho, con 8cm de espesor, el cual alojaría un volumen de $0,008 \text{ m}^3$ de la mezcla total.

3.2.2. Dosificación Ensayo- Blanco

El testigo blanco tuvo como materia prima: Cemento Portland Puzolánico IP, agregado fino (arena fina), agua, aditivo (Plastocrete 161HE).

Las proporciones para cada uno de los materiales fueron establecidas en función de volumen suelto, se expresan colocando primero la unidad que representa al cemento y el siguiente número representa la proporción de agregado fino, de esta manera, **C:A** (Rivera, 2006).

La cantidad de agua que se colocó, viene establecida de acuerdo al grado fluidez que la mezcla requiera hasta que llegue a ser una mezcla homogénea y manejable, como también según la utilidad que se le vaya a dar en la obra (Rivera, 2006). Tomando en cuenta esto, para lograr una mezcla homogénea, la cantidad de agua se midió con una probeta graduada de 1000 mL y se empleó 50 mL de aditivo.

Se tuvo en cuenta que para una misma fluidez, a medida que se aumenta la proporción de agregado fino respecto al cemento disminuye la resistencia, de esta manera se empleó en el testigo blanco una proporción **3:1**, significa que por cada tres volúmenes de cemento se colocó 1 volumen de agregado fino, es decir 2400g de cemento y 800g de arena fina.

El tiempo de fraguado fue de 72 horas, dentro del cual se esparció 10 mL de agua en la superficie de la muestra con el fin de adquirir una mayor resistencia al finalizar el tiempo de fraguado.

3.2.3. Dosificación – Muestras inertizadas

Durante la investigación se realizaron tres ensayos por cada una muestra sin inertizar, es decir seis muestras inertizadas. Las proporciones fueron tomadas de esta manera debido a que la masa total de las muestras no superaba los 1900g, por este motivo se establecieron proporciones de acuerdo al peso de cada muestra, se tomó como referencia la proporción del ensayo blanco **3:1**, es decir 2400g de Cemento Portland Puzolánico de manera estándar (Rivera, 2006).

La diferencia en proporciones llevó los agregados finos junto con el residuo tóxico (relaves mineros), los cuales tuvieron variabilidad de acuerdo al número de muestra que se realizó en la investigación.

Para la elaboración de las muestras inertizadas se utilizaron las mismas materias primas, la cantidad de agua y aditivo fueron las mismas cantidades establecidas para la elaboración del ensayo blanco, como también el tiempo de fraguado. Las dosificaciones empleadas se enlistan a continuación:

Tabla 1.
Proporciones Muestras Inertizadas
Muestra 1 y Muestra2

No. de Ensayo	Relación en volumen	Dosificación de materiales c= cemento; a= agregado fino; Rs= residuo (medidas en g)
1	3:4:12	c= 2400 a= 600 Rs= 200
2	3:12:4	c= 2400 a= 200 Rs=600
3	3:1	c= 2400 Rs= 800

Elaborado por: Guañuna (2016).

El procedimiento para la elaboración de Ensayo blanco y Muestras inertizadas, se basó en la NORMA INEN 2518: 2010 “Morteros para Unidades de Mampostería. Requisitos” y INE 155: 2009 “Mezcla de Morteros”.(Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010).

3.3. Procedimientos de Laboratorio

3.3.1. Porcentaje de Humedad

La humedad es el contenido de agua que posee un residuo, los residuos sólidos contienen un porcentaje considerable de agua, que varía de acuerdo a la composición del residuo, los cuales contienen un 25 y un 60 % de humedad (Coral, 2013).

La determinación del porcentaje de humedad se lo realizó para ambas muestras, la siguiente ecuación muestra como calcular % de humedad:

Ecuación 1: % Humedad

$$\%H = \frac{(P_H - P_S) * 100}{P_H}$$

Dónde:

P_H= peso del residuo húmedo.

P_S= peso del residuo seco (Coral, 2013).

Acorde con Montalvo (2015), para dar inicio a los análisis fisicoquímicos, en los cuales se basa esta investigación, era necesario obtener muestras en estado líquido, por lo que los relaves mineros presentes en estado sólido fueron procesados mediante dos métodos que se basan en la extracción de metales pesados de las muestras. Dichos métodos permitieron obtener una fracción líquida de las muestras.

3.3.2. Ensayo Vía Residuo

Acorde con Montalvo (2015), se escogió el ataque ácido con agua regia para las muestras con el fin de extraer los metales, para este ensayo se empleó un gramo de cada muestra (Montalvo, 2015).

3.3.3. Ensayo Vía Lixiviado (TCLP)

El ensayo vía lixiviado empleado en la presente investigación fue basado en la metodología empleada por (Montalvo, 2015) como también, el *Método EPA 1311-Toxicidad Procedimiento de Lixiviación Característica*, por medio del cual se empleó 5g de cada muestra, de los cuales 2,5g fueron utilizados para la determinación del pH. El fluido que se utilizó fue el Fluido No. 1, el cual está compuesto por NaOH (1N) y Ácido Acético Glacial.

Finalmente se filtró la muestra en un balón aforado de 50 mL, el cual se lo enrasó con

agua destilada, para su posterior almacenamiento.

3.3.4. Ensayo de Lixiviación Monolítica

Para comprobar la eficiencia del proceso de solidificación se realizó el ensayo de lixiviación monolítica, de esta manera el test de lixiviación/extracción se utilizó con el fin de simular escenarios de campo o para evaluar las propiedades específicas de un material (Barroso, 2002).

Una vez realizado el proceso de solidificación, se obtuvieron seis muestras inertizadas, de esta manera transcurrido el tiempo de fraguado, se pesó cada uno de las muestras con el fin de determinar el volumen de fluido extractante, FLUIDO No. 1, por cada muestra, a ser utilizado en el proceso de lixiviación monolítica.

De acuerdo al pH obtenido en procedimientos anteriores se determinó que la solución lixivante era el FLUIDO No. 1, preparado con Ácido Acético Glacial (CH_3COOH), Hidróxido de Sodio 1N (NaOH) y Agua destilada, la dosificación para obtener el volumen necesario de la solución lixivante para los ensayos fue 3 L para cada nuestras inertizada, el tiempo de suspensión fue 18 horas posterior a esto se tomó el extracto TCLP monolítico, se midió su volumen, se filtró la solución y se la refrigeró para su posterior caracterización de los metales

pesados mediante Espectrofotómetro de Absorción Atómica.

3.3.5. Espectrofotometría de Absorción Atómica

Espectrofotometría de Absorción Atómica es un método para la detección y la determinación de elementos químicos, este método se puede aplicar para la determinación de ciertos metales tales como son: cadmio, mercurio, níquel, plomo, zinc, entre otros (Bianchi, Borda, Young, & Espinoza, 2015).

EAA se basó en tres metodologías de acuerdo a cada metal a ser analizado, las cuales se enlistan a continuación:

Tabla 2.

Métodos Espectrometría de Absorción Atómica

Método	Metales Analizados
EAA – llama	Cd, Zn
Horno de Grafito	Pb Ni, Zn
Hidruros	Hg

Elaborado por: Guañuna (2016).

3.3.6. Ensayo de Resistencia

Los ensayos de resistencia referentes a la investigación no se realizó debido a un escaso volumen de residuos y estos a su vez fueron sometidos a análisis físico- químicos el cual los debilitó en un gran porcentaje perdiendo de esta manera sus propiedades de resistencia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Presentación y Análisis de Resultados Obtenidos Vía Residuo

y Vía Lixiviado - M1 y M2 (ensayos blanco)

Con el fin de obtener resultados válidos en el ensayo vía residuo, se realizó un cálculo mediante el cual se pudo obtener la concentración de metal analizado por cada kg del residuo, el cálculo aplicado es el siguiente:

Ecuación. 4 -1. Calculo mg/L mg/kg

$$\frac{\text{Lectura (mg)} \cdot \text{Volumen de aforo (mL)} \cdot 1000 \text{ g de residuo}}{1000 \text{ mL} \cdot \text{Masa de residuo (RS)(g)}}$$

Fuente: Coral, 2016.

Una vez realizado este cálculo, los resultados obtenidos se enlistan a continuación:

Tabla. 3

Datos lectura de Metales por EAA- Muestras sin inertizar – Vía Residuo

EB	Lectura de metales por EAA									
	Vía Residuo (mg /kg del residuo)									
	Pb		Cd		Ni		Hg		Zn	
1	4,77	237,35	0,25	12,45	0,25	12,50	<0,02	< 0,99	0,28	13,79
2	3,79	187,02	0,19	9,38	0,29	14,07	<0,02	< 0,99	0,16	8,05

Elaborado por: Guañuna (2016).

En cuanto a los resultados obtenidos referentes al ensayo vía lixiviado se muestran en la siguiente tabla:

Tabla. 4

Datos lectura de Metales por EAA- Muestras sin inertizar – Vía Lixiviado

Ensayo Blanco	Lectura de metales por EAA Vía Lixiviado (TCLP)- (mg/L)				
	Pb	Cd	Ni	Hg	Zn
1	0,09	0,02	0,07	ND	0,09
2	0,09	0,04	0,04	ND	0,05

Elaborado por: Guañuna (2016).

En los resultados obtenidos en las muestras sin inertizar 1 y 2, se establecieron rangos basados en la normativa aplicable, en este caso el Acuerdo Ministerial 097 con el fin de determinar tanto la concentración del metal en el residuo como también la capacidad de lixiviarse de cada metal analizado; en niveles altos, medios y bajos, los cuales se enlistan a continuación:

Tabla. 6

Rango de Concentración de los metales vía residuo

Muestra sin inertizar	Metal	Rango (mg/kg)	Concentración del metal en el residuo
1 y 2	Cd	≥0,99	Nivel Alto
		0,89	Nivel medio
		≤0,79	Nivel bajo
	Hg	≥0,25	Nivel alto
		0,22	Nivel medio
		≤0,20	Nivel bajo
	Ni	≥ 99,01	Nivel alto
		89,11	Nivel medios
		≤79,21	Nivel bajos
	Pb	≥ 9,90	Nivel alto
		8,91	Nivel medio
		≤7,92	Nivel bajo
Zn	≥ 247,52	Nivel alto	
	222,77	Nivel medio	
	≤198,02	Nivel bajo	

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2015).

Elaborado por: Guañuna (2016).

Tabla. 6.1

Rango Capacidad de lixiviarse los metales

Muestra sin inertizar	Metal	Rango (mg/L)	Concentración del metal en el residuo
1 y 2	Cd	≥0,02	Nivel Alto
		0,018	Nivel medio
		≤0,016	Nivel bajo
	Hg	≥ 0,005	Nivel alto
		0,0045	Nivel medio
		≤0,004	Nivel bajo
	Ni	≥ 2,0	Nivel alto
		1,80	Nivel medios
		≤1,60	Nivel bajos
	Pb	≥ 0,2	Nivel alto
		0,18	Nivel medio
		≤0,16	Nivel bajo
Zn	≥ 5,00	Nivel alto	
	4,50	Nivel medio	
	≤4,00	Nivel bajo	

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2015).

CADMIO: La concentración más alta se dio en el ensayo vía residuo para ambas muestras, demostrándose a partir de los datos obtenidos, que la concentración de este metal en el residuo se mantiene en niveles altos. Con respecto a la concentración Vía Lixiviado, los resultados demuestran que la capacidad de lixiviarse de este metal es alta.

MERCURIO: La concentración en el ensayo vía residuo en ambas muestras fue < 0,99 mg de Mercurio por cada kg del residuo, demostrándose a partir de los datos obtenidos que la concentración de este metal en el residuo es baja. Con respecto a la concentración vía lixiviado los resultados presentaron límites no detectables (ND), de esta manera la capacidad de lixiviarse es baja en los ensayos realizados.

NÍQUEL: La concentración más alta se dio en el ensayo vía residuo para ambas muestras, demostrándose a partir de los datos obtenidos que la concentración de este metal en el residuo se mantiene en niveles bajos. . Con respecto a la concentración Vía Lixiviado, los resultados demuestran que la capacidad de lixiviarse de este metal es baja.

PLOMO: La concentración más alta se dio en el ensayo vía residuo en ambas muestras, demostrándose a partir de los datos obtenidos que la concentración de este metal en el residuo se mantiene en niveles altos. Con respecto a la concentración vía lixiviado los

resultados demuestran que la capacidad de lixiviarse del metal es baja.

ZINC: La concentración más alta se dio en el ensayo vía Residuo en ambas muestras, demostrándose a partir de los datos obtenidos que la concentración de este metal en el residuo se mantiene en niveles bajos. Con respecto a la concentración vía lixiviado los resultados demuestran que la capacidad de lixiviarse del metal es baja.

4.2. Presentación y Análisis de Resultados Obtenidos Vía Lixiviación Monolítica: Muestras Inertizadas

Las muestras inertizadas fueron sometidas al proceso de lixiviación monolítica explicado anteriormente para su posterior lectura de metales mediante el espectrofotómetro de absorción atómica, los resultados se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Tabla. 6
Datos lectura de Metales por EAA- Muestras inertizadas –Lixiviación Monolítica

Ensayo blanco	Lectura de Metales por EAA					
	No. Muestra inertizada	Pb	Cd	Ni	Hg	Zn
		Ensayo de Lixiviación Monolítica (mg/L)				
1	M1E1	0,08	0,01	0,05	ND	0,03
	M1E2	0,08	0,01	0,03	ND	0,04
	M1E3	0,01	0,02	0,02	ND	0,08
2	M2E1	0,06	0,01	0,01	ND	0,00
	M2E2	0,06	0,01	0,03	ND	0,04
	M2E3	0,06	0,02	0,01	ND	0,03

Elaborado por: Guañuna (2016).

En los resultados obtenidos de las muestras inertizadas, se estableció rangos basados en la normativa aplicable, en este caso Acuerdo

Ministerial 097 con el fin de determinar la capacidad de lixiviarse cada metal analizado en niveles alto, medio y bajo, los cuales se enlistan a continuación:

Tabla. 7
Rango Capacidad de lixiviarse los metales

Metal	Rango (mg/L)	Concentración del metal en el residuo
Cd	≥0,02	Nivel Alto
	0,018	Nivel medio
	≤0,016	Nivel bajo
Ni	≥2,0	Nivel alto
	1,80	Nivel medio
	≤1,60	Nivel bajo
Pb	≥ 0,2	Nivel alto
	0,18	Nivel medio
	≤0,16	Nivel bajo
Zn	≥5,00	Nivel alto
	4,50	Nivel medio
	≤4,00	Nivel bajo

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2015).

Elaborado por: Guañuna (2016).

Durante la lectura de metales, el Mercurio tanto para las muestras inertizadas correspondientes al ensayo blanco 1 y 2 sus resultados presentaron límites no detectables (ND), es decir el metal tuvo concentraciones inferiores al límite de detección del equipo utilizado, de esta manera la capacidad de lixiviarse de este metal es baja. En los resultados obtenidos, se observó concentraciones altas de Zinc dentro del rango (<0,001 a 0,08) mg/L, los resultados obtenidos demuestran que la capacidad de lixiviarse este metal es Media.

De igual manera se presentó altos niveles de concentración de Plomo en las muestras inertizadas en un rango de (0,01 a 0,08) mg/L, es decir la capacidad de lixiviarse este metal es media.

Los resultados obtenidos correspondientes a las muestras inertizadas, se observó concentraciones bajas referente al Cadmio dentro del rango (0,01 a 0,02) mg/L, los resultados obtenidos demuestran que la capacidad de lixiviarse este metal es alta.

Los resultados obtenidos correspondientes a las muestras inertizadas referentes al Níquel demuestran valores en un rango (0,01 a 0,05) mg/L, es decir la capacidad de lixiviarse de este metal es baja.

4.3. Interpretación de los resultados obtenidos del Porcentaje de Inertización

Se realizó el cálculo del porcentaje de inertización para la concentración de los metales analizados, correspondientes a cada una de las muestras inertizadas, los resultados demostraron que el mayor porcentaje referente al Plomo corresponde a M1E3 con 84,4% inertizado y 15,6% solubilización, en proporción 3:1, por el contrario un un mínimo porcentaje de 11.1 % inertizado y 88.9 % de solubilización, el cual corresponde a M1E1 (proporción 3:4:12) y M1E2 (proporción 3:12:4), los cuales están compuestos por aglomerante, agregado fino y residuo sólido.

En cuanto al Zinc, el mayor porcentaje corresponde a M2E1 (proporción 3:4:12) con 100% inertizado sin presentar solubilización, el cual está compuesto por aglomerante, agregado fino y residuo sólido, por el

contrario un valor mínimo de porcentaje corresponde a M1E3 (proporción 3:1) con 11,1 % de inertización y 88,9% de solubilización el cual está compuesto por aglomerante y residuo sólido.

En el Níquel los resultados demostraron que el valor máximo corresponde a M1E3 (proporción 3:1) con 76,9% inertizado y 23,1% de solubilización, por el contrario M2E2 (proporción 3:12:4) con 25% inertizado y 75% de solubilización.

Los resultados demostraron que el valor máximo referente al Cadmio corresponde a M2E1 (proporción 3:4:12) y M2E2 (proporción 3:12:4) con 75% inertizado y 25% de solubilización, ambos compuestos por aglomerante, agregado fino y residuo sólido. El valor mínimo corresponde a M1E3 (proporción 3:1) con 25% inertizado y 75% de solubilización.

En cuanto al Mercurio no se realizó el porcentaje de inertización debido a que los resultados obtenidos presentaron límites No Detectables, es decir la concentración de este metal es inferior al límite de detección del equipo, por lo que se puede decir que el porcentaje de inertización se acerca a 100%.

En lo que refiere a la mezcla aglomerante y residuo sólido (proporción 3:1), los porcentajes máximos obtenidos correspondientes a los metales analizados (Cd, Ni, Pb, Zn) corresponde a M2E3, el cual

obtuvo la mayor cantidad de porcentajes de inertización altos.

4.4. Comparación de la Concentración en cada Ensayo Testigo respecto al Marco Legal Aplicable

Se pudo apreciar la concentración de metales de cada muestra inertizada, dichos valores han sido comparados con la normativa aplicable el Acuerdo Ministerial 097, el cual en su Anexo 1 del Libro VI del TULAS - Norma de calidad ambiental y descarga de efluentes recurso agua: Establece los valores máximos permitidos para los parámetros en base a los ensayos de lixiviación para descargas a un cuerpo de agua dulce, la tabla 6 se enlistan:

Tabla. 6
Límites Máximos Permisibles
Acuerdo Ministerial 097

Parámetros	LMP (ppm)
Cadmio	0,02
Zinc	5,0
Mercurio	0,005
Níquel	2,0
Plomo	0,2

Fuente: Acuerdo Ministerial 097, (2015).

Los resultados obtenidos de cada metal analizado demuestran que las concentraciones correspondientes a las muestras inertizadas cumplen con los Límites Máximos Permisibles (LMP) como se detallan a continuación:

CADMIO: El valor máximo obtenido 0,02 mg/L correspondiente al M1E3 y M2E3 se encuentran en el límite de la normativa.

MERCURIO: Los resultados obtenidos en la lectura de metales EAA no fueron

detectables, es decir los valores obtenidos fueron menores a los límites de detección del equipo utilizado.

NÍQUEL: El valor máximo obtenido 0,05 mg/L correspondiente al M1E1 el cual cumple con la normativa.

PLOMO: El límite máximo obtenido es de 0,08 mg/L correspondiente al M1E1 el cual cumple con la normativa.

ZINC: El límite máximo obtenido es 0,08 mg/L correspondiente al M1E3, el cual cumple con la normativa.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se concluyó durante el desarrollo de la investigación que el tamaño de la muestra debe ser mayor para posteriores investigaciones, para la elaboración de morteros (muestras inertizadas) con respecto a las proporciones, el volumen de las muestras sometidas al proceso de solidificación fue muy escaso para obtener las proporciones necesarias para la elaboración del número de morteros necesarios para ser sometidos tanto a ensayos de lixiviación monolítica como a la prueba de resistencia.
- La metodología utilizada por Ing. Oviedo Esteban, en su investigación anterior, fue adecuada ya que no es complicada ni requiere mayores recursos físicos, por lo cual es eficiente aplicarla, de manera que facilitó el

conocimiento y práctica del proceso de solidificación, el cual puede ser aplicado para posteriores investigaciones con el fin de obtener un nuevo ámbito de aprovechamiento.

- En el presente estudio solo se realizaron análisis químicos, debido a la escasez de muestras sin inertizar, de esta manera los morteros elaborados presentan cierta resistencia física, para nuevas investigaciones se debe realizar pruebas de fraguado para su posterior aprovechamiento en la elaboración de jardines miniatura inertizados.
- El análisis en el Espectrofotómetro de Absorción atómica, comprobó ser un método eficaz para medir las concentraciones de metales pesados presentes en los residuos proporcionando resultados satisfactorios para su análisis y comparación.
- La concentración de Plomo en las muestras inertizadas es alta en comparación con los otros metales, esto se debe a que en la muestra sin inertizar antes del proceso de solidificación contenía niveles altos de este metal, al momento de realizar el proceso de solidificación, se obtuvo como resultado una retención significativa en el seno de la matriz concreta con una concentración menor a la inicial.
- Es importante señalar que no se pudo realizar la prueba de resistencia por motivo que el número de muestras inertizadas fue muy

pequeño y estos a su vez fueron sometidos al ensayo de lixiviación monolítica, de esta manera las muestras inertizadas perdieron sus propiedades de resistencia al ser suspendidos en un medio ácido.

- A través de las metodologías ejecutadas en la presente investigación se pudo obtener resultados expresan que la concentración de metales pesados es relativamente baja en lo que refiere al Mercurio, Níquel, y, a diferencia del Cadmio, Plomo y al Zinc lo cuales si presentan una concentración notoria pero no sobrepasa los límites máximos permisibles, lo que expresa que el proceso de solidificación con cemento Portland Puzolánico IP como aglomerante es un tratamiento eficiente para relaves mineros.
- En base al Acuerdo Ministerial 097 como normativa aplicable y vigente, se tomó como guía para establecer una comparación entre las concentraciones obtenidas en las muestras inertizadas y los Límites Máximos Permisibles aplicables y vigentes, los resultados demostraron que las muestras cumplen con la normativa.
- En el caso de la mezcla aglomerante – agregado fino- residuo, el ensayo testigo que presento mayor porcentaje inertización fue el M2E1, arrojando resultados de concentración de metales pesados relativamente bajos, por lo tanto la proporción 3:4:12 es eficiente en el proceso de solidificación.

Es importante señalar que el tratamiento seleccionado (solidificación de relaves mineros) en todos las muestras inertizadas arrojó resultados satisfactorios sin ninguna excepción, obteniendo concentraciones finales de metales pesados inferiores a las obtenidas en las muestras sin inertizar, la mejor mezcla obtenida es 2400g de aglomerante, 600g de agregado fino y 200g de residuo sólido (proporción 3:4:12).

5.2. Recomendaciones

- Para nuevas investigaciones del mismo tipo de residuo es necesario contar con un mayor número y volumen de muestras para poder obtener el número necesario de ensayos para ser sometidos tanto a ensayos de lixiviación como pruebas de resistencia.
- Se resalta también, la posibilidad de tener acceso a las investigaciones anteriores realizadas sobre el tema de solidificación con el objetivo que estas sean tomadas como referencia y levantamiento de información bibliográfica para el desarrollo de nuevos estudios.
- Evaluar la resistencia de los morteros, con el fin de constatar la aplicabilidad en jardines miniatura, para nuevas investigaciones.
- En lo referente al trabajo realizado en laboratorio, se recomienda una mejor planificación en cuanto a tiempo del desarrollo del análisis de lectura de metales en el Espectrofotómetro de Absorción

- Atómica, o tener en cuenta como una opción la adquisición de otro equipo, con el objetivo de evitar el retraso del análisis de un número muestras.
- En un futuro es aconsejable muestrear una mayor cantidad de puntos en los relaves mineros, de esta manera se obtendrán resultados más eficientes y representativos, es también aconsejable se analice (As, Sb, CN⁻, S), que no se analizaron en la presente investigación.
 - Es importante la creación de más cuerpos legales con el fin de obtener una mayor cantidad de información acerca del tratamiento adecuado y límites permisibles para relaves generados por la actividad minera.
 - Para posteriores investigaciones es recomendable la aplicación del proceso de solidificación con cemento Portland Puzolánico IP, para la inertización de relaves mineros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alianza Mundial de Derecho Ambiental (ELAW). (2010). *Guía para Evaluar EIAs de Proyectos Mineros*. USA. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Barroso, J. (2002). Test de Lixiviación. In *Sistemas de Lixiviación* (pp. 1–38).
- Bianchi, D. M. E. V., Borda, D. G., Young, D. M., & Espinoza, D. (2015). *Espectroscopia Atómica. Análisis Instrumental*.
- Coral, K. (2013). *Tratamiento de Residuos Sólidos*. (U. I. SEK, Ed.). Quito- Ecuador.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). *NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2 518:2010* (Vol. 1373).
- M.Sc. Guañuna, F. (2016). *Actividad Minera*. Quito- Ecuador: Guañuna, Estefania.
- Ministerio del Ambiente. (2015). Acuerdo Ministerial No. 097. In *Reforma al Anexo 1 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua*. (pp. 1–184). Ecuador.
- Montalvo, P. (2015). *Plan de Investigación de Fin de Carrera : “Determinación De La Concentración De Metales Pesados de Las Cenizas Obtenidas en el Proceso de Incineración de Los Residuos Sólidos Urbanos de La Reserva Biológica Limoncocha, Vía Residuo y Vía Lixiviado.”* Universidad Internacional SEK.
- Rivera, G. (2006). Capítulo 10. Proporciones en Volumen Suelto. In *Concreto Simple* (pp. 219–229).